

# ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術

Packaging Technology of IPMs for Hybrid Vehicles

郷原 広道 GOHARA Hiromichi

荒井 裕久 ARAI Hirohisa

両角 朗 MOROZUMI Akira

ハイブリッド自動車の電力を制御するインテリジェントパワーモジュール (IPM : Intelligent Power Module) は、燃費効率と快適性の要求から小型・軽量化を図る必要がある。富士電機は、この要求に応えるため、二つのインバータと昇降圧コンバータを統合した大容量のハイブリッド自動車用 IPM を開発した。パッケージ技術である放熱設計技術と高強度はんだ技術により、モジュールとアルミニウムヒートシンクを一体化した直接水冷構造を実現した。本製品は、従来の間接冷却構造に比べて製品の体積 30%、質量で 60% の削減と、車両に要求される高信頼性を達成し、量産を開始した。

Intelligent power modules (IPMs) control the power of hybrid vehicles. IPMs are needed to be downsized and lightweight due to the request for fuel efficiency and comfort. To achieve these requirements, Fuji Electric has developed a high-capacity IPM for hybrid vehicle integrated buck-boost converter and two inverters. This time, we have developed cooling design technology and high-strength solder technology, which realize a direct liquid cooling module with an integrated aluminum heat sink. This product has achieved a product volume reduction of 30% and mass reduction of 60% compared with the conventional indirect cooling structures and high reliability required for vehicles. The mass production of the product has already begun.

## 1 まえがき

地球温暖化防止や資源の有効利用が世界各国共通の取組みとして重要性を増している。自動車業界では、電力を動力源としたハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の開発と普及が加速している。このような状況において富士電機は、2012 年 12 月に HEV 用インテリジェントパワーモジュール (IPM : Intelligent Power Module) の量産を開始した。本製品は、二つのモータを制御するインバータ部と昇降圧コンバータ部を内蔵し、HEV に必要とされる高出力をコンパクトかつ軽量で実現するものである。低損失な第 6 世代 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), FWD (Free Wheeling Diode) を用い、放熱効率の高い直接水冷構造とし、ヒートシンクには軽量のアルミニウムを適用した。さらに、IGBT の保護機能に加えて、高精度昇降圧制御機能や高精度チップ温度通信機能を備えている。

本稿では、製品の概要と、二つの新パッケージ技術について述べる。一つは、直接水冷構造での放熱設計技術であり、もう一つは、熱膨張率の大きいアルミニウムと絶縁基板のはんだ接合を可能とする高強度はんだ技術である。

## 2 製品の概要

開発した IPM の外観を図 1 に、回路構成を図 2 に示す。従来の IPM では、インバータ部 (PDU : Power Drive Unit) や昇降圧コンバータ部 (VCU : Voltage Control Unit) がおのおの機能別にモジュールを構成し、搭載されることが一般的であった。本製品は、二つのインバータ部と昇降圧コンバータ、およびコントローラ (ゲートドライバ) を統合したオールインワン・パッケージであり、高出

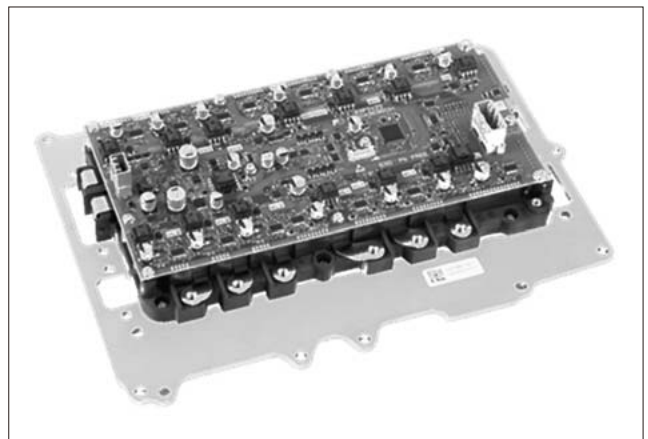


図 1 HEV 用 IPM

力を小型かつ軽量で実現している。

### 2.1 構造上の特徴

構造上の主な特徴を次に示す。

- (a) 1,200 V/500 A 14 in 1 IPM
- (b) サイズ : L340×W233×H70 (mm) (従来品体積比 30% 減)
- (c) 質量 : 3.6 kg (従来品質量比 60% 減)
- (d) アルミニウム直接水冷構造による高放熱化
- (e) 低損失第 6 世代 IGBT, FWD 搭載

