
ハンダ接合信頼性評価技術

Reliability Evaluation Technology of Solder Joining

坂津 務* 高橋 昭治* 磯田 昌志**
Tsutomu SAKATSU Shoji TAKAHASHI Masashi ISODA

要 旨

電子部品のハンダ接合部には、構成部材の熱膨張係数差と環境温度変化等により引き起こされた応力が繰返し加わり、疲労破壊が発生する。この故障メカニズムに対しては温度サイクル試験によりその信頼性を評価してきたが、試験の期間短縮・コスト低減を目指した信頼性評価技術を開発した。ハンダ材料の非線形特性を考慮したシミュレーションにより、ハンダ歪の集中個所とその変化振幅レベルを求めることで、亀裂の進展状態および疲労寿命を推定することができるようになった。また、ハンダ結晶の高分解能解析（FESEM/EBSP）により、Sn結晶の粒径・方位の経時的な変化を観察する事ができ、シミュレーション結果と一致することを確認した。

ABSTRACT

Solder joints of electronic devices receive repetition stress that caused from the environment temperature variation and the difference of thermal expansion coefficient of constitution materials. Finally fatigue destruction occurs. The reliability for this failure mechanism had been evaluated by a temperature cycle test. Reliability evaluation technology to realize expect shortening and cost reduction of test was developed. A concentration point and a variation amplitude level of solder strain were calculated by the simulation that considered a non linear characteristic of solder materials. A development state of crack and fatigue life became estimated thereby. And the gradual variation of the particle size and the crystallization direction of Sn in solder was observed by high resolution analysis (FESEM/EBSP). It was shown that solder crystallization observation result agreed with a simulation result.

* 経営品質管理本部
Quality of Management Division

** 電装ユニットカンパニー
PC Unit Products Company

1. 背景と目的

近年、電子情報機器の開発は、高性能化、高機能化、小型携帯化の方向へ加速度的に移行しつつあり、地球環境調和型の側面からは鉛の削減をはじめ、リサイクルの促進、長寿命設計の製品が必要とされてくる。電子部品実装においては、材料の多様化、部品構造の複雑化、接続部の微細化、使用環境の多様化などから、ハンダ接合部に様々な信頼性上の問題が顕在化してきている。機械的、熱的、電気的な信頼性を確保する為の試作回数を低減し、開発期間の短縮を図ることが経営上の重要な課題となっており、その為の解析・評価技術の開発が必要となってきた。

ハンダ接合における重要な信頼性問題の1つはハンダの熱疲労破壊である。電子部品とプリント基板の熱膨張係数の差に起因する応力が、環境温度等の変化に応じてハンダ接合部には繰返し加わり、やがてFig.1に見られるような、疲労破壊に至ってしまう。一般的には、応力によって滑り面や粒界に転位が堆積し、堆積転位の増加によりマイクロクラックが発生し、それが増え合体して滑り面や粒界に沿って成長しながら伝播し、亀裂が成長するといわれている。

筆者らは、Fig.2に示すような様々な形態の電子部品に対して、ハンダ材料の非線形特性を考慮した有限要素法解析によりハンダ歪の集中個所とその変化振幅レベルを求め、亀裂の進展状態および疲労寿命分布を推定する方法を検討した。更に、ハンダ接合部の物理的劣化反応を解明する目的で高分解能解析による、Sn結晶の粒径・方位の観察を行ってきたので、それらの結果について報告する。

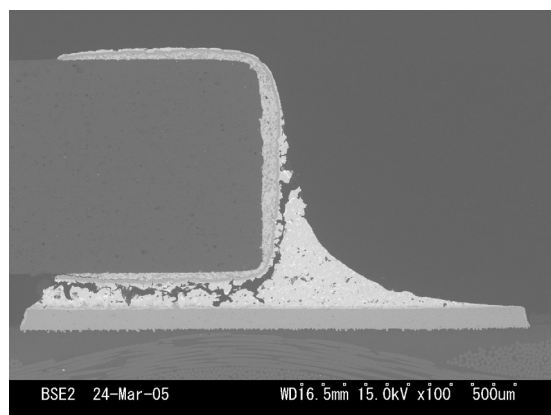


Fig.1 SEM image of the cross-section of fatigue destruction.

