

パワーサイクル試験におけるはんだ疲労破壊の考察

大橋 東洋

Consideration of Fatigue Fracture for Die Attach Solder by Power Cycling Test

Touyou OHASHI

Abstract

In power cycling test, current is passed through IGBT chip to generate heat, and reliability is evaluated by simulating the control of actual power module. We carried out power cycling test using test pieces with two different types of insulating substrates. Differences in power cycling life and die attach solder fatigue failure were observed between the two test pieces. The cause of the differences was considered from the viewpoint of changes in the solder microstructure using electron microscopy.

キーワード：パワーサイクル試験，絶縁基板，Sn-Cu-Ni 系はんだ，金属間化合物，再結晶

1. はじめに

近年，省エネルギー対策のため，電力の高効率使用を目指して，自動車，産業機器，太陽光・風力発電の分野でパワーモジュールの普及が進んでいる。パワーモジュールは IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) チップ，絶縁基板，ベースプレート，冷却器等から構成されており，IGBT チップのスイッチング動作により電力変換を行う機器である。IGBT チップからの発熱により熱分布が生じる上，線膨張係数が異なる部品から構成されるため，各部品の接合界面で熱応力が発生し，剥離や疲労破壊に至るなど信頼性の低下が懸念される。

パワーサイクル試験とはこのような信頼性の評価に用いる試験である。IGBT チップへの通電の ON/OFF 動作を繰り返しながら，各部品の接合界面の熱応力に対する耐久性を評価する試験であるが，主に熱源に近いチップ下のはんだ接合部で劣化が進むことが知られている。一方，はんだ材としては過去には Pb 系はんだが使用されていたが，今後 RoHS 規制の見直しが行われ使用できなくなる可能性もあるため，現在は Sn 系はんだが多く用いられるようになった。このため Sn 系はんだにおけるパワーサイクル寿命に関して比較的多くの研究がなされている¹⁻⁴⁾。

Sn は金属の中でも比較的低融点で再結晶温度も低い。そのためパワーサイクル試験中に組織変化が生じやすく，粒内および粒界に欠陥も生成されやすい。そこで Sn に添加元素を適切に導入することで組織を強化し耐久性を向上させることが図られている。加えてはんだ組織は使用する絶縁基板の種類によっても異なることが予想され

る。それはリフロー中に絶縁基板から金属元素が溶出しはんだ内に混入するためであり，仮にはんだ材が同一であっても，全く異なる組織が形成されることも起こりうる。

本研究では，はんだ材を同一として絶縁基板の種類を変えたときのパワーサイクル寿命の差について，特にはんだの組織変化に着目して考察した。

2. 試験方法

パワーサイクル試験を実施するにあたって，まずはテストピースを作成した。テストピースの模式図を図 1 に示す。絶縁基板とベースプレートをろう接し，絶縁基板上に Si の IGBT チップをはんだ付けして，ベースプレートと水冷ヒートシンクをグリスで接合した。また，テストピースに対して端子台を用意して IGBT チップと端子台の間を Al ワイヤで結線した。

はんだ付けのリフロー条件は，窒素雰囲気下で 300℃ まで昇温し保持時間を約 5 min. とした。はんだは Sn-Cu-Ni 系はんだを使用し，絶縁基板は回路層の最表面が Cu

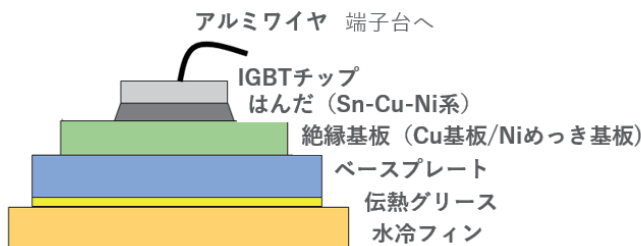


図 1 テストピースの模式図
Schematic diagram of test piece

とCuの上に電解Niめっき処理（厚さ約5 μm ）を行ったものの2種類を用意した。以下、それぞれをCu基板及びNiめっき基板と略称する。

パワーサイクル試験時に通電負荷を加えるにあたって、チップ温度の上限温度と下限温度の差が80 $^{\circ}\text{C}$ で一定になるように電流・電圧を調整した。チップに通電後、発熱してチップ温度が上限温度に達したときに通電を切り、冷却されて下限温度に達したときに再び通電することを繰り返すようにゲート電圧と連動させてOn/Offを制御した。チップ温度変化の模式図を図2に示す。

