

車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術

Packaging Technology of 3rd-Generation Power Module for Automotive Applications

郷原 広道 GOHARA, Hiromichi

玉井 雄大 TAMAI, Yuta

山田 教文 YAMADA, Takafumi

近年、ハイブリッド車や電気自動車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、直接水冷構造用高放熱冷却器、銅端子配線と電極の超音波接合技術および析出強化と固溶強化を組み合わせて複合強化した高寿命の新しいんだなどを開発した。この技術をRC-IGBTチップを適用した車載用第3世代パワーモジュールに適用し、高信頼性とフットプリントの30%削減と薄型化を実現した。

The development and popularization of hybrid and electric vehicles has been accelerating in recent years. These new vehicles demand miniaturized, light-weight and higher-output power module in order to improve fuel efficiency. Fuji Electric has developed high heat dissipating cooling unit for direct water-cooled structures, an ultrasonic bonding technology for electrodes and copper terminal, and new long-life solder that applies both precipitation strengthening and solid-solution strengthening. By applying these technologies, the 3rd-generation power modules for automotive applications that utilize RC-IGBT dies achieve greater reliability, about 30% smaller footprint and thinner structure compared to the previous generation.

1 まえがき

近年、省エネルギーの推進とCO₂排出規制の強化により、自動車業界では電力を動力源としたハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)の開発と普及が加速している。HEVやEVの動力制御に用いるインバータは限られたスペースに搭載され、低燃費を意識した軽量化と効率向上が必要である。また、電池やモータの出力に合わせたパワーモジュールが求められている。

この要求に応えるため、富士電機では、大幅な電力密度の向上を実現するパワーモジュールの技術開発を進めている。車載用アルミニウム直接水冷型パワーモジュールでは、2012年の第1世代、2015年の第2世代と電力密度を世代ごとに20%以上向上する製品を開発してきた⁽¹⁾。さらなる高電力密度化・高出力化に対応するため、第3世代のアルミニウム直接水冷モジュールでは、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とFWD(Free Wheeling Diode)を統合したRC-IGBT(Reverse-Conducting IGBT:逆導通IGBT)チップを採用し、冷却フィンによる高放熱化を実現した。これにより、30%という大幅なフットプリント削減と冷却構造の最適化により薄型化を実現している。

本稿では、車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術、すなわち高放熱冷却器の設計技術、超音波接合の設計技術およびはんだ寿命設計技術について述べる。

2 高放熱冷却器の設計技術

直接水冷構造の設計においては、熱流体解析技術を用いており、冷媒の流れと熱の移動を考慮したシミュレーションを実施している。冷却器の冷却性能が冷媒流速に依存することに着目し、限られた冷媒をどのように流すかをポイ

ントとして設計している。

2.1 設計の高精度化

シミュレーションを用いた熱設計においては、解析精度が設計の精度に直結する。そこで、赤外線カメラを用いた温度分布の実測結果をシミュレーションにフィードバックし、メッシュ条件を最適化することで解析精度を向上させた。この改善効果を反映した最適化モデルによる製品設計の結果、熱抵抗において設計値と実測結果の誤差は10%未満を達成し、シミュレーションを用いた設計を可能としている。

2.2 設計課題と性能改善

直接水冷構造の冷却部には二つの構造がある。一つは、ヒートシンクとウォータージャケットが分離している開放型構造、もう一つは、これらが一体化した密閉型構造である⁽¹⁾⁽²⁾。図1に、チップ温度特性を評価するためのシミュレーションモデルを示す。

