Sn-3.5Ag, Sn-0.7Cu 鉛フリーはんだの表面変形度合による低サイクル疲労寿命の定義*

高橋 武彦** 日置 進** 荘司 郁夫*** 神谷 修****

Low-Cycle Fatigue Life Definition for Sn-3.5Ag and Sn-0.7Cu Lead-free Solders Using Surface Deformation*

by TAKAHASHI Takehiko **, HIOKI Susumu **, SHOHJI Ikuo *** and KAMIYA Osamu ****

The low-cycle fatigue behavior and the relationship between the surface features in the low-cycle fatigue testing and the fatigue life of Sn-3.5Ag and Sn-0.7Cu lead-free solders were investigated at strain rate of 0.1%/s with a non-contact extensometer at room temperature (22°C), 80°C and 120°C. In addition the fatigue life using the surface deformation of those solders were defined and estimated from the surface features of solders investigated by image processing and compared with Coffin-Manson type of fatigue behavior of solders. The fatigue life of Sn-3.5Ag solder was superior to that of Sn-0.7Cu solder under temperatures of 80°C and 120°C. The fatigue life defined from surface deformation indicated a close behavior to Coffin-Manson type of fatigue behavior in those solders. This method could identify the low-cycle fatigue life of solders from the surface deformation.

Key Words: Lead-free solder, Sn-Ag, Sn-Cu, Low-cycle fatigue, Surface deformation, Surface feature, Image processing

1. 緒 言

近年、電子基板実装時のはんだ接合において、鉛の有害性を回避すべく、Sn-Ag系およびSn-Cu系などの鉛フリーはんだに代表される代替はんだを用いた鉛フリー化が進められている。しかし、様々な電子機器への適用のためには、環境に有害な物質を含まないことと同時に、設計上から疲労特性に優れた信頼性の高い接合部を得る必要がある。この信頼性設計の実現ために、鉛フリーはんだの接合性¹⁾、機械的特性²⁾³⁾、疲労特性⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾および、はんだ接合部の信頼性⁸⁾⁹⁾など、多くの研究によるデータ蓄積が進められている。

これらの蓄積データをもとにはんだ接合部設計の信頼性を向上させる場合、実際の接合部との相関を調査する必要がある。しかし、接合状態における疲労度合の直接的な計測は困難である。著者らは既報¹⁰⁾¹¹⁾において、画像を用いた評価により、室温下での低サイクル疲労による表面変

形と疲労度合の関係を調査し、その相関関係を報告している。

本研究では、Sn-3.5mass%AgおよびSn-0.7mass%Cu鉛フリーはんだ（以下、元素記号の前の数値はmass%を示す）を供試材として、室温（≒22°C）、80°Cおよび120°Cにおいて、全ひずみ範囲0.4%～2.0%で低サイクル疲労試験および疲労試験中の試験部表面観察を実施した。また、観察画像を画像処理することで表面変形を数値化し、その上限をカーブフィットにより推定し、それに基づく疲労寿命の定義について検討した。

2. 実 験 方 法

Sn-3.5AgおよびSn-0.7Cu鉛フリーはんだを供試材として用いた。各はんだの熔融温度をTable 1に示す。試験片は、凝固開始温度+100°Cで鑄造した円柱材を用いて、機械加工により作製した。Fig. 1に試験片形状を示す。試験片形状は、材料学会推奨のはんだの低サイクル疲労試験法標準¹²⁾に準拠し、平行部長さおよび試験部直径を、それぞれ24mm、8mmとした。通常、試験片には、機械加工時に導入された加工ひずみの除去および組織の安定化を目的として熱処理が施される。Sn-3.5Agを用いた時効処理と熱処理の影響の調査¹³⁾では、100°C1時間～20時間の熱処理において、室温時効（60日）と同等の結果が得られている。したがって本研究では、試験実施前に100°C1時間の熱処理を施した。

*原稿受付 平成18年2月10日 第12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 (Mate2006) で発表

**正 員 秋田県立大学システム科学技術学部 Member, Faculty of Systems, Science and Technology, Akita Prefectural University

***正 員 群馬大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Gunma University

****正 員 秋田大学工学資源学部 Member, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

Table 1 Solidification starting temperature of solders in this study.

Solder type(mass%)	Solidification starting Temp.(°C)
Sn-3.5Ag	232
Sn-0.7Cu	227

Fig. 1 Dimensions of low-cycle fatigue specimen.