3. 結果と考察

前記の絶縁基板が異なる2種類のテストピースに対してパワーサイクル試験を実施し、耐久性を評価するとともに、サンプルの観察・分析を行いパワーサイクル寿命の差の要因を考察した。

3.1 熱抵抗測定結果

パワーサイクル試験によって素子周辺部の破壊が進行すると素子からの放熱性が悪化し熱抵抗が上昇する。本試験では数万サイクルに一度熱抵抗を測定することで破壊の進行度を評価した。熱抵抗測定はチップへの通電加熱前後における順方向の電圧差から温度上昇値を見積もる ΔV_f 法に準じて行った。

ΔV_f 法に準じて測定した熱抵抗測定結果を図3に示す。サイクル毎に初期値に対する熱抵抗上昇率をプロットした。Cu基板もNiめっき基板の場合も共にサイクルが進むにつれて熱抵抗が上昇しているが、Cu基板の方が上昇

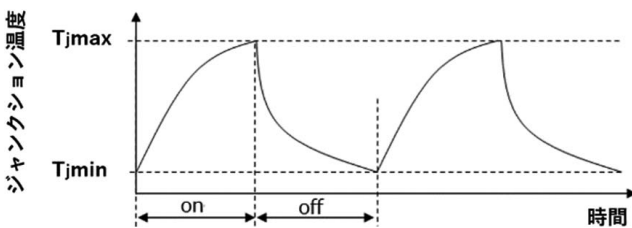


図2 チップの温度変化の模式図

Schematic diagram of chip temperature change

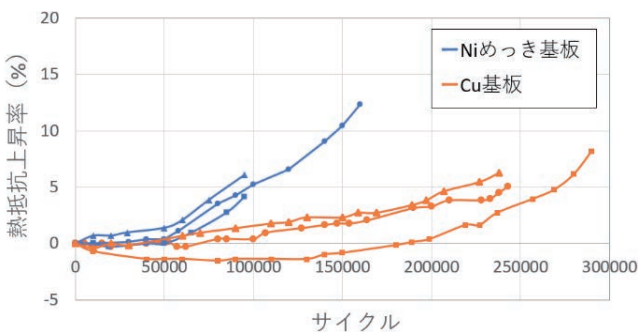


図3 サイクル毎の熱抵抗上昇率

Thermal resistance increase rate per cycle

の割合が緩やかでパワーサイクル寿命も長いことが示唆される。

次にこの差がはんだの破壊状況の違いによるものと仮定し、ほぼ同一サイクル経過後の平面視及び断面観察を行った（図4）。透過X線像の結果から、Cu基板に比べてNiめっき基板では主に素子中心部付近にはんだの空隙が多く確認された。また断面写真を確認すると、Niめっき基板の場合は140000サイクル後に大きな空隙が見られたが、Cu基板の場合は150000サイクル後においても目立った欠陥は見られなかった。

3.2 はんだの破壊要因に対する考察

図4の結果から熱抵抗上昇率の差がはんだの破壊状況の違いによるものと示唆されたが、次にこの破壊の起点について考察した。この場合、絶縁基板との界面付近を起点にして進行する場合とはんだ内部からの破壊が進行する場合の両方が想定される。この2つの可能性を仮定し、はんだ組織の変化や破壊状況を観察・分析した。

はんだの断面観察はSEM（Scanning Electron Microscope）を用いて行い、はんだ内の析出物や絶縁基板界面に生成される金属間化合物の組成はEPMA（Electron Probe Micro Analyzer）を用いて分析した。さらにはんだの結晶粒や結晶方位はEBSD（Electron Probe Micro Analyzer）を用いて分析した。

3.2.1 絶縁基板との界面に形成される金属間化合物

リフロー中に絶縁基板表面の金属とはんだの成分が反応し金属間化合物が生成されるが、今回は上記2種類のテストピースに対し、形成される金属間化合物を特定した上で耐久性の違いについて考察した。

EPMAによる絶縁基板界面付近における元素分析結果を図5に示す。Cu基板、Niめっき基板ともに厚さ数 μm 程度のSn、Cu、Niを含んだ金属間化合物層が確認された。さらに界面近傍に対し点分析による定量解析を行ったところ、Cu基板の場合は主に $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 、Niめっき基板の場合は Ni_3Sn_4 が形成されることが確認された。

過去の研究において、 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ は Cu_6Sn_5 のCuサイ