モジュール上にゲートドライブ基板を配置し、2.2 節に示す高機能を実現している。

### 2.2 機能面の特徴

機能面の主な特徴を次に示す。

- (a) 低圧バッテリーからの各電源生成  
IGBT ドライブ電源を含めた 18 出力の絶縁電源を搭

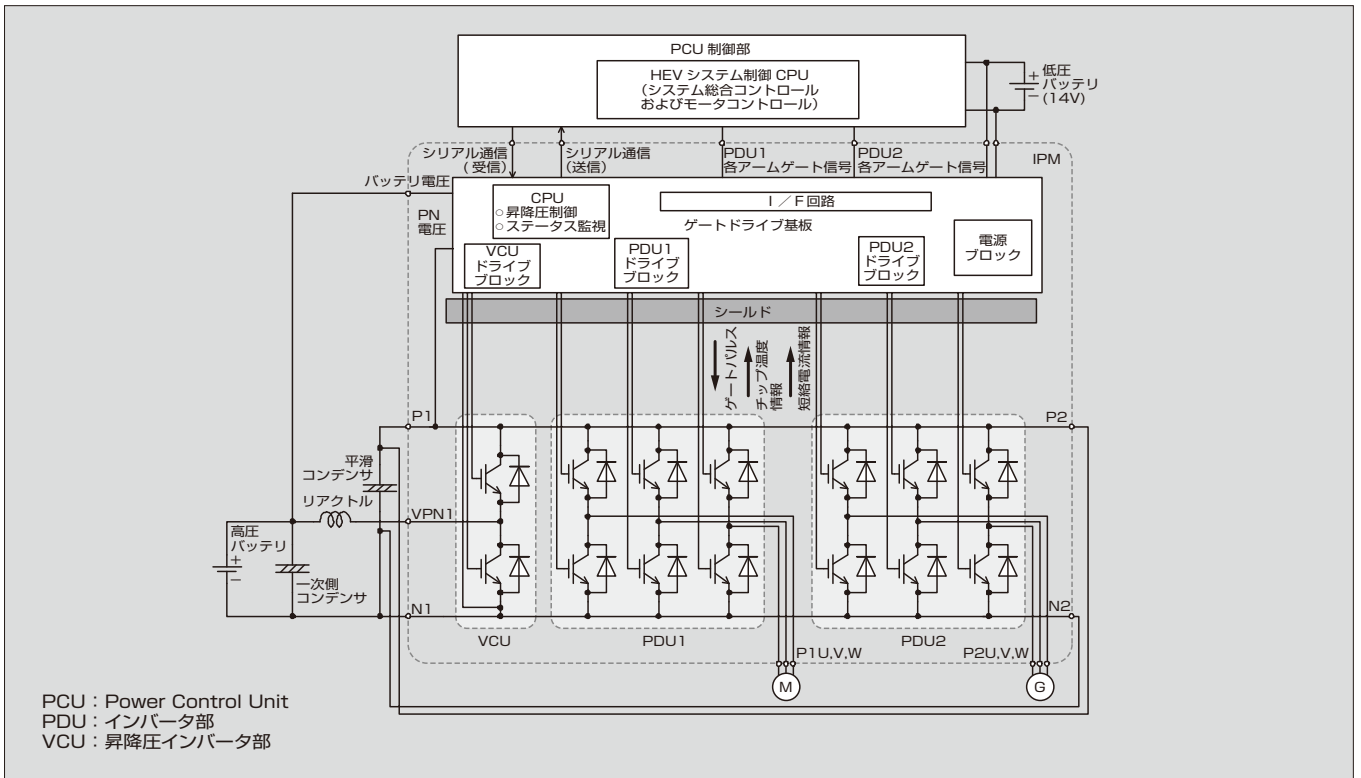


図2 IPMの回路構成

載している。

- (b) 短絡・過熱・電源電圧低下時の保護機能内蔵
- (c) 高精度 IGBT チップ温度通信
- (d) 搭載 CPU による動作状態の収集とシリアル通信

IPM 動作状態情報・IGBT ドライブ回路からのアラーム情報により、上位と連携して異常状態に対処する。

- (e) 高圧バッテリー高精度電圧計測による昇降圧制御

搭載 CPU により、上位からの指令を受けて高圧バッテリー電圧および PN 電圧を監視し、定電圧制御を行う。電圧計測は、CPU 補正を行うことで高精度を実現している。

