

特集

ハイブリッド自動車用インバータ* 両面放熱パワーモジュール 「パワーカード」 Structural Development of Double-sided Cooling Power Modules

平野 尚彦
Naohiko HIRANO

真光 邦明
Kuniaki MAMITSU

奥村 知巳
Tomomi OKUMURA

The Power Control Unit (PCU) has been commercialized in the automotive market for hybrid vehicles by DENSO in 2007. The PCU has extremely high output power associated with high power dissipation and is installed in a limited small space in hybrid vehicles. A new "Double-sided Cooling Power Module" has been developed to achieve the installation of the PCU in hybrid vehicles. In the new module, the power semiconductor devices (IGBT and Diode) are sandwiched between combination units of (1) "a heat spreader" and (2) "a cooling plate with corrugated fins" to downsize the PCU while controlling high output power and it has three solder joint layers including a very unique layer on the upper side of the power device. Damage-susceptible transistor cells and p-n junctions of power devices are formed in the top surface layer and device stress damage may significantly influence the reliability of the product. Therefore, we have investigated the stress using a specific stress-monitoring device because the utmost attention must be paid to the stress that is caused by the solder on the upper side of the power devices and by the assembled structure. Consequently, we have decided the optimum thicknesses of each solder layer and developed a new position control soldering method. Additionally, we have clarified that the surface roughness of the heat spreader does not influence thermal resistance (by investigating the effect of the surface roughness.)

Key Words: Hybrid vehicle, Double-sided cooling, IGBT, Diode, Solder joint

1. はじめに

デンソーは、2007年に両面放熱構造を採用したハイブリッド自動車 (Hybrid Vehicle:HV) 向けのパワーコントロール・ユニット (Power Control Unit:PCU) を量産化した。このPCUには、世界初となる樹脂モールドによる両面放熱パワーモジュール (パワーカード) が搭載されている。

パワーカードにより、PCUの体格は一段とコンパクトになった。このことは今後、展開車種が増えていく中、「搭載自由度の確保」と、動力性能の向上に対応した「高出力化」を両立させるために、優位に働く。

本特集ではパワーカードについて、本論文を含めた3つの論文で詳細を述べる。

1. パワーカードの構造、および放熱性能
2. パワーデバイス、および表面電極技術
3. はんだ材料、および接合技術

2. 車載用パワーエレクトロニクス製品の特徴

パワーカードの各論に入る前に、一般のパワーエレクトロニクス製品 (以下、パワエレ製品) と、車載用パワエレ製品との対比をしてみたい。

家庭では、エアコンやフラットパネルTVを始め、冷蔵庫、IH調理器、中には太陽光発電パネル、電動バイクなど、省エネを意識した多くの電化製品がある。こうした電化製品では、使われる電力をきめ細かく調

整することによって、省エネ、低騒音、小型化がなされている。これらを陰で支えているのが、電力変換機器、あるいは半導体パワーデバイスである。近年は、「インバータ・エアコン」、「インバータ照明」など、インバータという電力変換機の名称も一般化してきている。

次に社会に目を向けてみる。新幹線に代表される電鉄分野、エレベータや工作機械などの産業機器分野、あるいは太陽光発電や風力発電などの新エネルギー発電、および電力系統との連携を制御する電力機器分野などにも、多くのパワエレ製品が使われている。

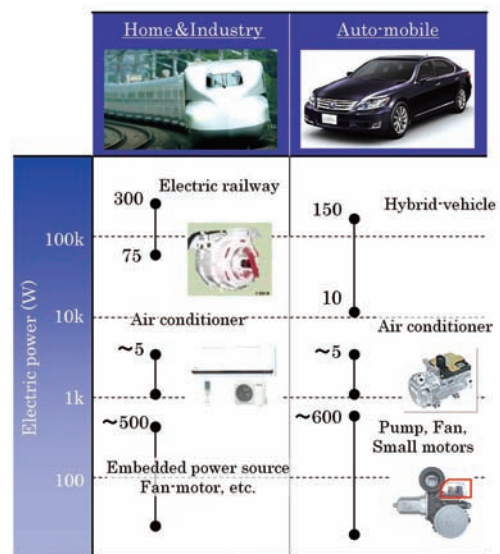


Fig. 1 Comparison of electronic apparatus between industrial and automotive fields

*2011年8月6日 原稿受理

Fig. 1は、家庭・社会のパワエレ製品と、車載用のパワエレ製品を比較したものである。Fig. 1の左側は新幹線をはじめとした、家庭・社会のパワエレ製品群である。