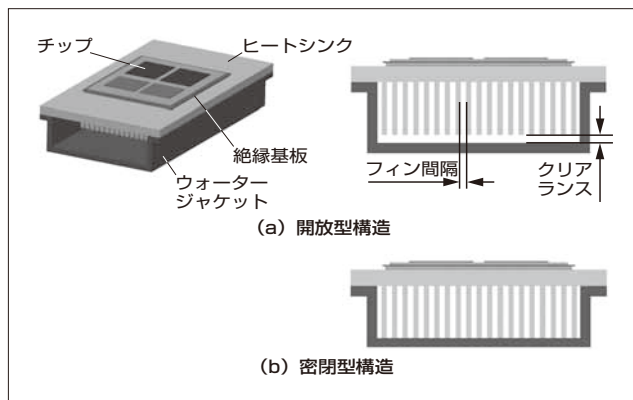


図1 シミュレーションモデル

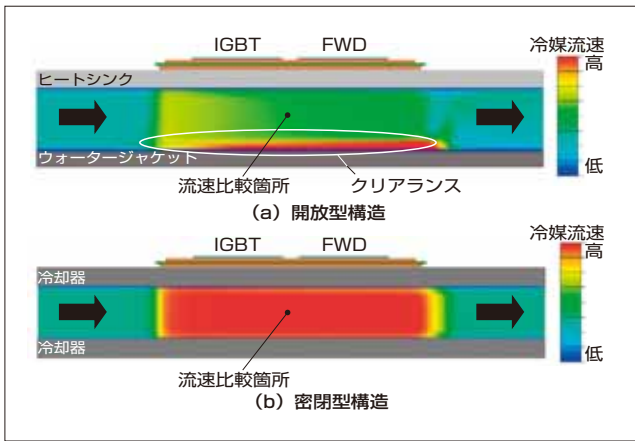


図2 断面流速分布

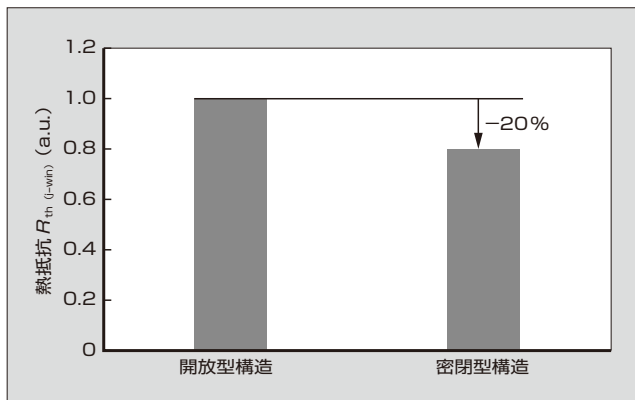


図3 熱抵抗

開放型構造は、Oリングやガスケットでヒートシンクとウォータージャケットを密閉する。そのため、おのおの設計公差や熱変形を考慮してフィン先端とウォータージャケットとの間にクリアランスを設ける必要がある。このクリアランスにより冷媒が流れる流路断面積が広がり、フィンとフィンの間隔よりもクリアランスが大きくなると、フィン間の通水抵抗は相対的に増加することからフィン間流速が低下し、冷却性能は低下する。一方、密閉型構造は、ヒートシンクとウォータージャケットが一体になっているので、開放型構造のようなクリアランスがない。

図2にシミュレーションで得られた断面流速分布を示す。開放型構造では、クリアランスに冷媒が流出するのに対し、密閉型構造ではクリアランスがないので流速分布がほぼ均一となり、流速は約2倍まで上昇する。図3に開放型構造と密閉型構造における熱抵抗の比較を示す。密閉型構造は、ヒートシンクの薄化による効果と併せ、開放型構造に比べて熱抵抗が20%低減する⁽³⁾。

3 超音波接合の設計技術

車載用パワーモジュールの電流密度の上昇に伴い、パワーモジュール内部における配線容量の増大と配線エリアの省スペース化が求められている。

図4に、従来のアルミニウムワイヤ配線構造、銅ワイ

配線技術	アルミニウムワイヤボンディング	銅ワイヤボンディング	銅端子超音波接合
断面構造			
外観			
通電容量	△ (1.0)	○ (1.7)	◎ (3.5)

図4 配線構造

ヤ配線構造、銅端子配線構造の比較を示す。端子ケース内に成型された銅端子と絶縁基板上の銅パターンは、配線で接続される。主電流をつかさどるこの配線に超音波接合を適用した銅端子配線は、通電容量が従来のアルミニウムワイヤ配線に対して約3.5倍となり、実装面積の削減につながった。

3.1 パワーモジュールにおける端子の超音波接合

図5に超音波接合の概要を示す。超音波接合は、超音波振動と圧力によって接合面の表面酸化膜を破り、金属同士が接触・拡散する固相拡散接合であり、溶融点以下の温度で母材同士を接合することができる。この超音波接合によって、絶縁基板回路の銅回路パターンに銅端子を接合材料を介さずに直接接合し、電流経路を形成する。

