特集論文

超音波接合を用いた電鉄用パワーモジュールの端子接合技術

吉原邦裕*
米田　裕**
茂永　隆*

Terminal Junction Technology Development of the Power Module for Electric Railroads using Ultrasonic Junction

Kunihiro Yoshihara, Yutaka Yoneda, Takashi Shigenaga

要　旨

電鉄分野で用いられている三菱電機のパワーモジュールでは，製品の製造プロセス上，ベース板と絶縁基板をはんだ接合し，そのはんだが溶融しない温度で絶縁基板のパターンと端子を接合する必要がある。現行製品では，融点の異なる2種類の鉛入りはんだを用いることでこの問題を解決してきた。しかし，近年は環境保護の観点からパワーモジュールでも鉛フリー化が進められており，鉛フリーはんだで融点に差をつけることは難しい。そのため，電鉄用パワーモジュールの鉛フリー化には，はんだ接合に替わる端子接合技術の開発が必要である。

そこで，電鉄用パワーモジュールの端子接合として超音波接合技術の適用を検討した。端子接合部に生じる負荷としては，パワーモジュールが動作時に発熱，冷却を繰り返すことによって生じる，接合部の線膨張係数差による繰返し温度負荷と製品全体が変形することによる端子への繰返し変位が考えられる。今回は超音波接合が電鉄用パワーモジュールに適用できるか確認するため，銅端子と絶縁基板の銅パターンを超音波接合し，繰返し温度負荷及び繰返し変位に対する接合部の耐久性を評価した。超音波接合による接合部は，線膨張係数差が少ない同種金属の直接接合であるため，熱応力が低く，繰返し温度負荷に対する耐久性の向上が期待できる。

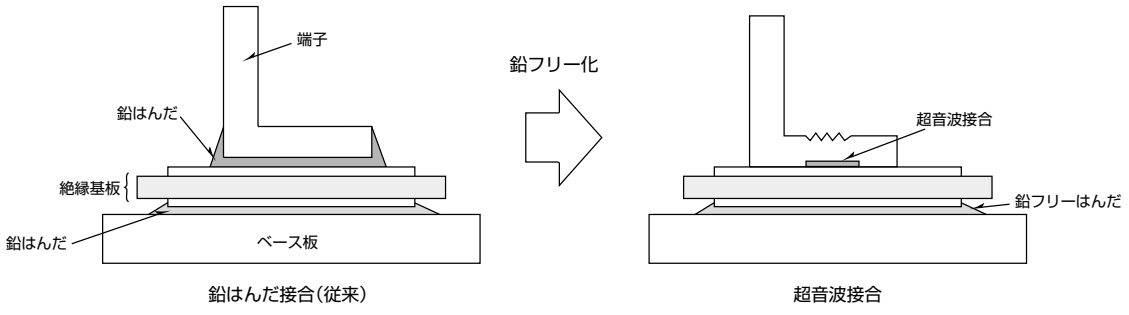
その結果，次の結論を得た。

(1)　電鉄用パワーモジュールに適用できる超音波端子接合技術を確立した。

(2)　繰返し温度負荷によって接合部の強度は低下しないことを確認した。

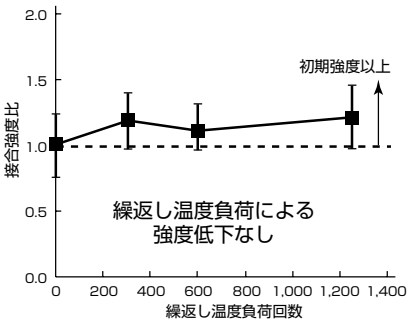
(3)　接合部の疲労強度特性を定量化し，要求される端子接合部の寿命に対して，接合部へ作用する繰返し変位の許容量を明確にした。