新幹線では、1999年以降IGBT (Insulated Gate Bipolar transistor) を使用した可変電圧・可変周波数 (VVVF:Variable Voltage, Variable Frequency) インバータが採用されてきた。N700系新幹線車両では、車体の軽量化、空力抵抗の低減とも相まって、0系新幹線車両と比較し、220km/h換算で約50%、270km/h換算でも70%のエネルギーで、東京-大阪間を走行できるようになった。「安全で速く、しかも省エネ」という、まさに世界に誇る技術である。現在、VVVFインバータは在来線、地下鉄車両にも広く普及している。

Fig. 1の右側はHVのひとつ、レクサスLS600hである。1997年、トヨタ自動車から初代プリウスが発売されて以来、HVもさまざまな進化を遂げ、現在、最も電子化、パワエレ化が進んでいる車両のひとつであろう。

N700系新幹線のモータ1台あたりの出力は約300kW、レクサスLS600hの走行用モータは約150kWであり、扱う電力はほぼ同じレベルである。

エアコンはどうであろうか。標準的な12~16畳向けの家電用エアコンには、5kW程度のコンプレッサ・モータが使われている。一方、車載用エアコンのコンプレッサ・モータもちょうど同じく、5kWクラスである。

その他、家電に見られるようなファン・コントローラやインバータ照明、組込み電源なども、車両のラジエータファンやエアコンの送風用ブローモータなどと、ほぼ同じ電力帯に位置していることが判る。

このように、家庭・社会のパワエレ製品とクルマのパワエレ製品は類似性が高いことが伺える一方、クルマには電鉄などの社会インフラ級のアプリケーションから、ホーム・エレクトロニクス製品に相当する、幅広いレンジの製品が「一緒」に搭載されているということがお判りいただけると思う。まさに社会の縮図といえる。

しかも、鉄道車両のように床下空間を利用できるわけでもなく、家庭用エアコンのように室外機が別置きにできるわけでもなく、それらすべてをたかだか1.5×1.5mのエンジンルーム内外に納めなければならない。

ここにHV向けのPCUをはじめとする車載用パワエレ製品の進化の方向性の一端が見て取れるのである。

3. 車載用パワエレ製品の進化軸

このようにクルマでは、限られた空間、重量の中で、多くのパワエレ製品を詰め込むわけだから、一般的な「プリント基板+ディスクリート半導体&部品」の組合せによる古典的な実装・製品形態では対処できない。このため、車載向け製品では、「高機能化」、「高出力密度化」と、車載特有の「信頼性」とを両立させる、独自の技術開発が進められてきた。

Fig. 2は、大橋ら^{1) 2)}の視点をもとに一般的なパワーユニットの出力密度を年次ごとにプロットしたものである。

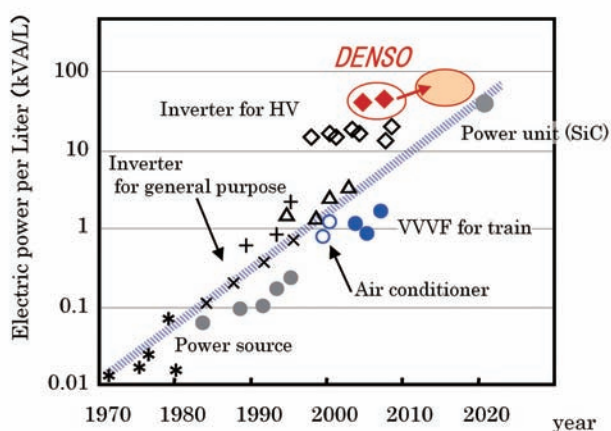


Fig. 2 Trend in output power of electric apparatus

電圧に対する法規や安全性に対するマージン設定の違いもあるので詳細な差異を議論するつもりはないが、HV向けのインバータは、産業・民生向けのパワエレ製品よりも相対的に出力密度が高いことが判る。

このようにより高い搭載自由度と、高出力を両立させるという開発戦略を色濃く反映された製品のひとつである。

Fig. 3に従来の放熱構造と両面放熱構造の概略図を示す。両面放熱構造とは、パワーデバイスの両側に金属接合 (はんだ) でヒートシンクとなるリードフレームを固着し、両側から冷却するというシンプルなコンセプトであるが、これまでなかなか実用化されてこなかった。電鉄向けに両面放熱構造のものもあるが、³⁾ 厳密にはパワーデバイスと外部電極とは圧力による接触方式が取られており、固着方式ではない。また、堅牢な支持機構や高価なパッケージングを使用するなど、一般的な機器に使用されることはなかった。