本製品は、高出力 HEV の業界最高の燃費効率達成<sup>〔注1〕</sup>に貢献している。

### 3 直接水冷構造の特徴

#### 3.1 アルミニウムヒートシンクによる直接水冷構造

図3にIPMのパワーモジュール部の断面構造を示す。

図3(a)は、一般的な冷却方式である間接冷却構造である。この構造は、放熱性を重視してベースプレートに銅が使用される。しかし、ベースプレートとヒートシンクの熱的な接合は、熱伝導率が  $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  と低いサーマルグリースを用いていたため、熱抵抗上昇の原因となっていた。このため、周囲温度が高い自動車のエンジンルームの環境では、放熱性能が不足していた。また、銅の比重は大きく、パワーモジュール部の質量の増大につながり、搭載車の燃

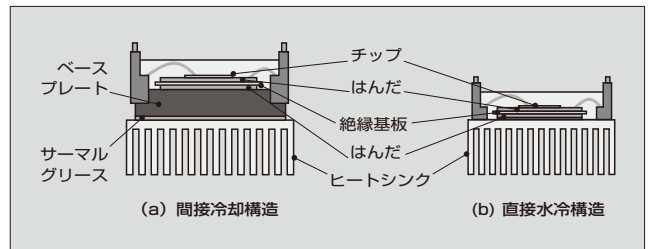


図3 パワーモジュール部の断面構造

費向上の妨げの一因になっていた。

図3(b)は、アルミニウムヒートシンクを用いた直接水冷構造である。この構造は、絶縁基板とアルミニウムヒートシンクをはんだで接合することで、ベースプレートと熱伝導グリースを省き、熱抵抗を30%低減した。さらに、ヒートシンクにアルミニウムを適用することで、従来の銅製ヒートシンクの構造と比較して質量は1/3になり、車載用冷却水(LLC)に対する耐食性も確保している。

#### 3.2 アルミニウムヒートシンク採用の技術課題

本製品は、オールインワン・パッケージであり、高集積化によって生じる各 IGBT の熱干渉を防ぐためには、放熱性能の向上が必要である。表1に絶縁基板とヒートシンク材料の基礎物性値を示す。アルミニウムは銅に対して熱膨張係数が大きく、1.5倍になる。このため、アルミニウムヒートシンクと絶縁基板を接合するはんだには、従来以上の応力がかかるため、いっそうの高強度化が必要であった。軽量のアルミニウムヒートシンクを用いた直接水冷構造を実現するための課題は、次の二つである。

〔注1〕 2013年1月現在、クラス別燃費トップである。

表1 絶縁基板とヒートシンク材料の基礎物性値

	熱伝導率 [W/(m・K)]	熱膨張係数 (ppm/K)	密度 ×10 <sup>-6</sup> (kg/mm <sup>3</sup> )
窒化けい素	90	3.4	3.3
窒化アルミニウム	170	4.6	3.3
銅	393	16.5	9.0
アルミニウム	170	23.5	2.7

- (a) アルミニウムヒートシンクの放熱性能向上
- (b) 熱膨張係数が異なる材料のはんだ付と寿命の確保  
これらの課題を解決するため、放熱設計技術の向上と高強度はんだの開発を行った。

#### 4 アルミニウム直接水冷構造の放熱設計技術

##### 4.1 IGBT チップ温度と冷却水温度の関係

水冷構造では、IGBT と FWD の発熱はモジュール部材とヒートシンクを通し、冷却水から放出される。図4に、IGBT チップ温度と冷却水温度の関係を示す。

IGBT チップ温度は冷却水の温度に強く依存し、流量変化に対する影響は小さい。つまり、ヒートシンクを流れる冷却水の流速を上げるよりも冷却水の温度を下げる方が、IGBT チップ温度の低下、すなわち熱抵抗の低減に有効であることが分かる。