これによって今後，鉛フリー化に対応する電鉄用パワーモジュールで超音波端子接合が有効であることを確認できた。

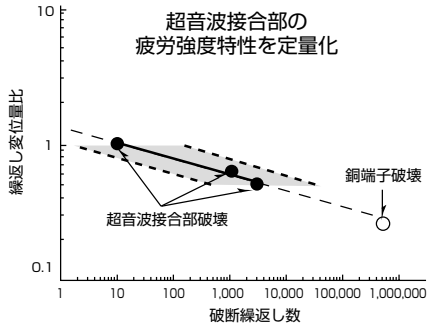


鉛はんだ接合（従来）　　超音波接合

端子接合部の鉛フリー化



繰返し温度負荷に対する耐久性評価結果



繰返し変位に対する耐久性評価結果

超音波接合部の耐久性評価結果

電鉄用パワーモジュールの鉛フリー化のため，銅端子と銅パターンの超音波接合試験片を作製し，繰返し温度負荷及び繰返し変位に対する超音波接合部の耐久性を評価した。繰返し温度負荷に対する超音波接合部の耐久性は高く，ヒートサイクル（−40～125℃最大1,250サイクル）後でも超音波接合部の強度は低下しない。また，定量化した超音波接合部の疲労強度特性によって，構造設計が可能になった。

*パワーデバイス製作所　**生産技術センター

1. まえがき

近年は環境保護の観点からパワーモジュール分野でも鉛フリー化が進められている。電鉄分野で用いられている当社のパワーモジュールでは，製品の製造プロセス上，ベース板と絶縁基板をはんだ接合し，はんだが溶融しない温度で絶縁基板のパターンと端子を接合する必要がある。現行製品では，融点の異なる2種類の鉛入りはんだを用いることでこの問題を解決してきたが，鉛フリーはんだで融点に差をつけることは難しい。そのため，電鉄用パワーモジュールの鉛フリー化には，はんだ接合に変わる端子接合技術の開発が必要である。

そこで，電鉄用パワーモジュールの端子接合の超音波接合技術の適用を検討した。超音波接合部は，線膨張係数差が少ない同種金属の直接接合であるため，発熱，冷却を繰り返すパワーモジュールの動作時に作用する熱応力が低い[(1)]。そのため，繰返し温度負荷に対する耐久性の向上が期待できるが[(2)]，一方で，繰返し変位に対する耐久性が不明であるため，超音波接合部の疲労強度特性を定量化して，製品全体が変形することで生じる端子への繰返し変位の許容値を定量化する必要がある。

本稿では，銅端子と銅パターンを超音波接合した試験片を作製して強度試験を行い，接合条件が接合部の静的強度及び接合面積に及ぼす影響を検討した。また，繰返し温度負荷（－40～125℃）前後で静的強度試験を実施し，繰返し温度変化に対する超音波接合部の耐久性を評価した。さらに，繰返し変位を作用させた機械的疲労試験を実施して超音波接合部の疲労強度特性を定量化した。

2. 試験方法

2.1 試験片作製条件と試験片形状

端子の超音波接合の構造を**図1**に示す。銅端子は，厚み1.5mm，幅4mmのL字型形状とし，銅パターンの厚みは0.25mmとした。端子の材料は，無酸素銅(C1020，1/2H材)を用いた。接合ツールに接合荷重を加えて上面から銅端子を銅パターンに押し付けた状態で，接合ツールを超音波振動させ，端子と銅パターンを超音波接合した。超音波振動時間を0.3，0.5，1.5sとして他の条件は一定とし接合に与える超音波振動時間の影響を確認した。これらの試験片は，室温環境下で作製した。

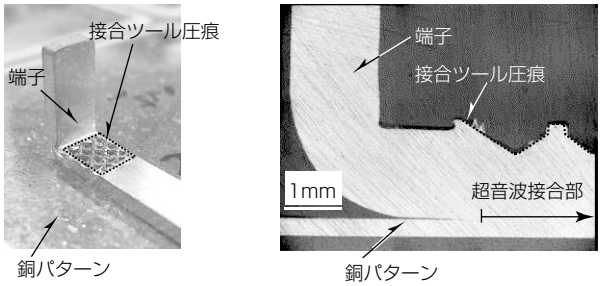
試験片の外観及び断面を**図2**に示す。接合ツールを押し付けた位置の端子表面には超音波接合時の負荷によって圧痕が残っており，圧痕の下近傍では端子とパターンの間に隙間がなく超音波接合されていることが分かる。