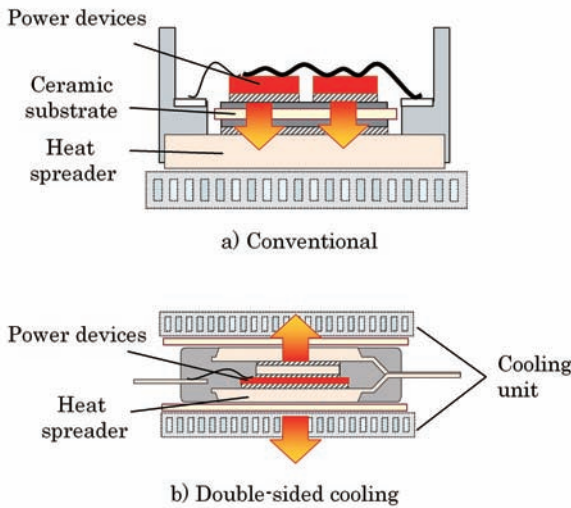


Fig. 3 Cross sectional view of a conventional power module and a double sided power module

Fig. 4に、パワーカードにおける実装技術の観点を示す。10mmを超えるような大型パワーデバイスの両面に熱膨張係数の異なる金属を直接接合することは、パワーデバイスや、接合部に過大な応力やひずみがかわり、さまざまな影響が懸念される。これらの課題を適切なコストと手段で解決する方法が、長らく実用化されてこなかったことが、本構造のような実装形態が実現されなかった要因のひとつと考えられる。

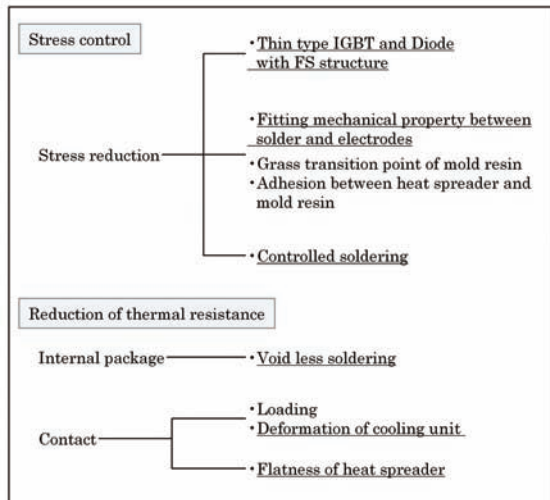


Fig. 4 Key points in the structure of a double-sided power module

このため、パワーカードの実装技術開発においては、応力やひずみに対する十分な検証を行ってきた。次節ではパワーカードの構造面での特徴を応力の観点から述べていく。

4. パッケージ内部の応力・ひずみの可視化

開発における主な観点は、パワーデバイスや接合部に加わる応力やひずみを制御し、その影響度を見極めることである。

一方で、応力やひずみは可視化がすることが難しい。特にパッケージ内部にあるパワーデバイスの応力を直接的に把握する手法は限られている。

このため、我々はシリコンの piezo 抵抗効果を利用したひずみ検出エレメントを搭載した「TEGデバイス」を製作した。Fig. 5にTEGデバイスを示す。図中の○印は検出エレメントの設置部位である。これにより、樹脂モールド後などの静的な応力状態から、温度サイクル試験時、あるいは外力印加時における動的な応力状態を把握することが可能となる。さらにその検出されたひずみ評価結果をベースにした精緻な応力シミュレーション技法を構築し、実装構造全体の挙動を明らかにした。

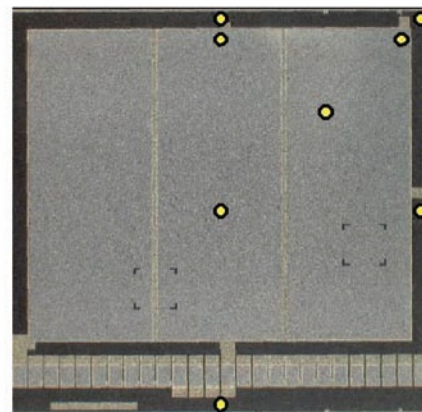


Fig. 5 TEG device including piezoelectric elements

Fig. 6は、ひずみTEGデバイスを実際のパッケージに実装し、モールド封止後の状態から-40~125℃の温度サイクル評価に投入したときの実測結果と、それを再現したシミュレーション結果である。

本シミュレーションでは、特に鉛フリーはんだのクリープ特性に注目し、各材料の物性値の温度依存性を取得し、有限要素法による2次元弾-塑性（クリープ）解析を行った。Fig. 6の評価点はTEGデバイス中央部のひずみエレメントであり、その点における水平方向の主応力である。