低サイクル疲労試験は、試験片平行部の標点距離 20mm を基準とするひずみ制御方式により行なった。変位の計測は、試験片平行部に標点となるマーキングを施し、これをビデオ式伸び計により検出する非接触ひずみ測定方式により行なった。試験は、ひずみ速度 0.1%/s とし、試験温度 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ (室温: R.T.), 80°C , 120°C , 全ひずみ範囲 0.4% ~ 2.0% において実施した。この際室温では、温度制御を行わず、 80°C , 120°C においては、治具に熱線ヒータを巻きつけてコントローラーにより温度制御を行なった。また、疲労寿命は初期応力から 30% 低下したサイクルと定義した。

表面変形の観察は、低サイクル疲労試験中の試験片平行部表面の同一箇所をマイクロ스코プにより 50 倍の拡大画像としてとらえ、画像をコンピュータにより記録することで実施した。Fig. 2 に表面観察像の記録タイミングを示す。表面観察像の記録は、1 サイクル内における応力が最大および最小のときに実施し、画像記録は任意のサイクルごとに 20 回 ~ 50 回程度実施した。また、その観察範囲は、 $6\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ であり、画像サイズは 640×480 (1 画素のサイズは $9.375 \mu\text{m} \times 9.375 \mu\text{m}$) である。

3. 実験結果および考察

3.1 低サイクル疲労試験

Fig. 3 に Sn-3.5Ag 鉛フリーはんだを用いて、全ひずみ範囲 2.0% において低サイクル疲労試験を行なった際の室温、 80°C および 120°C における初期サイクルの応力とひずみのヒステリシスループを示す。このとき塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ は応力 0 MPa におけるヒステリシスループの横幅から求められる。ここでの塑性ひずみはクリープひずみを含むが、本研究では、両ひずみをあわせたものを便宜上、塑性ひずみとして取り扱う。

各温度におけるヒステリシスループを比較すると、ほぼ等しい全ひずみ範囲となっており、安定した試験が実施で

Fig. 2 Process of surface observation and observation area.

Fig. 3 Hysteresis loops for Sn-3.5Ag at total strain range of 2.0% at initial cycle at different temperature.

Fig. 4 Relation between tensile stress and number of cycles on Sn-3.5Ag at total strain ranges of 0.4% and 2.0% at different temperature.

きたと考えられる。また、温度の増加により引張応力および圧縮応力が減少し、結果として応力振幅が小さくなることが確認できる。

Fig. 4 に、Sn-3.5Ag の各温度における全ひずみ範囲 0.4% および 2.0% の引張側応力とサイクル数との関係を示す。いずれのひずみ範囲においても、温度の増加にともない初期引張応力が低下し、その後の応力低下も早いことがわかる。また、いずれの温度においても全ひずみ範囲 0.4% では、引張応力が初期値の半分以下になるまでに要

するサイクル数は、全ひずみ範囲 2.0%と比較して、20 倍程度のサイクル数を要することがわかる。

Fig. 5 に Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu の各温度における塑性ひずみと疲労寿命の関係を示す。ここで疲労寿命は初期応力から 30%低下したサイクルと定義した。Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu は、各温度において次式に示す Coffin-Manson の関係¹⁴⁾¹⁵⁾におおむね従うことが確認できる。

$$N_f^m \Delta \varepsilon_p = C \quad (1)$$

ここで、 N_f は疲労寿命、 $\Delta \varepsilon_p$ は塑性ひずみ範囲、 m は疲労延性指数、 C は疲労延性係数である。このとき疲労延性指数は、室温、80°C、120°C のそれぞれで、Sn-3.5Ag では 0.50、0.45、0.64 であり、Sn-0.7Cu では 0.74、0.76、1.14 であった。疲労寿命を比較すると、Sn-3.5Ag、Sn-0.7Cu とともに、温度の増加に伴う疲労寿命の低下が確認できる。また、その低下は、Sn-0.7Cu において著しく、室温においては、Sn-3.5Ag とほぼ同等である疲労寿命が、120°C においては Sn-3.5Ag の 1/5 程度となっている。よって、Sn-0.7Cu の疲労特性は Sn-3.5Ag に比べて高温における疲労強度が低いと考えられる。

3.2 試験片表面の変化および画像処理

Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu を用いた低サイクル疲労試験中にマイクロスコープにより、50 倍にて同一試験片表面で同一箇所を観察した。その観察範囲は、6mm×4.5mm とした。また、画像は正方形の 1 画素あたり一辺 9.375 μm である。観察画像より表面変形度合を評価するために、最大引張応力時の観察画像を用いて画像処理を実施した。まず撮影画像を 256 グレイレベルに変換する。次に、試験片表面に現れている凹凸およびき裂を検出するために、引張圧縮方向の微分処理を(2)式のフィルタにより、その直交方向の微分処理を(3)式のフィルタにより実施した。

$$f_v = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$f_h = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