2.2 強度試験方法

静的強度試験は，引張試験機（容量10kN，AGS-J，島津製作所）を用い，室温環境下で実施した。荷重負荷方向は，**図3**に示す接合面に対して引張方向の負荷とせん断方向の負荷とした。

引張方向の負荷を作用させた強度試験方法を**図3**(a)に示す。静的強度試験は，引張速度5mm/minで実施し，超音波接合時間が接合強度に及ぼす影響を評価した。繰返し疲労試験は，繰返し速度を1Hzとし，引張方向に繰返し変位を作用させて実施した。

せん断方向の負荷を作用させた静的強度試験方法を**図3**(b)に示す。引張速度は5mm/minとした。繰返しの温度変化（ヒートサイクル試験条件，－40～125℃）を繰返し作用させた前後で強度試験を実施し，静的強度を比較した。



(a) 試験片外観　(b) 接合部の断面観察結果

図2．試験片外観

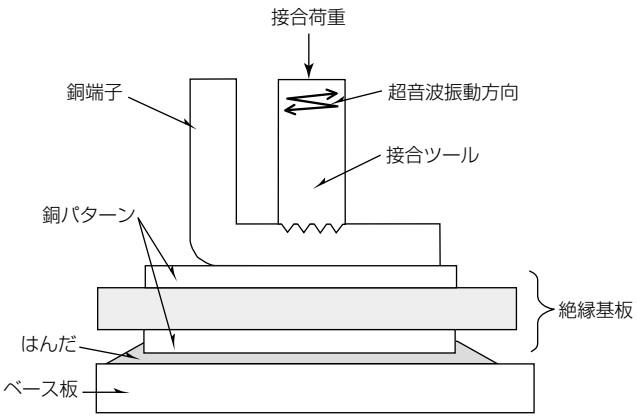
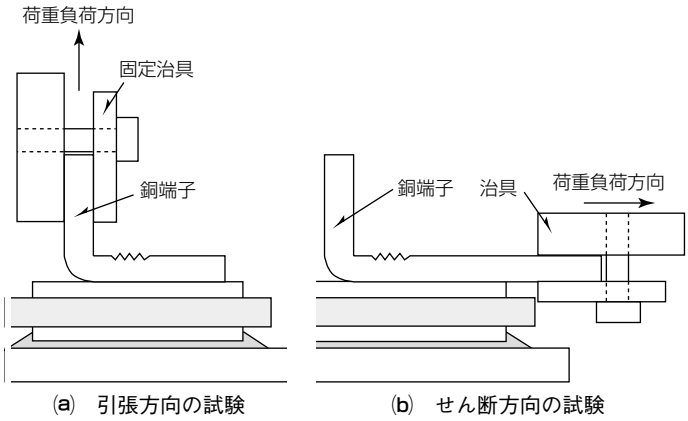


図1．端子の超音波接合の構造



(a) 引張方向の試験　(b) せん断方向の試験

図3．静的強度試験模式図

3. 試験結果

3.1 接合面積の評価結果

図4に超音波振動時間と接合面積の関係を示す。接合面積は，試験片の接合面を超音波探傷装置によって観察し，画像解析によって導出した。超音波振動時間が長いと接合面積が大きく，超音波接合時間が1.5sまでは接合面積は増加傾向にあることがわかった。また，同じ接合条件でも得られる接合面積にばらつきが見られる。これは接合ツールの押し付けの状態や接合面の銅パターンや銅端子の表面状態の違いによって，超音波接合時の接合面の条件が影響していると推定される。なお，接合面積は，接合時間1.5sの面積の平均値で正規化して示している。

3.2 静的強度試験結果

接合面に対して引張方向の負荷を作用させて静的強度試験を実施した結果，すべての試験片で接合面の端部を起点に破壊した。**図5**に接合強度と超音波振動時間の関係を示す。接合強度は，破断荷重を接合面積で除した値とした。超音波振動時間が長いと接合強度が高い傾向がある。なお，縦軸は，超音波振動時間1.5sの接合強度の平均値で正規化して示した。