実測結果、およびシミュレーション結果とも、温度サイクルを経るごとに全体の応力緩和が見られた後、実測結果では5サイクル以降、シミュレーションでは3

サイクル以降に、概ね安定した応力-温度（ひずみ）特性を示す。過渡領域ではやや差異はあるものの、長期信頼性の検討対象となる10サイクル以降のひずみ特性は概ね5%程度の範囲で一致している。

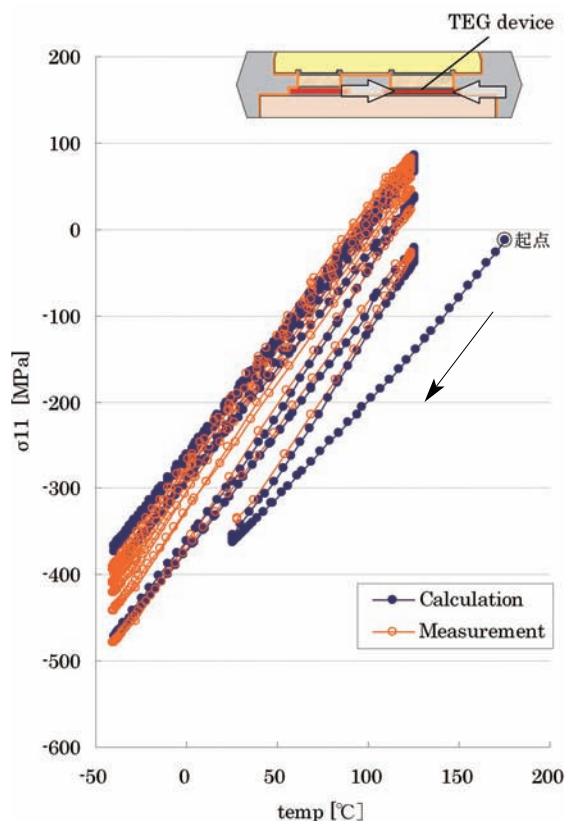


Fig. 6 Measured and simulated results of principal stress at the center of a TEG device under a thermal cycle test (-40~125 °C)

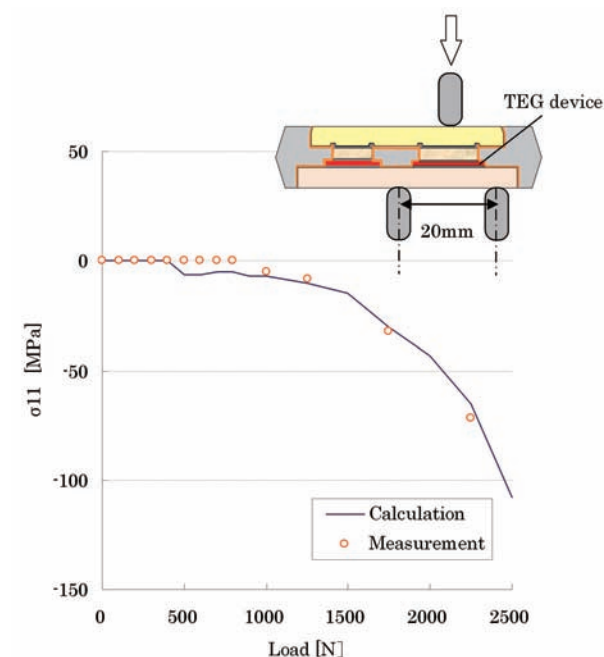


Fig. 7 Measured and simulated results of principal stress at the center of a TEG device under a bending test (at R.T.)

これ以外にもはんだ材料による差、外力による曲げ試験等に対しても、TEGデバイスによる評価結果とシミュレーションの比較を行い、いずれも同様のモデリング手法で応力状態を表現できることを確認した (Fig. 7).

5. パワーデバイスに対する応力の影響

前節で述べたように、パワーデバイスには水平方向に強い圧縮応力が加わる。圧縮応力自体ではパワーデバイスの基体であるシリコンそのものがダメージを受けることはないが、トランジスタ特性や接合部に影響が生じる恐れがある。

パワーデバイスの電気特性に対する応力の影響については、本特集号の論文「パワーカード用半導体素子の設計で詳細を述べる。また、接合材料となる鉛フリーはんだと、その被着対象となるパワーデバイス表裏面の電極（Niめっき電極、Al電極、他）との相互関係について、本特集号の論文「両面放熱モジュール「パワーカード」の実装技術で詳しく述べる^{4),5),6)}。

ここでは、パワーデバイスの表裏面におけるひずみの制御について述べる。パワーデバイスにはフィールドストップ構造を持つ薄型デバイスを採用し、接合界面の応力低減を図っている。しかし実装構造としては、トランジスタが形成されるパワーデバイス表面側のひずみを低減し、これまでの実装形態と同様、パワーデバイス裏面のはんだ接合部で疲労寿命が決まることが望ましい。