超音波接合部の金属組織について、銅端子、接合部、銅回路パターンの断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した (図6)。超音波接合部は、加工硬化により銅端子よりも微細な組織 (結晶粒径) になっている。強度は結晶サイズに依存し、微細なほど高い強度が得られる傾向があり、結晶サイズの違いが寿命予測精度を低下させる恐れがある。そこで、超音波接合部の結晶粒が微細であることを考慮し、実機により近い端子形状のテストピースを用いて銅端子の金属固相拡散接合部の寿命予測技術を確立した。

3.2 疲労試験と寿命予測の検討

超音波接合部を評価するための銅端子部寿命評価モデル (図7) を作製し、負荷を繰り返し与える疲労試験を行った。まず、適用製品の変形をフルモデル解析で求め、銅端子部

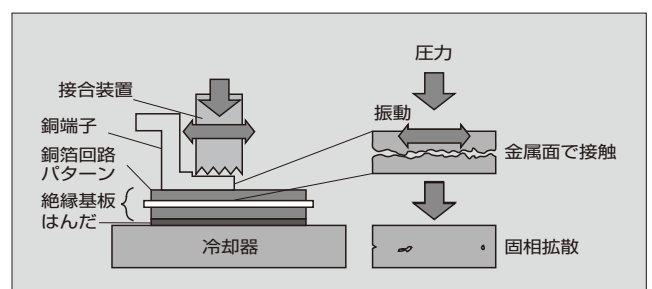


図5 超音波接合の概要

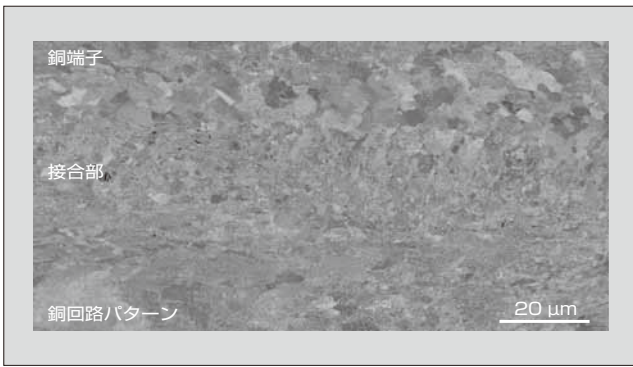


図6 超音波接合部の断面 SEM 像

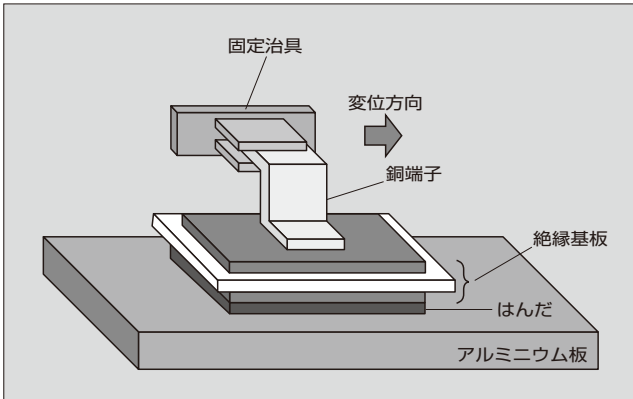


図7 銅端子部寿命評価モデル

に発生する負荷方向を確認した。この負荷方向に一致する強制変位を条件として、要素モデルによる応力シミュレーションと実機による疲労試験を行った。

応力シミュレーションの結果から、銅端子の接合界面に局所的な応力が発生することを確認した。また、端子部の疲労試験の結果から、発生する応力によって接合界面に沿ってクラックが進展し、接合界面で破断することを確認した。シミュレーションと疲労試験の結果において破壊の起点が一致することから、これらの結果を基に寿命予測方法を検討した。

応力解析から算出した全ひずみを縦軸に、端子が破断した際の繰返し試験回数を横軸にとり、銅端子と銅材試験片の疲労寿命曲線を得た(図8)。銅材試験片は、一般的な銅材(C1100, 1/2H)をダンベルの形状に加工したものである。寿命予測にはこの疲労寿命曲線を使用することが一般的であるが、超音波接合を行った銅端子と銅材試験片では、疲労寿命曲線の傾きが一致していないため使用できない。傾きが一致しないのは接合部の結晶粒サイズが異なることに起因すると考えられる⁽⁴⁾。そこで、実製品について疲労試験を行い、要素モデルの寿命疲労曲線の妥当性を検証した。