超音波接合時間が長いと，接合面積が大きく，接合強度も高いことから，超音波接合状態が良好であると考えられる。

3.3 繰返しの温度負荷に対する耐久性評価結果

パワーモジュールが繰返し温度変化した際に生じる熱応力に対する超音波接合部の耐久性を評価するために，ヒートサイクル試験前後における，接合面積と接合強度の比較を行った。試験片は，超音波振動時間1.5sで作製し，銅パターンの厚みは0.3mmとした。ヒートサイクル負荷の温度範囲は－40～125℃とし，300，600，1,250サイクル作用させた後に静的強度試験を実施した。荷重負荷方向は，ヒートサイクル負荷によって接合面にクラックなどのダメージが生じて接合面積が変化した場合でも，接合面に作用する応力が変化しないように，せん断方向の負荷とした。

図6にヒートサイクル試験前後の接合強度を比較した結果を示す。縦軸は，ヒートサイクル前の接合強度の平均値で正規化して示した。ヒートサイクル後の接合強度は，ヒートサイクル試験前の接合強度と比較して低下していない。また，ヒートサイクル試験前後で接合面積は変化しておらず，クラックの進行もなかった。これらの結果から，ヒートサイクル負荷による熱応力が超音波接合部の強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.4 疲労強度試験結果

パワーモジュールが繰り返し温度変化すると，パッケージ全体に熱変形による反りが生じ，端子と絶縁基板を接続する超音波接合部に繰返しの変位が作用して疲労破壊する可能性がある。そこで，パワーモジュールの熱変形によって生じる負荷を想定して，繰返し変位を作用させた疲労試験を実施し，超音波接合部の耐久性を評価した。繰返し変