パワーデバイスから見ると、表面、裏面ともほぼ対象構造となるので、ヒートシンクの厚さを若干変化させる程度では、表裏面のひずみ関係は変わらない。このため我々は、モールド樹脂の熱膨張係数に対する表裏面のひずみ変化に着目した。

Fig. 8に、モールド樹脂の熱膨張係数を変化させた場合のパワーデバイス表裏面における、相当塑性ひずみの振幅値（シミュレーション）を示す。これによると樹脂の熱膨張係数を10ppm以上にすると、パワーデバイス表面のひずみが、裏面のひずみよりも抑制できることが判る。

実際に熱膨張係数が16ppmにおける冷熱サイクル試験後のパワーデバイス表面、および裏面の超音波探傷像をFig. 9に示す（破壊限界試験）。これによると裏面側にはわずかなはんだクラックが入っていることが確認できるが、表面側にはそれに類するクラックが見ら

れない。これらの結果から、モールド樹脂の熱膨張係数を適切な範囲に設定することにより、製品の第一寿命となるはんだ接合部の部位が制御可能である。パワーカードでは、材料公差も考慮し、熱膨張係数が14ppmを中心とするモールド樹脂を採用した。

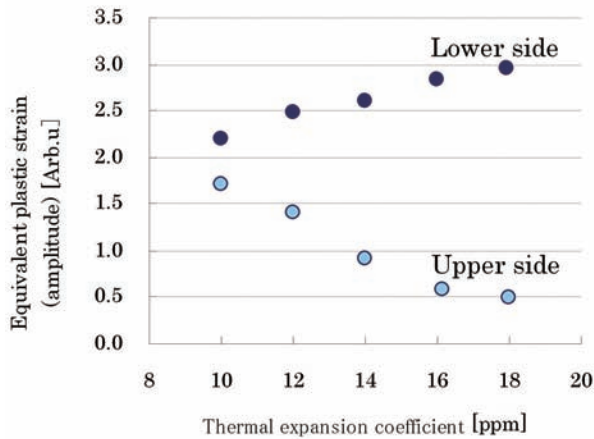


Fig. 8 Relationship between the equivalent plastic strain and thermal expansion coefficients of mold resin in simulation

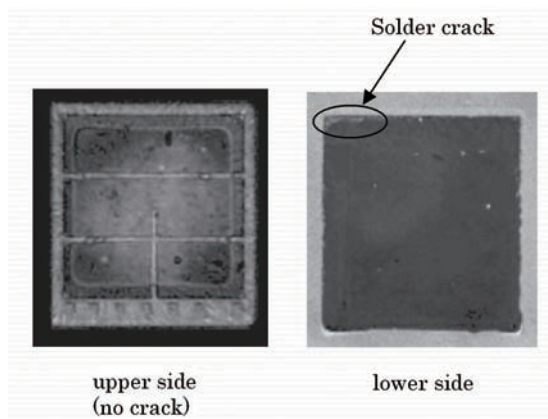


Fig. 9 SAT images of the upper/lower side of a power device after the thermal cycle test

6. はんだ接合部の制御 姿勢制御接合法⁷⁾

Fig. 3に両面放熱パワーモジュールの断面構造を示したが、はんだ接合層は3ヶ所ある。はんだ接合部の厚さは、冷熱サイクル等に代表される熱疲労寿命を左右する。はんだ厚さと熱疲労寿命との関係をFig. 10に示す。一般的にはんだ厚さを確保すれば寿命は向上するが、はんだの絶対量が増えることにより、パワーデバイスの傾きや、溢れを誘発するため、姿勢制御が必要となる。

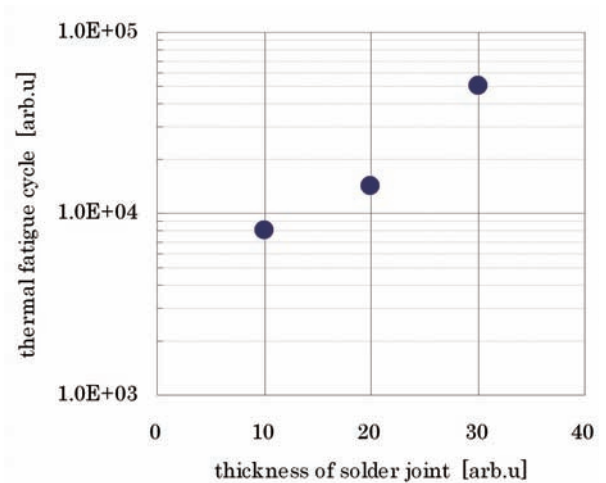


Fig. 10 Relationship between thermal fatigue and solder joint layer thickness

これまでのパワーモジュールではパワーデバイス裏面のはんだ接合のみであり、姿勢（位置）制御ははんだの表面張力に依っていた。パワーカードでは、上下のヒートシンクや各 부품の寸法公差や、組付け公差に配慮しつつ、素子両面のはんだ厚さを制御し、かつはんだ量を過不足なく供給し実装することが必要となる。