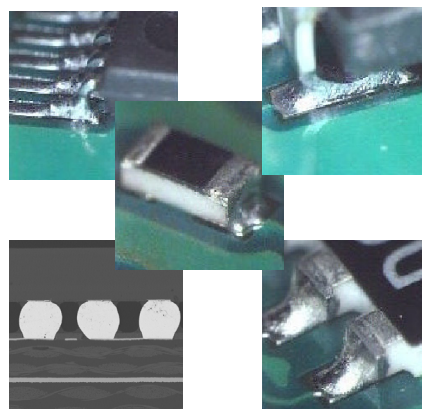


Fig.2 several kinds of electrode shape.

2. 技術

2-1 ハンダ熱疲労破壊寿命予測

2-1-1 ハンダ疲労特性と寿命分布予測モデル

一般に、金属材料などの構造物に加わる繰返し応力による疲労破壊はS-N線図を使用するマイナー則が用いられる。S-N線図とは、部材に加える応力振幅と破壊するまでの応力の繰返し数をプロットしたものであり、応力振幅が小さいほど破壊に至るまでに必要な繰返し数は多くなり線は傾きを持つ。ある応力振幅以下になると線は水平となり、限界の応力を疲労限界という。しかしながら、鉄鋼材料などを除いては厳密な疲労限界は存在せず、低応力疲労を考慮した修正マイナー則を適用する場合も多い。

ハンダ材の場合も、疲労限界は存在せず、繰り返される非弾性歪振幅 $\Delta \epsilon_{in}$ と疲労破壊寿命 N_f の係数に、Fig.3のような相関があることが知られており、(1)式で表されるn乗則モデルが成り立つ事が報告されている¹⁾。

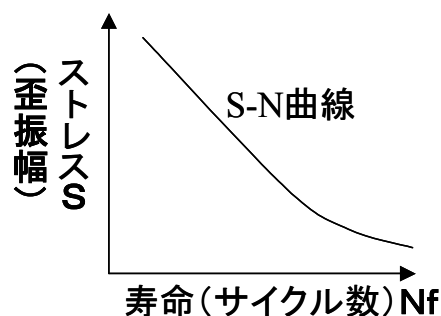


Fig.3 S-N curve.

$$Nf = C(\Delta \varepsilon \text{ in})^{-n} \quad (1)$$

有限要素解析よりハンダ歪の集中個所とその変化振幅レベルを求め、実際の温度サイクル試験結果と照らし合わせて相関関係の導出を行った。寿命分布にはワイブル分布を仮定し、求めるS-N関係式も $\Delta \varepsilon$ とワイブル回帰した寿命分布との相関を示すことを狙いとし、(1)式の Nf にワイブル分布の尺度パラメータ η を当てはめた(2)式に対して、ワイブル分布の形状パラメータ m 、および定数 C 、 n の導出を実施した。

$$\eta = C(\Delta \varepsilon)^{-n} \quad (2)$$

Fig.4に疲労寿命予測の活用フローを示す。任意の電子部品のハンダ接合に対して歪変化をシミュレーションで求め、(2)式の相関関係より、試験を行わずに疲労寿命のワイブル分布を推定できることになる。

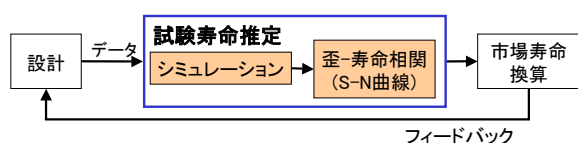


Fig.4 Construction of life prediction technique.