両者の重ね合わせを行なったのち、検出した凹凸およびき裂の判定を輝度基準で実施した。すなわち、特定のしきい値 (256 グレイレベルに対して 10) を超える輝度のものを 1 (白画素)、しきい値に満たないものを 0 (黒画素) とする二値化処理を行なった。この処理により抽出した白画素は、試験片表面の凹凸およびき裂の特徴を明確化して得られた結果である。したがって、ここでは白画素を特徴画素と定義する。

Fig. 5 Relation between plastic strain and fatigue life on Sn-3.5Ag and Sn-0.7Cu at different temperature.

Fig. 6 Microscopic photographs of the surfaces of the specimens tested at total strain range of 0.6% and at 80°C.

観察結果および画像処理結果の一例として、全ひずみ範囲 0.6%、80°C における Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu の最大応力時の観察画像を Fig. 6 に、その画像処理結果を Fig. 7 に示す。Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu における低サイクル疲労試験中の表面変形は、引張圧縮サイクルの増加にともない蓄積することが確認できる。Sn-3.5Ag、Sn-0.7Cu 鉛フリーはんだともに、50 サイクル時点では、顕著な変形の蓄積は確認できないが、200 サイクルの時点では、繰返し引張圧縮による変形の蓄積による輝度の変化が確認できる。また、1000 サイクル以降では、明らかな変形の蓄積

Fig. 7 Photographs after image processing of the surface of the specimens tested at total strain range of 0.6% and at 80°C.

が確認でき、加えて、き裂の発生およびその進展が見られる。また、画像処理結果ではき裂発生は確認できないものの、引張圧縮サイクルによる変形の蓄積が、特徴画素の増加として確認できる。同様の傾向が 120°C においても確認でき、室温における観察結果¹⁰⁾¹¹⁾と一致する。また、その増加は、観察画像のサイクルにともなう変形の蓄積と対応しており、80°C、120°C の疲労試験においても、本研究の画像処理方法により、変形の蓄積を特徴画素の増加としてとらえることが可能であると考えられる。

画像処理により抽出した特徴画素の数をカウントし、特徴画素の各サイクル時の画像に占める割合 A_{ratio} を求めた。Fig. 8 に Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu の全ひずみ範囲 0.6% における温度ごとの特徴画素の画像に占める割合 A_{ratio} と引張側応力の対比を示す。ここで横軸は、サイクル数 N を疲労寿命サイクル N_f で割った値で定義した疲労寿命割合 N/N_f である。また、このときの疲労寿命サイクルは、室温、80°C、120°C のそれぞれで、Sn-3.5Ag では、5371、4511、1171 であり、Sn-0.7Cu では、5981、1141、381 である。Sn-3.5Ag では、温度によらず初期疲労の段階において特徴画素の増加が確認でき、その増加は疲労の進行にともない飽和する傾向にある。また、引張側の応力低下と対比させると、室温において特徴画素の増加が飽和傾向を示す付近において応力の急激な減少が明確に確認でき、80°C においても同様の傾向が確認できる。したがって、特徴画素が飽和傾向を示す段階では、試験片内部の方向への

Fig. 8 Contrasts between the area ratio of feature points and the tensile stress at total strain range of 0.6%.

き裂の進展が増加し、表面き裂による表面変形の蓄積は減少するものと考えられる。また、120°C では、特徴画素が飽和傾向を示した後も応力低下に急激な変化は見られず一定の割合で低下している。Sn-0.7Cu においても、室温において、特徴画素の変化は少ないものの Sn-3.5Ag と同様の傾向が確認できる。しかし、80°C および 120°C では、特徴画素の増加が飽和傾向を示す段階は、疲労寿命サイクルである $N/N_f=1.0$ の時点よりかなり疲労サイクルが進んだ後である。また、引張側応力の低下との対比では、特徴画素の飽和に対応する応力の急激な低下を確認できない。このことから、高温における Sn-0.7Cu では、内部方向へのき裂の進展は遅いと考えられ、急激な応力低下を生じにくく、疲労強度を保っているものと思われる。その結果、疲労寿命サイクル以降も表面変形の蓄積が持続するものと考えられる。