課題は、Fig. 11に示す2点である。

- ① トータルはんだ量（平均厚さ）をコントロールしつつ、素子の傾きを抑制し、はんだ厚の薄い部分をなくすこと。
- ② 3層あるはんだ層すべてに対し、過不足なくはんだを供給すること。

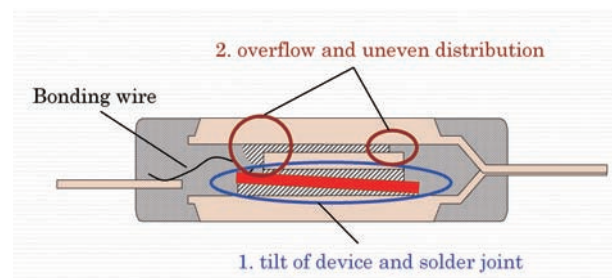


Fig. 11 Key issue of position controlled soldering in a double-sided power module

はんだが薄い部分では熱ひずみが集中し、クラックが発生しやすい。このためパワーカードでは、はんだ接合部の厚さコントロールが重要となる。トータルのはんだ量は、プリフォーム材（はんだ箔）を採用することで定量供給することとした。素子の傾き抑制に対しては、物理的な保持機能により最低はんだ厚さを確保することとした。これには、費用対効果の面からも

っともポテンシャルの高い、Ni粒子を分散させたはんだプリフォームを開発し、はんだ量と厚さの制御方法を採用した（詳細は本特集号の論文「両面放熱モジュール「パワーカード」の実装技術参照」）。

最終的には当該プリフォームはパワーデバイス両面の接合部に採用した。

一方、残りの1層は各 부품の寸法公差と組付け公差の吸収を目的とし、余剰となるはんだを取納する機能を持たせつつ、はんだの不足領域が生じないようにしなければならない。

余剰はんだについては、エミッタ側リードフレーム（図中の上側のヒートシンク）の表面の適切な位置に「溝部」を設け、取納することとした。この溝部は大きければいいのではなく、熱抵抗を悪化させない範囲で設定されている。また、余剰はんだが他の部位へ流れ出さないようにしなければならない。はんだの流出先として懸念されるのは、パワーデバイス上に接合されるCuターミナルの側面である。本開発ではエミッタ側リードフレームの表面に極薄いAu処理を行うことにより、はんだ濡れ性に確実な差を設け、はんだが溝部に収まるようにした。

Fig. 12は、こうして得られた姿勢制御はんだ接合方法による接合状態を示した断面図である。採用前には素子の傾きと溢れが顕著であったが、採用後、素子傾きは抑制され、余剰はんだも選択的に溝部に取納されていることが確認できた。

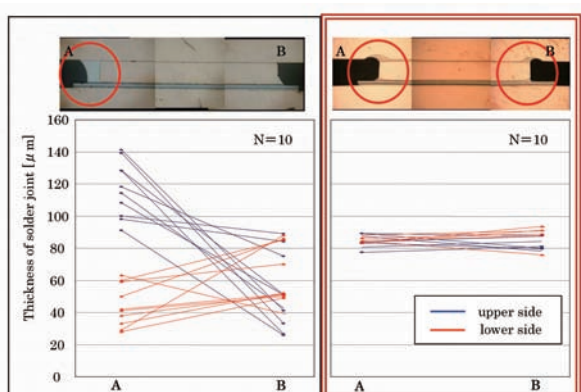


Fig. 12 Experimental result of solder thickness by controlled soldering process

以上、別掲の論文にも詳細を記載したが、上述の実装技術を用いたパワーカードにおける冷熱サイクル試験結果をFig. 13に示す。各はんだ接合層の超音波探傷像（SAT）を示すが、所定の条件の試験を経ても、はんだ層にはクラック等が生じておらず、良好な接合寿

命が得られていることが判る。

ただし、この状態では、はんだ接合層の冷熱疲労がどの部位から生じ、どのように進行するのか、などの疲労形態の検証ができない。このため、初期、および目標寿命の2倍となる冷熱サイクル試験を経たサンプルにおいて、後方電子散乱像（Backscattering Electron：BSE）、および電子後方散乱解析像法（Electron Backscattering Pattern：EBSP）を用い、はんだ接合層の金属疲労の進行状況を検証した。