2-1-2 ハンダ非弾性歪シミュレーション

構造材料の熱膨張差により発生する非弾性歪を計算する為には、熱伝導解析と構造解析を行う必要がある。SnAgCuハンダは低負荷状態でも歪量が増加するクリープ効果を有し、且つ加工硬化性がSnPbハンダに比べて大きい為、ハンダ非弾性歪の解析の為には、応力歪特性の非線形性を考慮する必要がある。今回、非線形有限要素解析のソルバーとして、MSC.Marcを用い、ハンダ材料の非線形特性には日本機械学会信頼性分科会RC202で開発されたSnAgCuハンダクリープユーザーサブルーチンを使用した。

Fig.5にFEMで使用した1/4モデルの1例を示す。ハンダ特性以外は、Table 1で示す材料定数を用いた。温度サイクル試験における温度変化時のCreep strainとPlastic Strainを計算し、その和をとって非弾性歪 $\varepsilon \text{ in}$ を算出した。

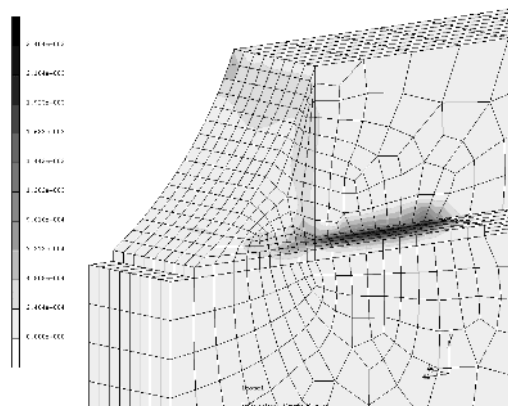


Fig.5 A figure of FEM model.

Table 1 Calculation parameters.

材料	ヤング率(Mpa)	ポアソン比	線膨張(/K)
抵抗チップ(セラミック)	2.80E+05	0.24	7.60E-06
Cu	1.18E+05	0.30	1.72E-05
PWB	1.51E+04	0.16	1.45E-05

* Pbフリーハンダの特性は降伏応力、クリープ特性を考慮したユーザーサブルーチンにて変動。

抵抗チップを非表示にし、ハンダ接合部のEquivalent creep Strain分布を見やすくした解析結果をFig.6に示す。

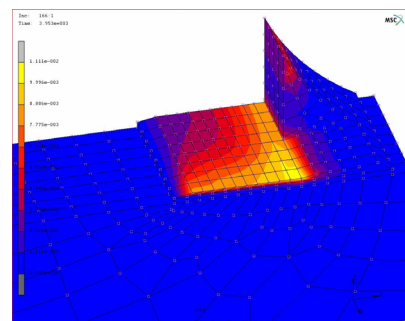


Fig.6 Equivalent creep Strain distribution of solder joint at resistor.

抵抗チップのコーナー部直下に集中個所が発生している事がわかる。これに対して実際の試験サンプルを断面カットし、SEM観察した結果をFig.7に示す。Fig.6にて歪が集中している抵抗チップコーナー部直下からクラックが発生し始めている様子が観察され、非弾性歪のシミュレーションが実際の系と良好な一致を示しており、本シミュレーションが有効であると考えられる。

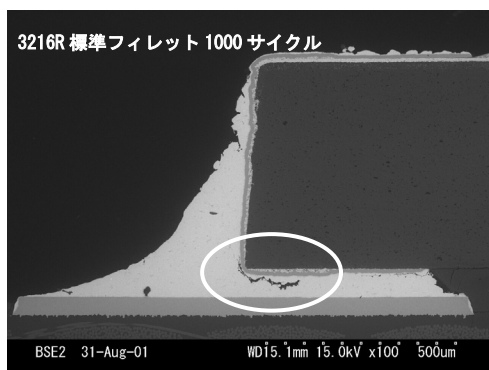


Fig.7 SEM image of the cross-section of resistor.

また、歪集中個所のEquivalent creep Strainの時間変化をプロットするとFig.8のように、温度サイクル変化に同期して、周期的に変化することがわかった。

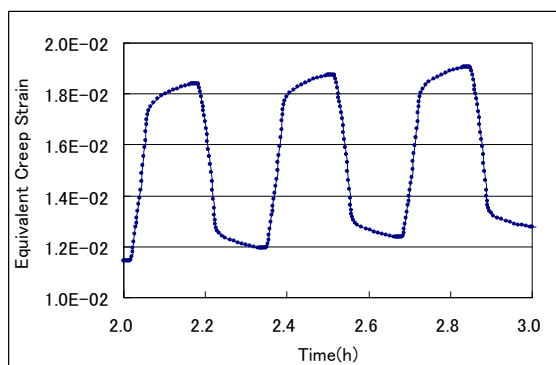


Fig.8 Equivalent creep strain change in temperature cycle test.