##### 4.2 流路設計

IGBT チップ下の冷却水温度が放熱性能に影響することが判明したため、冷却水温度を考慮した流路設計を行った。

図5にヒートシンクと流路構成の例を示す。タイプAは冷却水が冷却部に対して長手方向に流れる構成である。一方、タイプBは短手方向に流れる構成であり、冷却水の流れに対して配置できる素子数はタイプAと比べて少ない。素子数が少ないほど冷却水の温度上昇は小さい。

素子温度をより低下させることができる構成はタイプBであり、このことは、熱流体解析結果とも一致している。タイプBのように冷却部の幅を広げると、冷却体の圧力損失の抑えることができる。冷却部の流速が偏りやすいが、

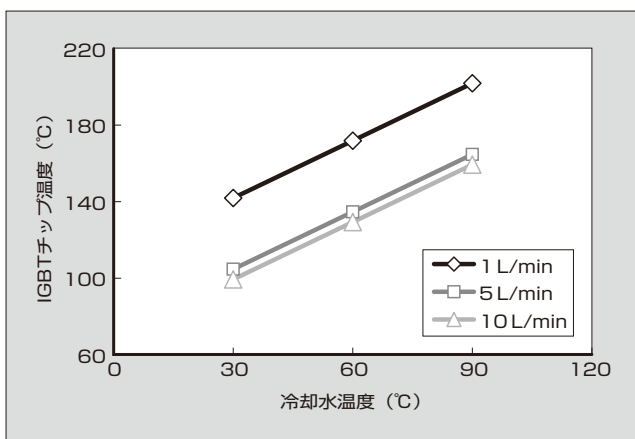


図4 IGBT チップ温度と冷却水温度の関係

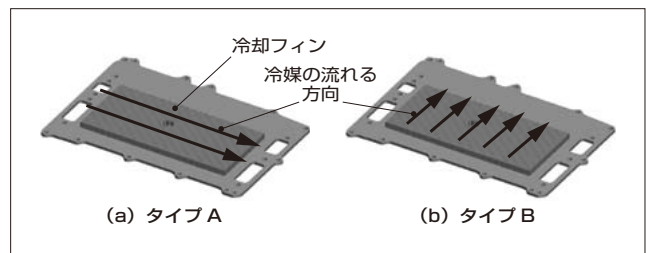


図5 ヒートシンクと流路構成の例

冷却構造の最適化を行ってこれを防いだ。

##### 4.3 流速分布の最適化

放熱性能を改善するためには、冷却水の温度を低く保つだけでなく、流速を高めることで冷却フィン<sup>(1)</sup>の熱交換性能を向上させることが重要である。本製品は、三つの機能を統合したモジュールであり、機能ごとに最大発熱条件が異なる。そこで、各 IGBT の発熱分布に合わせた冷却水の最適分配を行うことにより、放熱性能の向上を目指した。

図6に、ヒートシンク部を流れる冷却水の流速分布イメージを示す。フィン間を流れる流速を矢印で示している。図6(a)に示す改善前は、入口から遠くなるにつれて通水抵抗が低下し、流速が増加する。また、本製品はPDU2とVCUに対してPDU1の発熱密度が高い。発熱密度が高い箇所の冷却水の流速を上げることが必要である。冷却部の流速分布を調整するため、図6(b)に示すように流路内に適宜抵抗体を設けることで、発熱密度に合った流速分布に制御することができた<sup>(1)</sup>。

図7に、最適化前後における IGBT チップ温度の比較を示す。流速分布を最適化することで、各素子の温度を平均化し、素子の目標許容温度以下にすることができた<sup>(2)</sup>。