3.3 表面変形を用いた疲労寿命の定義と妥当性

低サイクル疲労試験時の表面観察画像からの画像処理結果を用いて低サイクル疲労寿命を定義し、それらと 30% 応力低下より評価した従来の Coffin-Manson タイプの疲労寿命との比較を試みる。Fig. 8 において、特徴画素の観察画像面積に占める割合が飽和傾向を示した。サイク

ルの増加にともなう試験片の変形過程を考えると、初期段階ではすべり帯の変形にともなう表面の凹凸が発生し、その後に粒界および粒内のき裂発生につながり、発生したき裂が拡大、進展する。したがって、表面変形の増加が飽和すると、内部方向へのき裂の進展が顕著となり疲労強度の低下につながると考えられる。以上より、表面変形が飽和する段階を明らかにすることで、疲労破壊の形態が、内部き裂の進展に移行した段階としてとらえることが可能と考える。よって、疲労蓄積にともなう表面変形は、サイクルの増加にともない飽和するものと仮定し、その飽和値の 90% を疲労寿命と定義する。Fig. 9 に画像処理結果を用いた疲労寿命の定義の概念図を示す。まず、次式に示す関数を用いて特徴画素の割合とサイクル数の関係に対してカーブフィットを行なう。

$$A_{\text{ratio}} = a_1 - a_2 \exp(-a_3 \cdot N). \quad (3)$$

ここで、 A_{ratio} は特徴画素の面積に占める割合、 N はサイクル数、 a_1 、 a_2 、 a_3 はそれぞれカーブフィット係数を示す。このとき、カーブフィットの係数 a_1 および a_2 を用いることで、それぞれ特徴画素の面積に占める割合の初期値および最終値に対応する推定値は、以下の式で表される。

$$\text{初期値の推定値} = a_1 - a_2. \quad (4)$$

$$\text{最終値の推定値} = a_1. \quad (5)$$

よって、初期値を表面変形の蓄積 0%、最終値を表面変形の蓄積 100% と見なし、(3) 式による表面変形蓄積の評価値が、最終値の 90% となった時点のサイクル数を疲労寿命と定義した。

Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu の低サイクル疲労試験における、表面観察画像からの疲労寿命の推定値、および初期応力から 30% 低下で評価した疲労寿命値の比較を Fig. 10 に示す。Sn-3.5Ag における表面観察画像からの疲労寿命の推定値は、応力 30% 低下の疲労寿命に比べ、室温および 80°C においてはわずかに短く、80% 程度の疲労寿命の評価、120°C においてはほぼ同等な疲労寿命の評価の結果を示している。全体的に見てその差は小さく、おおむね応力 30% 低下の疲労寿命に類似した疲労寿命の定義と言える。また、温度による疲労寿命の違いも少ないものとなっている。一方、Sn-0.7Cu における表面観察画像からの疲労寿命の推定値は、応力 30% 低下の疲労寿命に比べ、室温においてはわずかに短く、80% 程度の疲労寿命の評価、80°C および 120°C においてはかなり長く、それぞれ 3 倍および 4 倍の疲労寿命の評価となっている。特に 120°C における評価結果は、80°C における応力 30% 低下の疲労寿命よりも長い疲労寿命の定義となっている。これは、Sn-0.7Cu の高温における低サイクル疲労試験時の応力が、初期応力より 30% 低下した以降も急激な応力の低下を示さず、ゆるやかに低下していくことで、表面変形の蓄積もサイクルの増加

Fig. 9 Schema of determining method of fatigue life from the feature image.

(a) Sn-3.5Ag

(b) Sn-0.7Cu

Fig. 10 Comparing the fatigue lives from stress shrinkage of 30% and surface deformation satiated of 90% at different temperature.

にともない進行していくためだと考えられる。すなわち、表面変形の蓄積が持続することで、表面観察画像による疲労寿命の推定値が長寿命側に推移した結果である。また、全体的に見ると、Sn-0.7Cu の表面観察画像による疲労寿命の推定値は、温度による影響が大きい応力 30% 低下の疲労寿命に比べてその影響が少なく、Sn-3.5Ag と同様に温度の影響の少ない結果となっている。

以上より、Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu の表面観察画像による疲労寿命の推定値は、応力 30%低下の疲労寿命に比べて温度の影響が少ない。また、表面変形による疲労寿命時の疲労強度を考えると最大で 40%程度の応力低下となる。ASTM の疲労寿命評価基準¹⁶⁾では負荷の 50%低下によりその疲労寿命を評価している。したがって、表面観察画像による疲労寿命の定義での疲労強度は、強度基準の面から見ても問題は生じないと考えられる。よって、特に応力低下による疲労寿命評価において、高温での疲労寿命低下が大きい Sn-0.7Cu 鉛フリーはんだでは、温度によらず疲労寿命を定義でき、単一の疲労曲線においてその疲労関係を記述可能である。したがって、はんだ接合部サイズにおいてその相関の確認を進めることで、容易なはんだ接合部設計への適用が可能と考えられる。