上記にPlastic strainの変化を合わせた非弾性歪の変動振幅 $\Delta \varepsilon_{in}$ を疲労破壊寿命推定の為のストレスレベルとして用いた。

2-1-3 温度サイクル試験と歪-寿命相関関係の導出

部品の種類によりその端子形状が異なり、ハンダ歪の集中箇所も異なってくる。種々の部品を統一的に扱える予測手法の確立が狙いであるが、今回は、比較的シンプルな部品構造および端子構造をもつ抵抗チップと抵抗アレイチップに関して非弾性歪振幅 $\Delta \varepsilon_{in}$ の計算と温度サイクル試験結果の対比を行った。その部品の外形サイズをFig.9に示す。また、Fig.10のように、高密度実装を狙って、ハンダフィレットを積極的に排除したレイアウトのフィレットレスの水準を盛り込んだ。

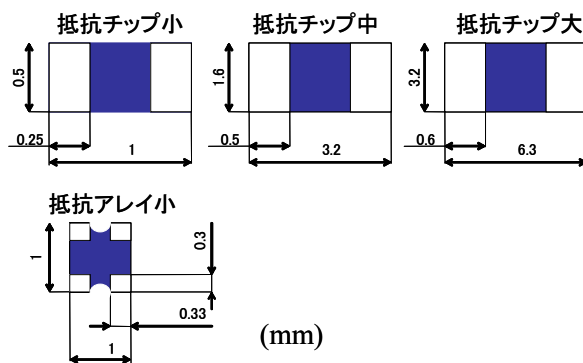


Fig.9 evaluation parts.

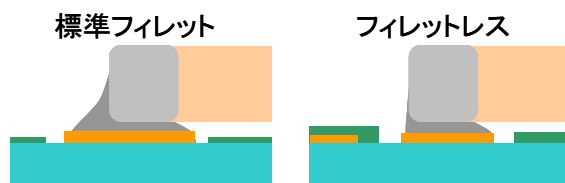


Fig.10 Two kinds of fillet shapes.

温度サイクル試験は条件：125/-25℃ 10min/10minで実施した。試験中に接続抵抗を常時モニタリングし、初期抵抗値（常温）の1.5倍となったサイクル数を破断寿命とした。抵抗チップのサイズ別に破断寿命をワイブルプロットした結果をFig.11に示す。ワイブル分布の尺度パラメータ η は、サイズが大きいくほど小さくなる。サイズが大きくなると部品と基板の膨張差が大きくなる為、発生する非弾性歪振幅 $\Delta \varepsilon_{in}$ が大きくなり、寿命が短くなると考えられる。また、ワイブル分布の形状パラメータ m の違いが見られるが、サイズ別のデータの中にはフィレットの有無やハンダの種類など他因子を振ったデータも含まれており、部品のサイズによってそれらの影響が異なっていることが原因と考える。

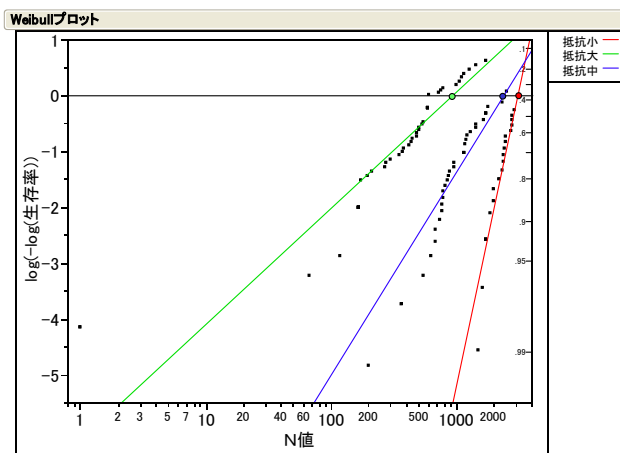


Fig.11 Temperature cycle test results (weibull plot).