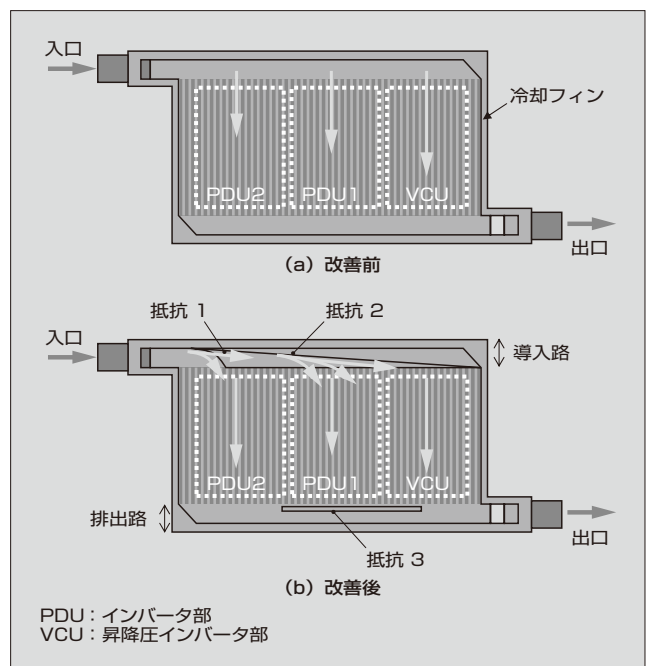


図6 冷却水の流速分布イメージ

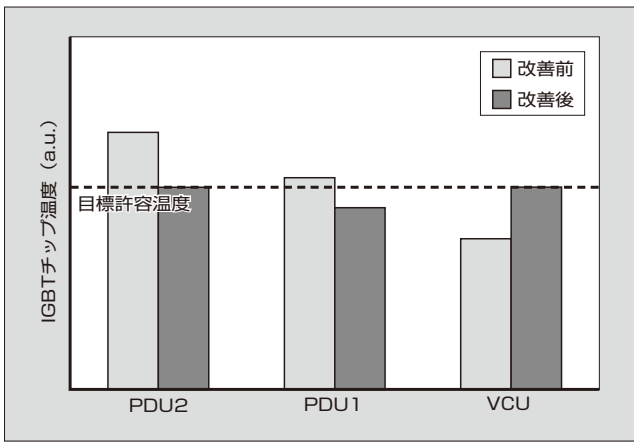


図7 最適化前後のIGBT チップ温度

5 高強度・高信頼性はんだ

ヒートシンク材料を構成するアルミニウムの熱膨張係数は銅の約 1.4 倍の 23.5 ppm/K となり、はんだ接合部にかかる応力は増大する。そこで、車載製品で求められる寿命を確保し、絶縁基板とアルミニウムヒートシンクのはんだ接合を可能にする高強度はんだを開発した。

5.1 開発コンセプト

図 8 に、信頼性試験後のはんだ組織の模式図を示す。金属の強化メカニズムとして、固溶強化および析出強化の高温下での微細組織の変化を示している。従来は単独の強化機構を利用したはんだを適用してきたが、さらなる高信頼化に対応するため、二つの強化機構を兼ね備えた高強度はんだの開発を進めた。

開発に当たり、はんだの母材には一般的に用いられている Sn (すず) を選択し、第 2 元素には機械的特性と耐熱性の向上に有効な材料として実績のある Sb (アンチモン) を選択した。Sn に対する Sb の添加量が、固溶限界以下の添加量では固溶強化の効果が現れることが期待できる。さらに、Sb 添加量を固溶限界以上に増やした場合には、固溶しきれない SnSb 系化合物が析出する。Sb の固溶強化と析出強化の二つの強化が同時に発現することで、粒界