Fig. 14は、BSE,およびEBSPによる解析結果である。EBSP像によると、初期状態と比較し試験後のはんだ接合層では、素子端部から結晶粒の微細化と粒界角度の不均一が生じていることが認められた。

これはパワーカードのはんだ接合も通常の半導体素子の実装と同様に、パワーデバイスの端部から疲労が生じることを示しており、通常の寿命推定と同様なアプローチが可能である。併せて、全体の応力設計が最適化されており、はんだ接合部の疲労を極力、抑制することができたことを表している。これらの結果から、パワーカードが長期信頼性にも優れる構造であることが実証された。

なお、限界状態まで試験を継続したサンプル（Fig. 8掲載、冷熱サイクル・15000サイクル以上）でのEBSP像をFig. 15に示す。これによると一段とはんだ結晶粒の微細化が進み、はんだ接合部の端部からクラックが生じることを確認され、信頼性設計の妥当性が検証された。

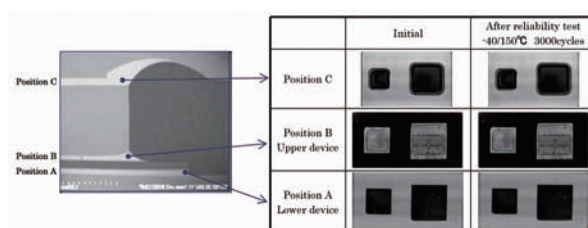


Fig. 13 SAT image of the solder layer before/after a thermal cycle test (-40~150°C)

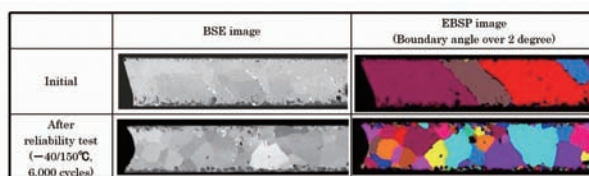


Fig. 14 EBSP images at the initial stage and after a reliability test

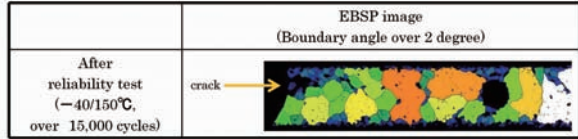


Fig. 15 EBSP image after an extreme durability test

7. 平面精度と放熱性

パワーカードはパワーデバイスの両面にヒートシンクを設け放熱性能を高めているが、効果的に放熱性能を得るためには、専用の冷却器が必要となる。冷却器については、別掲の論文で詳細に述べるが、ここではパワーカードの平面精度と放熱性との関係について述べる。

従来のパワーデバイス向け冷却器は、片側に冷却水路を有するものが主流であった。電鉄向けなど一部用途では、冷媒中に浸漬する直接液冷などがあるが、自動車向けとしてはコスト、構造面などから限定的であることは先に述べた。

両面冷却器ではマイクロチャネル構造を取り入れ、冷却水路での熱伝達性能を上げるだけでなく、パワーカードを両側から挟み込むための可変構造や、パワーカードと冷却器パイプとの密着性を高めることが必要となる。⁸⁾

Fig. 3の断面構造からも判るようにパワーデバイスから冷却器までの熱抵抗は、

1. パワーカードの内部熱抵抗,
2. 冷却器自身の熱抵抗,
3. パワーカードと冷却器との接触界面における接触熱抵抗,

の3つに大別される。

接触熱抵抗を低減させるには、冷却器側の追従性、荷重、およびモジュール側の平面精度の面からアプローチが必要となる。

ここでは、パワーカード側からみた接触熱抵抗に関し、パワーカードの放熱面の平面精度に着目して述べる。

パワーカードの放熱面の平面精度は、平行度と表面粗さに大別される。ただし、これを単純に冷却器で挟み込み、試験を行うと、Fig. 16に示すようにその特徴が失われてしまう場合がある。

このため本研究では、冷却器の平行度と剛性を高め、パワーカードの表面形状に追従しない熱抵抗試験機を製作し、評価を行った。

Fig. 17に熱抵抗の評価結果を示す。なお、評価には境界面に熱伝導率1K/Wのグリスを使用した。これによると平行度が100 μ mを超えると熱抵抗が急速に増大するが、表面粗さにはほとんど依存しないことが判る。

実際の両面冷却器は弾性変形するので、パワーカード表面の平行度にある程度は追従するが、多段の冷却構想であることや、放熱性能の安定化を実現するために、パワーカードではヒートシンクの放熱面を切削し、50 μ m以下の平行度を実現している。