4. 結 言

Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu 鉛フリーはんだの低サイクル疲労特性を明らかにするため、室温、80℃、120℃において、全ひずみ範囲 0.4%~2%で低サイクル疲労試験実施し、同時に画像による表面変形の観察を実施した。また、画像処理による表面変形蓄積の数値化、およびカーブフィット処理により、最終値の 90%を基準とした疲労寿命の定義を行い、応力低下基準の疲労寿命と比較、検討を実施した。その結果、明らかとなったことを以下に示す。

- 1) Sn-3.5Ag および Sn-0.7Cu 鉛フリーはんだの低サイクル疲労特性は、温度の増加および塑性ひずみの増加により疲労寿命が低下する。また、その塑性ひずみと疲労寿命の関係は、各試験温度において Coffin-Manson の関係に従う。
- 2) Sn-0.7Cu の疲労寿命は、Sn-3.5Ag に比べて高温における疲労強度の低下が早く、室温においてほぼ同等の疲労寿命であるが、120℃においては Sn-3.5Ag の疲労寿命の 1/5 程度となる。
- 3) 80℃および 120℃における試験片表面の変形蓄積は、室温における表面変形の蓄積同様、画像処理によりその特徴を抽出することが可能である。

- 4) 表面観察画像から推定した疲労寿命は、Sn-3.5Ag では応力低下による疲労寿命とほぼ同等となる。また Sn-0.7Cu では、室温においてほぼ同等、80℃および 120℃では応力低下による疲労寿命に比べて 3~4 倍の疲労寿命評価となる。
- 5) 表面観察画像から推定した疲労寿命は、温度による違いが少なく、はんだ接合部のサイズにおいてその相関の確認を進めることで、温度の影響を受けない容易なはんだ接合部設計基準となる可能性を有する。

参 考 文 献

- 1) T. Takemoto, T. Funaki, Mater. Trans., 43, 8, (2002), pp.1784-1790.
- 2) I. Shohji, T. Yoshida, T. Takahashi, S. Hioki, Mater. Sci. Eng., A366, (2004), pp.50-55.
- 3) I. Shohji, T. Yoshida, T. Takahashi, S. Hioki, J. Mater. Sci.: Mater. Electronics, 15, (2004), pp.219-223.
- 4) C. Kanchanomai, Y. Miyashita, Y. Mutoh, J. Electron Mater., 31, 2, (2002), pp.142-151.
- 5) C. Kanchanomai, Y. Miyashita, Y. Mutoh, J. Electron Mater., 31, 5, (2002), pp.456-465.
- 6) J.H.L. Pang, B.S. Xiong, T.H. Low, Int. J. Fatigue, 26, (2004), pp.865-872.
- 7) Y. Kariya, T. Niimi, T. Suga, M. Otsuka, Mater. Trans., Vol.46, No. 11, (2005), pp.2309-2315.
- 8) 干強, エレクトロニクス実装学会誌, 4, 4, (2001), pp.262-266.
- 9) Q. Yu, J. Jin, D. Kim, M. Shiratori, Trans., Vol.46, No. 11, (2005), pp.2316-2321.
- 10) 高橋武彦, 日置進, 莊司郁夫, 神谷修, 溶接学会論文集, 第 23 巻, 第 3 号, pp.436-441.
- 11) T. Takahashi, S. Hioki, I. Shohji, O. Kamiya, Mater. Trans., Vol.46, No. 11, (2005), pp.2335-2343.
- 12) はんだの低サイクル疲労試験法標準, 日本材料学会, JSMS-SD-3-00, (2000), pp.7-8.
- 13) はんだ材料の機械的特性試験方法, STS 委員会機械的特性 WG, 日本溶接協会.
- 14) L.F. Coffin, Jr., Trans. ASME, 76, (1954), pp.931-950.
- 15) S.S. Manson, Behavior of Materials Under Conditions of Thermal Stress, Heat Transfer Symposium, University of Michigan, University of Michigan Press, (1953), pp.9-76.
- 16) ASTM standards, ASTM E606: Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, vol. 03.01, The American Society for Testings and Materials, 1998, pp.525-625.