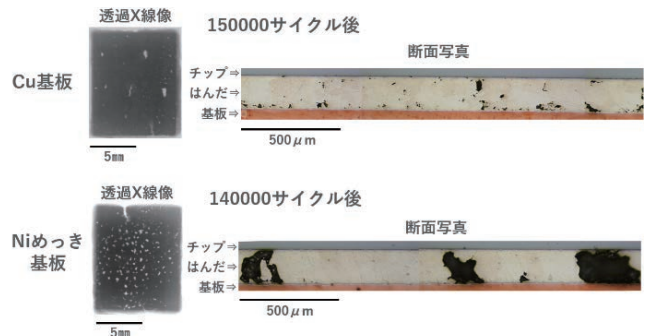


図4 サイクル経過後の透過X線像及び断面写真

Transmission X-ray images and cross-sectional images after cycles

トの一部がNiに置換することにより、高温相である六方晶が低温でも安定化し熱変化に対して堅牢な構造になることが論及されている⁵⁾。一方 Ni_3Sn_4 は低延性で冷熱サイクル試験等の疲労試験においてクラック発生の起点となり得ることが示唆されている⁶⁾。パワーサイクル試験中に金属間化合物を起点にはんだ内にクラックが進展し破壊に至ることも想定され、これら金属間化合物の違い

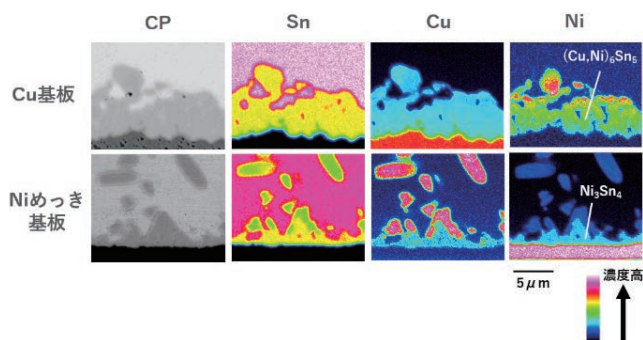


図5 はんだと絶縁基板の界面付近の元素分析結果
Elemental analysis results near the interface between the solder and the substrate

が耐久性の差異の要因となっている可能性は十分に考えられる。

3.2.2 はんだ内部の組織変化

はんだ破壊のメカニズムを解明するには破壊状況を段階的にとらえることが重要と考え、初期から経過サイクル毎のサンプルを観察・分析した。EBSD によるはんだ断面の IPF (Inverse Pole Figure) マップを図6に示す。

Cu基板の場合、初期において基板との界面付近で細粒化しているが、40000 サイクル後には既に再結晶が進んでおり、その後270000 サイクルまで結晶粒径はほとんど変化していない。また形状も等軸で安定していることが確認できる。一方、Ni基板の場合、初期においては柱状の組織が見られたが、Cu基板の場合と同様に40000 サイクル後には既に再結晶が進んでいる。しかしながらその後140000 サイクル前後で異常粒成長が起きている。

この差異の原因を明らかにするため、再結晶完了後、はんだ破壊が進行していない40000 サイクル後の組織に着目した。図7に40000 サイクル後のSEMの断面観察結果 (BEI) 及びEBSDによる粒界傾角分布を示す。Cu基板の場合、はんだ内に析出物が多く見られた。粒界傾