今回は、形状のシンプルなフィレットレスの部品に対して、シミュレーションによる非弾性歪振幅 $\Delta \varepsilon_{in}$ の計算と、温度サイクル試験より求まる N_f との相関を取り関係を Fig.12 にプロットした。それらの部品に関して、統計解析ソフト SAS.JMP を用いて、ワイブル分布形状パラメータ m 、および式(2)における定数 C 、 n の推定を行い関係式(3)を得た。ここではフィレットレスについてのみの相関なので、 m を一定として計算した。

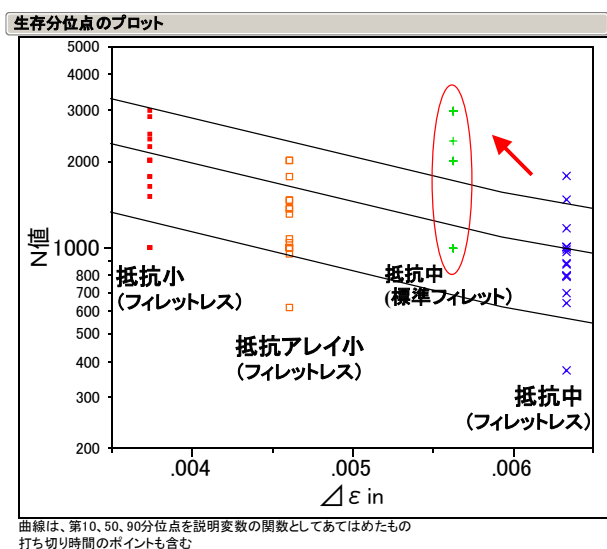


Fig.12 $\Delta \varepsilon$ - fatigue life correlation.

$$\eta = 0.8(\Delta \varepsilon)^{-1.43} \quad (3)$$

$$m = 3.37$$

式(3)を用いることにより、シミュレーションで $\Delta \varepsilon_{in}$ を算出すれば、その接合寿命をワイブル分布で推定する事ができる。

Fig.12に抵抗中（標準フィレット）のデータをプロットした（サークル内）。フィレットレスに比べて $\Delta \varepsilon_{in}$ は確かに小さくなるが、試験の実寿命はフィレットレスで求めた相関関係から予測される寿命分布より更に長寿命にシフトしている。これに対しては、亀裂の発生から完全破断に至るまでの亀裂進展寿命がフィレットの有無で異なることがその理由の一つと考えられる。

2-2 ハンダ結晶観察

2-1項で検討したシミュレーションと信頼性試験による寿命予測モデルでは、ハンダの材料特性そのものの経時的変化を考慮していない。SnPb材料から鉛フリー材料に変わる事に伴い、ハンダの結晶が経時的にどのように変化して破断に至るのかといった基本的な劣化メカニズムの解明を目的に高分解能観察によるミクロ的なハンダ結晶観察を行った。我々は主としてSEMとEBSP法を使って解析を試みた。

EBSP (Electron Backscatter Diffraction Pattern) 法は電子線回折パターン（菊池線）より、結晶の方向と種類が微小領域で計測可能な手法である。Fig.13に概念図を示す。既知の結晶構造に対する菊池線パターンと照らし合わせて、結晶構造や方位を解析する方法である。

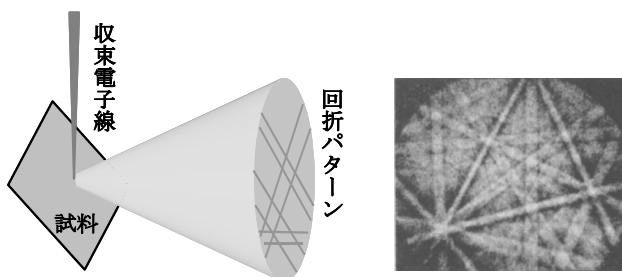


Fig.13 schematic image EBSP measurement.