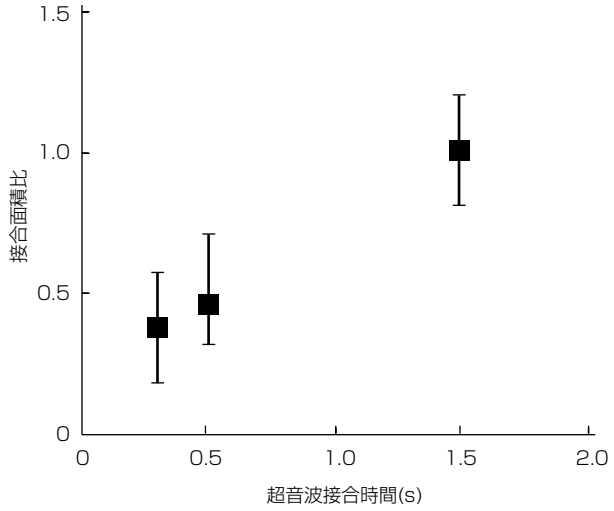


図4．接合面積と超音波接合時間の関係

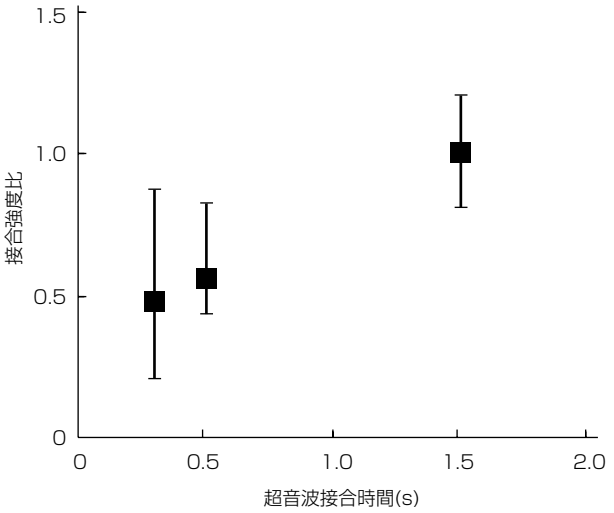


図5．接合強度と超音波接合時間の関係

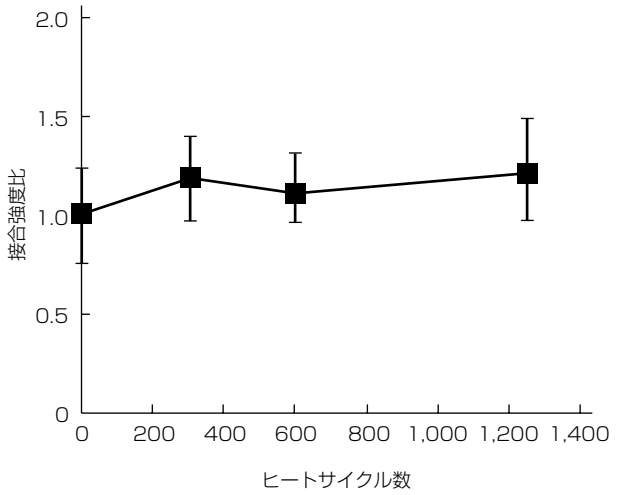


図6．接合強度とヒートサイクル数の関係

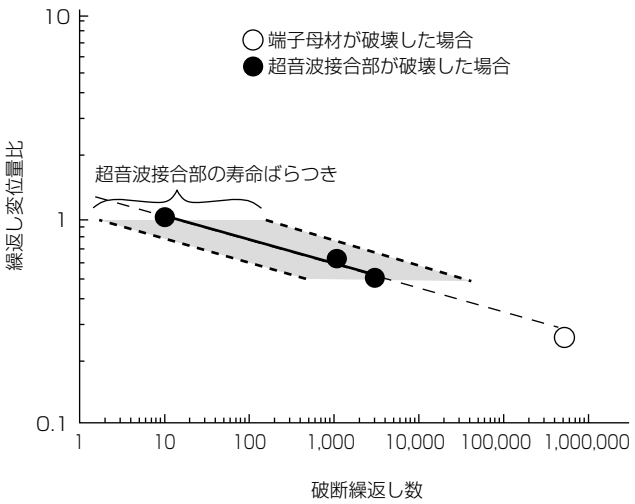


図7．超音波接合部の疲労試験結果

位方向は引張方向とし，繰返し変位量は4水準とした。破断回数は，銅端子と銅パターンが完全に離れた回数とした。

図7に繰返し変位量と破断繰返し数の関係を示す。各水準の寿命平均値(対数正規分布の50%値)に対して近似線を引いた。縦軸は繰返し変位量が最も大きい試験条件の値で正規化して示している。静的強度試験と同様に，接合面端部を起点とした破壊が支配的であったが，繰返し変位量が小さい場合では，銅端子母材が破壊し，銅端子よりも超音波接合部の強度が高かった。

この試験で定量化した超音波接合部の疲労強度特性によって，要求される端子接合部の寿命に対して，接合部へ作用する繰返し変位の許容量を明確にした。しかし，超音波接合部の疲労特性の傾きは小さく，端子に作用する繰返し変位量が増大すると，接合部の寿命が急激に低下する可能性があるため，端子に作用する繰返し変位が十分小さくなるように端子の構造設計を行う必要がある。

4. む す び

銅端子と銅パターンを超音波接合し，繰返し温度負荷，及び繰返し変位に対する超音波接合部の耐久性を評価した。その結果，以下の結論を得た。

(1) 超音波端子接合が電鉄用パワーモジュールに適用できる目処(めど)を得た。

(2) 繰返し温度負荷(－40～125℃，1,250サイクル)によって超音波接合部の強度は低下しないことを確認した。

(3) 接合部の疲労強度特性を定量化し，要求される端子接合部の寿命に対して，接合部へ作用する繰返し変位の許容量を明確にした。

これによって今後，鉛フリー化に対応する電鉄用パワーモジュールで超音波端子接合が有効であることを確認できた。

今後，SiC(Silicon Carbide)を使用したパワーモジュールでは，電鉄分野の大電力用パワーモジュールよりも高い温度での動作が考えられており，高温に対応できるパッケージの検討が必要である。今回検討した超音波を用いた接合は，繰返し温度負荷に対する耐久性が高く，SiCを使用したパワーモジュールにも適用可能であると考えられるため，SiCパッケージでの検討も進めていく。

参 考 文 献

(1) 加柴良裕：パワーデバイス・モジュールの実装技術，溶接学会誌，**80**，No.4，285～288（2011）

(2) 後藤友彰，ほか：実用化に至った革新的な実装技術：IGBTモジュール用超音波接合技術，溶接学会誌，**80**，No.4，289～293（2011）