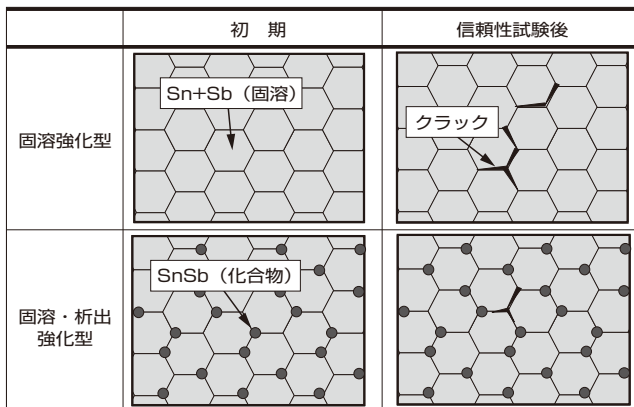


図 8 信頼性試験後のはんだ組織の模式図

クラックの抑制が期待できる<sup>(4), (5)</sup>。この考えに基づき、Sb 添加量ははんだ材料特性に及ぼす影響について検証を行った。

5.2 Sb 添加量がはんだの強度に与える影響

5.1 節で述べた開発コンセプトを実証するため、Sb 添加量の異なるタイプ 1 とタイプ 2 の 2 種類の Sn-Sb はんだについて、強度評価を実施した。タイプ 1 は Sb 添加量を Sn に対する固溶限界以下に調整し、タイプ 2 は Sb 添加量を固溶限界以上に調整した。

図 9 に、タイプ 1 とタイプ 2 のはんだを用いた引張試験の結果を示す。試験は JIS に準拠した試験片を各組成に鋳込成形により成形し室温条件で実施した。この結果から、Sb の添加量を固溶限界以上としたタイプ 2 は、タイプ 1 の 1.5 倍以上の強度があり、析出強化によって高強度化が実現できることを確認した。

次に、タイプ 2 のはんだの耐熱性を評価するため、実際の動作環境を模擬して高温時効後の強度変化を調査した。図 10 に、初期強度に対する高温保存後の引張強度を示す。本調査では、代表的な析出強化型のはんだである Sn-Ag はんだを比較対象とした。

タイプ 2 のはんだは、150℃、175℃ともに 1,000 時間経過後も初期強度を維持している。一方、Sn-Ag はんだ

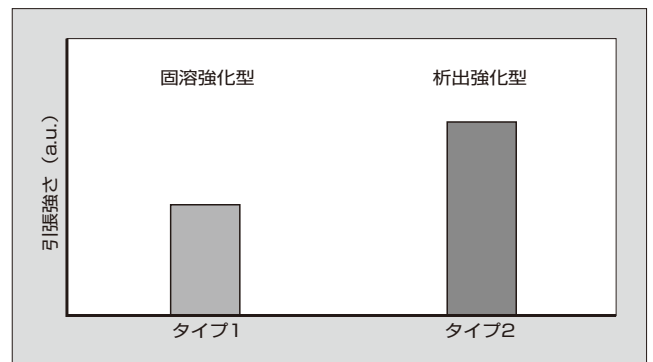


図 9 Sn-Sb はんだ引張強度比較

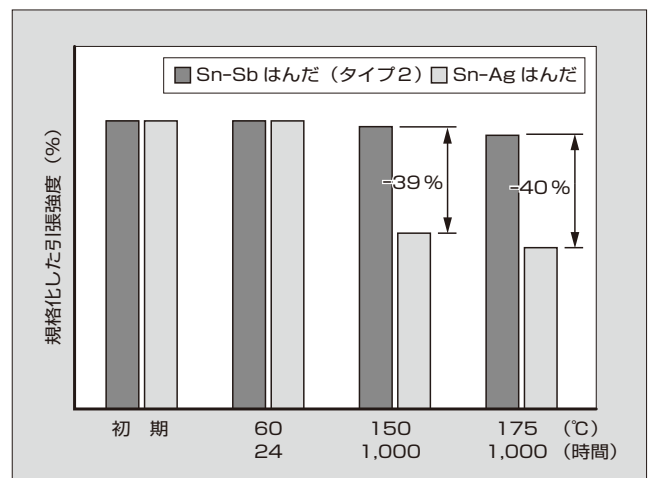


図 10 高温保存試験後の引張強度

〈注 2〉 時効：時間の経過に伴い金属の性質（例えば、硬さなど）が変化する現象をいう。

では、高温環境下での強度が Sn-Sb はんだ（タイプ 2）に対して約 40% 低下した。

この結果から、固溶強化と析出強化を組み合わせることで、高温動作下でも優れた強度を持ち耐熱性を満足することを確認した。

次にタイプ 2 の Sn-Sb はんだについて信頼性評価を実施した。

### 5.3 Sn-Sb はんだの信頼性評価

はんだを用いて絶縁基板をアルミニウム板に接合した試料を作製し、温度サイクル寿命評価を実施した。温度サイクルは -40 ~ +105℃ の条件で試験を行い、クラック長さは超音波探傷装置（SAT）を用いて撮像し、測定した。