実製品における寿命評価結果を疲労寿命曲線と照らし合わせた結果、超音波接合を行った銅端子の疲労寿命曲線上に、実製品の寿命評価結果が一致することが分かった。端子部寿命評価モデルを用いた場合に接合界面で破断する破壊モードが再現し、試験結果と合うことから寿命推定が可

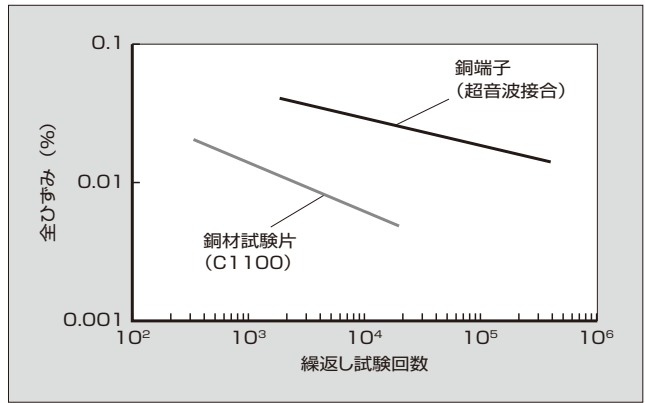


図8 銅材試験片と銅端子の疲労寿命曲線

能であることを確認した。

4 はんだ寿命設計技術

動作保証温度を拡大することで、モジュールは高電力密度化に対応することができる。一方、モジュールは動作温度範囲の拡大によりモジュールの最も故障しやすい箇所である絶縁基板の下のはんだの寿命も低下する。従来のはんだは、熱時効^(注)による物性変化が強度を低下させ、寿命が低下する。また、この熱時効の影響を受けるはんだは、コフィンマンソン則による寿命設計だけでは精度が得られず、設計が複雑になる。これらに対応するため、高温下における強度低下を抑制する新はんだを開発した。

図9に構成を示すテストピースを用いて、従来のはんだと新はんだの比較評価を行った。評価結果として、図10にクラック進展速度を、図11に温度サイクル試験前後のはんだ組織のSEM像を、図12に175℃で1,000時間加熱した後の引張強度を示す。