菊池パターンを得る為には、平坦かつダメージレスな試料断面が必要である。その為、FIB (Focused Ion Beam) を用いてハンダ断面を作製することが必要である。FIBはガリウムイオンを収束させて試料表面を掘削する加工方法で、ダメージの少ない加工が可能である。また、FIBによるSIM像（イオン励起2次電子像）は、結晶方位に依存するチャネリング効果があるため、結晶界面の存在や粒径の違いが加工途中に定性的に観察可能であるというメリットがある。

Fig.14にハンダバンプ接続の断面をFIBにより観察したSIM像を示す。初期段階では細かなSn結晶がバンプ全域に分散している様子が観察できる。

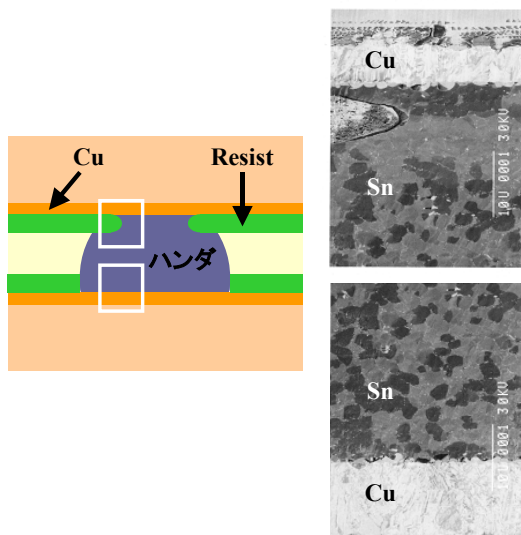


Fig.14 SIM image of solder ball cross-section at 0 cycle.

温度変化による膨張差によって発生するハンダボールの非弾性歪分布を計算した結果をFig.15に示す。

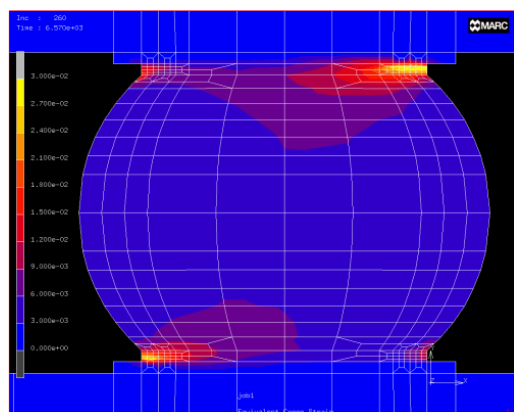


Fig.15 in-elastic strain distribution of solder ball in a temperature cycle.

シミュレーションの結果、ボール内の歪はネック部に集中し、ボール中央部はあまり歪が発生していないということがわかる。そこで温度サイクル試験後のハンダボールをFIB加工し、SIM像およびEBSPで観察した。EBSP像では結晶方位を3方向から見た色分けマップとして表示される。よって方位の近い結晶は同じような色で配色されている。

Fig.16に200サイクル経過後のSIM像とEBSP結果を示す。応力の集中するボールネック部に微小クラックの発生が観られる。その近辺では結晶粒径が細かく方位が異なる結晶が見受けられるが、応力集中のないボール中央では、結晶粒が大きく成長している。

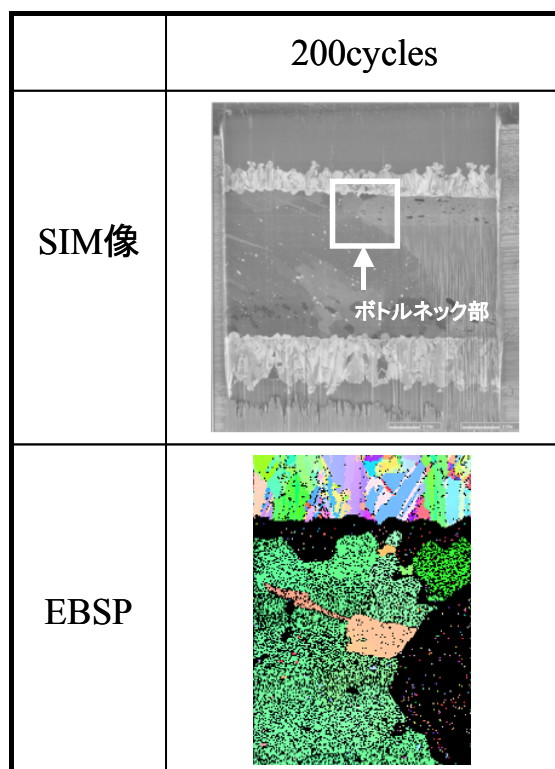


Fig.16 SIM image and EBSP result of Tin crystallization at 200 cycles.