Sn-Sb はんだと Sn-Ag はんだの比較結果として、図 11 に温度サイクル試験において 2,000 サイクル経過後のはんだ接合部の SAT 像を、図 12 に温度サイクル試験における各はんだのクラック長さ増加量を示す。

SAT 像は、クラックが進展している領域を白色で示しており、Sn-Sb はんだを用いた試料はクラック進展が軽微である。一方、Sn-Ag はんだはクラック進展が顕著である。この結果から、Sn-Sb はんだは Sn-Ag はんだよりも耐久性が高いことを確認した。

これらの結果から、開発した Sn-Sb はんだは、熱膨張係数差の大きい絶縁基板とアルミニウムヒートシンクの接

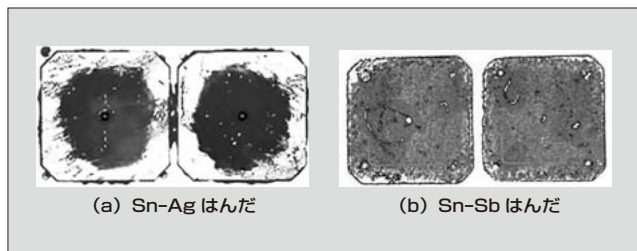


図 11 温度サイクル試験後のはんだ接合部の SAT 像

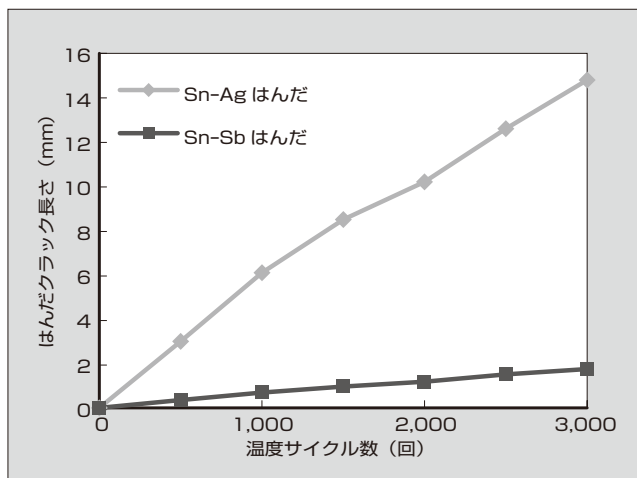


図 12 温度サイクル試験におけるクラック長さ増加量

合でも高い信頼性を確保できることを明らかにした。

## 6 あとがき

本稿では、ハイブリッド自動車用インテリジェントパワーモジュール（IPM）の概要と、二つのパッケージ技術について述べた。

パッケージ技術は、お客さまのインバータ開発設計を支援するものであり、これらの技術を基にさらなる技術革新を推進し、高効率、省エネルギー化に貢献する製品を提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) Gohara, H. et al. Cooling device for semiconductor module and semiconductor module. Patent Application. PCT/JP2012/072554.
- (2) Saito, K.; Otuka, H. "Development of PCU for a new HEV drive". Proceedings of Japan Society of Automotive Engineers Annual Congress (Spring). Kanagawa, Japan, 2013.
- (3) Nishiura, A. Morozumi, A. "Improved life of IGBT module suitable for electric propulsion system". Proceedings of the 24th EVS, Stavanger, 2009.
- (4) Morozumi, A. et al. "Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications". Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa, 2013.
- (5) Saito, T. et al. "New assembly technologies for Tjmax=175°C continuous operation guaranty of IGBT module". Proceedings of PCIM Europe 2013, Nuremberg, p. 455-461.



郷原 広道

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。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次世代モジュール開発センターパッケージ技術部。日本機械学会会員。



荒井 裕久

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技術統括部 EV モジュール技術部。



両角 朗

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。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次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



\*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。