(1) 従来のはんだ

従来のはんだ(Sn-Ag系はんだ)は、温度サイクルにおける温度変化量 ΔT の増大に伴ってクラック進展速度が

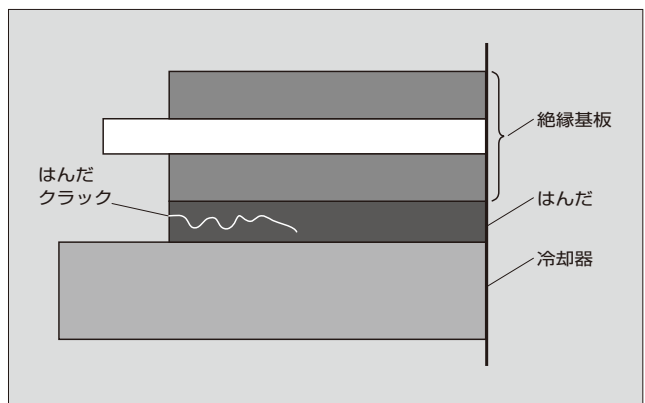


図9 テストピースの構成

〈注〉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。

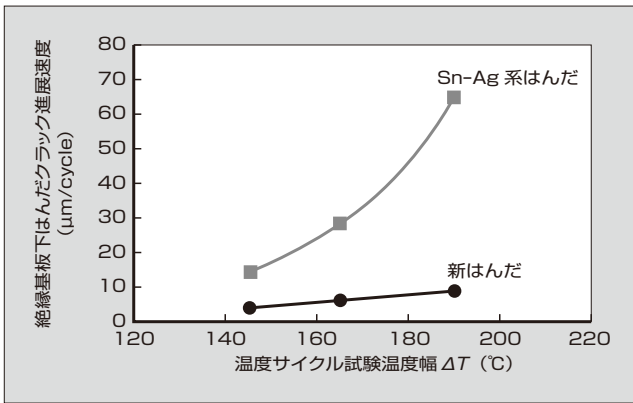


図10 はんだのクラック進展速度

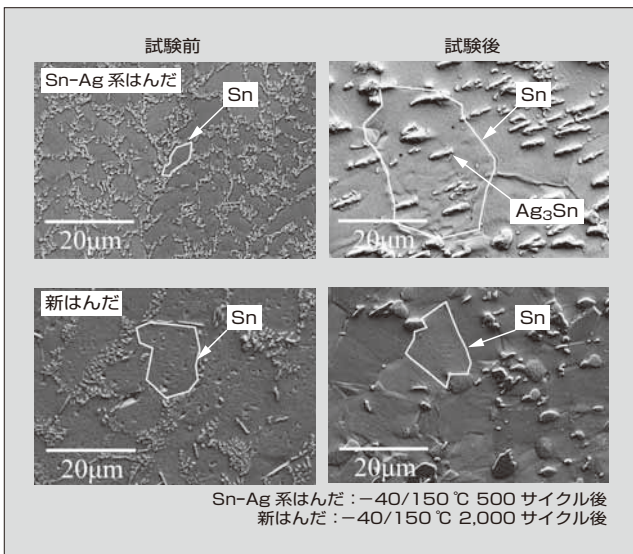


図11 はんだ組織のSEM像

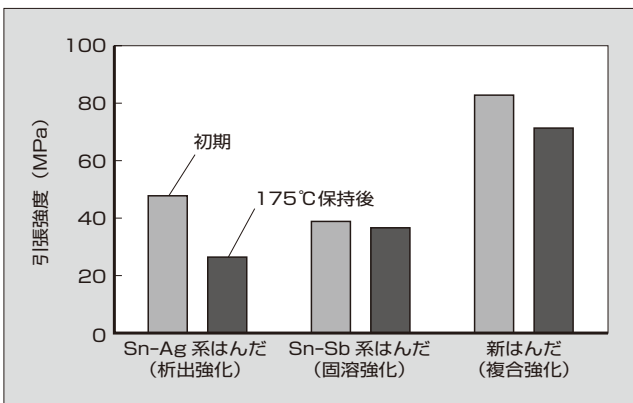


図12 はんだの引張強度

加速度的に増加する(図10)。はんだ組織のSEM像を観察すると、試験前は、Snマトリクスの粒界に金属間化合物が析出してネットワークを形成している(図11)。試験後は、この金属間化合物のネットワークが消失し、Ag₃Sn相が析出しSnマトリクスが粗大化している。温度サイクルによって、はんだ組織が熱劣化し強度低下を起すため、ΔTの上昇に伴ってクラック進展速度が大きくなっていくと考えられる⁽⁵⁾。

(2) 新はんだ

Sn-Ag系はんだがΔTの上昇に伴ってSnマトリクスが粗大化するのに対して、Sn-Sb系はんだはSbが固溶することでSnマトリクスの粗大化が抑制される⁽⁶⁾。この固溶強化に加え、従来の析出強化を組み合わせた新はんだは、高温にさらされた場合でもSn-Ag系はんだに比べて強度の低下が小さく、高い強度を維持していることが特徴である(図12)。

新はんだのクラック進展速度は、ΔTの上昇に対して変化は小さく、加速度的でなくほぼ線形に増加する。このため、コフィンマンソン則を使った寿命予測技術がそのまま適用でき、予測精度の向上と信頼性の向上を両立することができる。また、新はんだは、ΔTが190℃に上昇した場合においてもSn-Ag系はんだの1/5以下であり、さらなる高温化が可能になる(図10)。

5 あとがき

車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術について述べた。原理に基づく評価に加え、実機とシミュレーションの整合性を高めることで高精度な設計技術を構築した。この設計技術を駆使し、要素技術の向上、製品開発期間の短縮を進めていく所存である。

参考文献

- 郷原広道ほか. ハイブリッド車用インテリジェントパワーモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- 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.
- Nishimura, Y. et al. "Power Module Technology for automotive power-electronics" Proceedings of APE 2015, April 14-15, Paris.
- 玉井雄大ほか. "IGBTモジュール用の端子超音波接合技術の開発" 第29回エレクトロニクス実装学会春季大会, サーマルマネジメント&パワーエレクトロニクス実装(4), 18B3-3, p.492-494.
- Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", Proceedings of PCIM Europe 2015, May 19-21, Nuremberg, p.772-778.
- 玉井雄大ほか. "高強度はんだ材料の車載用直接冷却パワーモジュールへの適用" 第25回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 秋季大会, MES2015, [2A1] パワエレ-2, No.1.



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開発部。日本機械学会会員。



山田 教文

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。エレクトロニクス実装学会会員。



玉井 雄大

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。エレクトロニクス実装学会会員。

特集
エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体





*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。