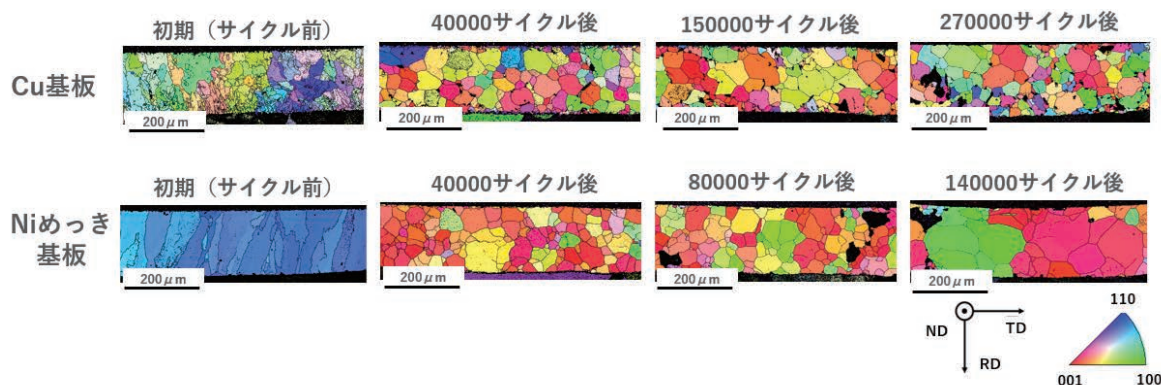


図6 サイクル経過後のはんだ断面の IPF マップ
IPF maps of solder cross section after cycles

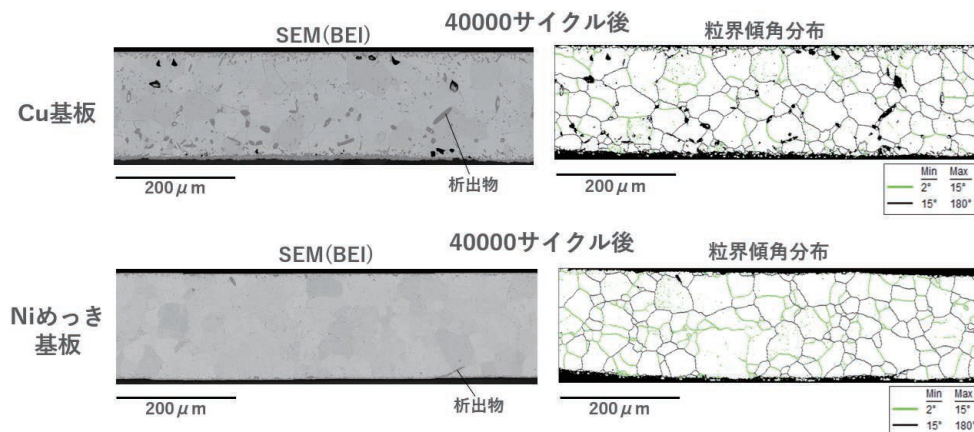


図7 40000 サイクル後のSEMの断面観察結果及びEBSDによる粒界傾角分布
Cross-sectional SEM images and grain boundary misorientation distribution obtained from EBSD after 40000 cycles

角が15°以上の大傾角粒界が多く、析出物は粒界の3重点付近に多く見られた。一方、Ni基板の場合、析出物は少なく、大傾角粒界のほかに粒成長の前駆現象とも観察される粒界傾角が2~15°の小傾角粒界も多く見られた。

これらの結果を踏まえ、パワーサイクル耐久性の違いについて次のように推察した。まずCu基板の場合、リフロー時にCuが溶出しはんだ内に多くの析出物が導入され、サイクル試験中に再結晶が起こり等軸状の結晶が生成される。その後サイクルが継続されても析出物によるピン止め効果が作用し、粒界移動も小規模に留まっており、熱や応力に対して比較的堅牢な組織が維持される。一方Niめっき基板の場合はリフロー後に導入される析出物が少なく、異常粒成長を誘発しやすく、粒界等を起点に大規模な破壊をつなげる可能性が考えられる。

4. まとめ

パワーモジュールの実稼働を想定した耐久性試験としてパワーサイクル試験を実施した。テストピースを作成するにあたって、絶縁基板としてはCu基板とNiめっき基板の2種類を用意し、IGBTチップと絶縁基板はSn-Cu-Ni系はんだを用いて接合した。

チップへの間欠通電によりサイクル負荷をかけ、熱抵抗の上昇率を評価したところ、Niめっき基板はCu基板に比べて熱抵抗が早期に上昇しはんだの疲労破壊も確認された。この差異の要因としては、界面付近に形成される金属間化合物の種類が異なることと、はんだ内の析出物量の差異が引き起こす粒成長の進行度の違いが考えられる。

本研究で得られた知見を基に、さらに信頼性の高い基板を目指して開発を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) 両角 朗, 山田克己, 宮坂忠志, 富士時報, **74**(2), 145-148 (2001).
- 2) 宮崎高彰, 池田 靖, スマートプロセス学会誌, **4**(4), 184-189 (2015).
- 3) 斎藤 隆, 西村芳孝, 両角 朗, 玉井雄大, 百瀬文彦, 望月英司, 高橋良和, 第20回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 97-100 (2014).
- 4) 金黒秀平, 佐々木喜七, 西川 宏, 第26回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, 51-54 (2020).
- 5) 野北和宏, エレクトロニクス実装技術, **10**(1), 20-26 (2010).
- 6) 伊藤宏文, 福本信次, 藤本公三, スマートプロセス学会誌, **10**(1), 39-44 (2021).



大橋 東洋 Touyou OHASHI
イノベーションセンター 界面接合領域