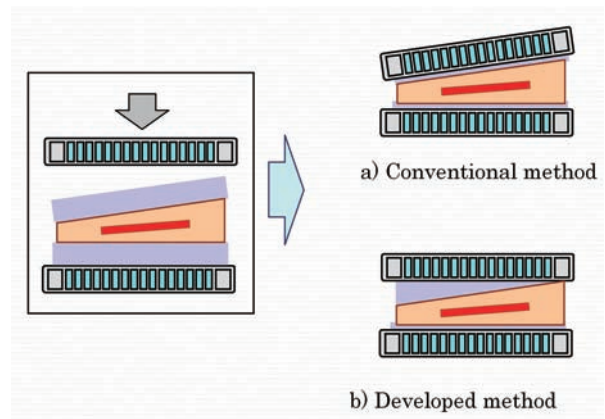


Fig. 16 Key points in measuring the thermal resistance of a double-sided power module

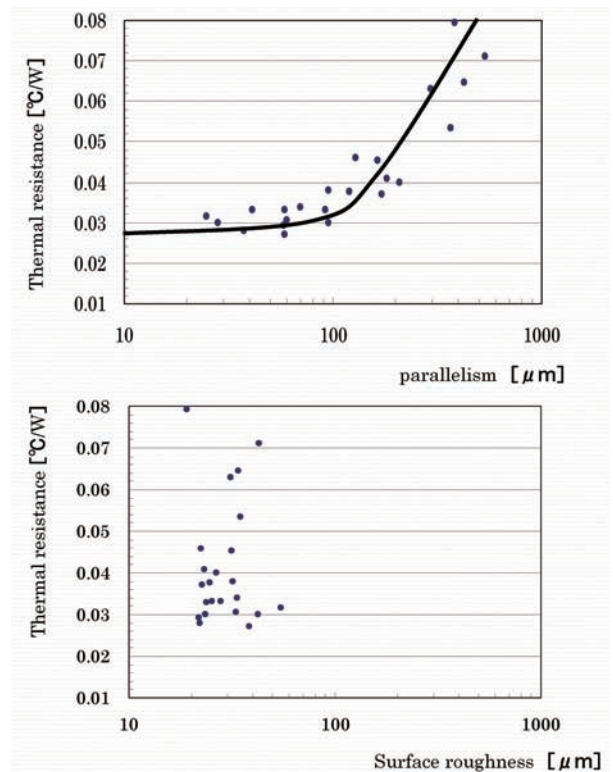


Fig. 17 Measurement results of thermal resistance when changing the surface roughness and parallelism of a heat spreader

おわりに

以上により、パワーカード、および両面冷却器技術を組み合わせることにより、長期信頼性に優れたパッケージ構造を提供するとともに、従来の水冷冷却方式と比較し約1/2となる0.3K/W以下という熱抵抗を安定して達成することに成功した。

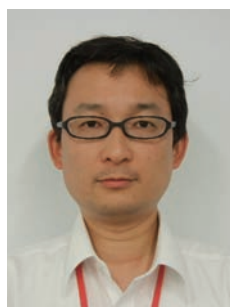
<参考文献>

- 1) 大橋：解説「最新のパワーデバイスの動向」, 電気学会誌, Vol.121(2002), p168-171
- 2) 平野, 他：「車載用パワーエレクトロニクス製品の紐解きと、両面放熱パワーモジュールの実装技術」, 溶接学会誌, Vol.80, No.4, (2011)
- 3) 中沢, 他：「鉄道車両用パワーエレクトロニクス装置」, 東芝レビュー, Vol.58, No.9(2003), p10~p13
- 4) 坂本, 他：溶接学会マイクロ接合研究委員会・ソルダリング分科会シンポジウム, 「両面放熱パワーモジュールの実装技術」(2009)
- 5) 坂本 等, Mate 2009, No.7, 「両面放熱パワーモジュール用Pbフリーはんだ材料」(2009)
- 6) 則武 等, Mate 2009, No.50, 「両面放熱パワーデバイス用アルミニウム電極の開発」(2009)
- 7) 奥村 等, Mate 2009, No.8, 「両面放熱パワーモジュールの実装構造」(2009)
- 8) 山中, 他：自動車技術会, Vol.63, No.7, 12-13(2009)

<著 者>



平野 尚彦
(ひらの なおひこ)
I C技術3部 技術企画室
自動車向けパワーエレクトロ
ニクス製品の技術開発戦略・
企画に従事



真光 邦明
(まみつ くにあき)
I C技術3部 第3設計室
次期型ハイブリッド自動車向け
パワーカードの開発に従事



奥村 知巳
(おくむら ともみ)
I C技術3部 第3設計室
現在, トヨタ自動車に出向中
パワーカードの開発に従事