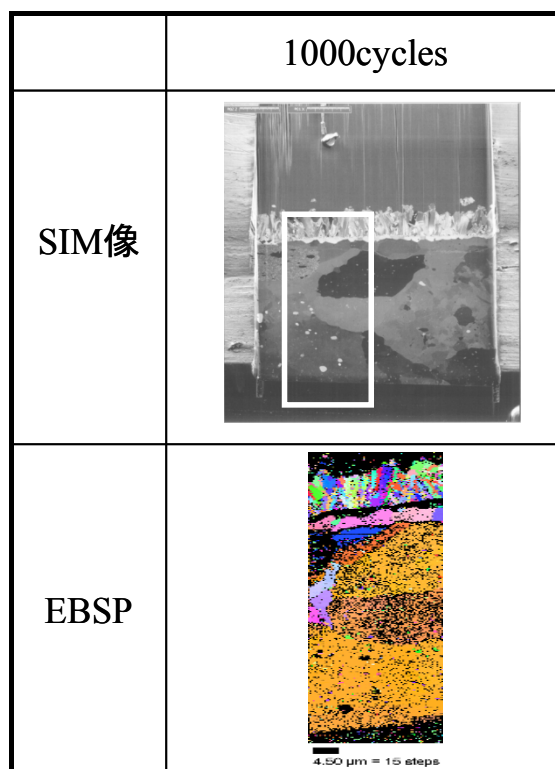


Fig.17 SIM image and EBSP result of Tin crystallization at 1000 cycles.

更に、Fig.17に1000サイクル経過後のSIM像とEBSP結果を示す。応力集中しているネック部の結晶は200サイクル経過後と同様に細かく、方位も大きく異なっている。クラックはネック部を起点として界面を走っており、クラックを境にボール中央側は結晶が粗大化し、方位がそろっている状態が観察できる。これらの結果より、Sn結晶の粒径と方位は応力、温度、時間によって変化してくる事がわかってきた。

命評価」エレクトロニクス実装学会誌Vol.1 No.4 pp.278-283
(1998)

注1) MSC.Marcは米国MSC Software Corporationの商標です。

注2) JMPは米国SAS Institute Inc.の商標です。

3. まとめ

ハンダ非線形歪シミュレーション手法を開発した。これにより、温度サイクル試験時にハンダ接合部に発生する歪の分布を解析することで、様々な形態の部品に対して疲労破壊の発生個所を知ることができる。

また、歪変動の最大個所の非弾性歪振幅 $\Delta \epsilon_{in}$ を引数とする疲労破壊寿命分布推定式を導出した。ハンダ接合部の疲労寿命をワイブル分布で予測する事ができる。相関データを蓄積し、推定確度を高めていけば、設計段階で活用できる寿命分布予測ツールとなる。

FIB/EBSPにより、ダメージの少ないハンダ接合部断面加工と、Sn結晶の粒径・方位の観察技術を開発した。これを用いて、経時的結晶変化の一面を捉える事が出来た。接合初期には細かなSn結晶が形成されているが、応力と温度と時間によって、結晶の粒径と方位に傾向をもった分布が生じ始める。体系的に粒径/方位を観察して定量化し、クラック発生との関連性を得ることにより、ハンダ接合部の劣化を結晶レベルの経時変化で把握する事ができる。

4. 今後の展開

ハンダ非線形歪シミュレーションによる疲労破壊寿命分布予測の確度向上の為に、亀裂発生から完全破断までの亀裂進展寿命の予測モデルの構築を進める。

また、ハンダSn結晶変化のパラメータ影響度解明の為に、応力、温度、時間をコントロールしたサンプルによる結晶変化の解析を進める。

参考文献

- 1) 于強, 白鳥正樹: 「BGAはんだ接合部の形状を考慮した疲労寿