

J03124

## 微小 SAC はんだ試験片の疲労寿命に対する初晶 Sn の分布形態の影響

### Effect of Distribution Morphology of Primary Tin Crystal on Fatigue life of Miniature SAC Solder Specimen

○学 菅 絢一郎<sup>\*1</sup>, 正 大口 健一<sup>\*1</sup>  
 ,正 福地 孝平<sup>\*1</sup>, 正 黒沢 憲吾<sup>\*2</sup>  
 Ken-ichiro KAN<sup>\*1</sup>, Ken-ichi OHGUCHI<sup>\*1</sup>,  
 Kohei Fukuchi<sup>\*1</sup> and Kengo KUROSAWA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 秋田大学 Akita University

<sup>\*2</sup> 秋田県産業技術センター Akita Industrial Technology Center

In the previous study, we conducted tensile tests using a miniature specimen of Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC) solder and found out that the tensile strength of the specimen showed larger variability in the tensile strength than the ordinary size specimen even though the loading conditions were the same. Having investigated the shape and distribution morphology of primary Tin crystal in the specimen after the tests, it was found that the high-strength specimen had the primary Tin crystals which had grown in directions vertical to or parallel to tensile direction, while the low-strength specimen had the crystals which had grown in directions of about 45-degree. In addition, we found out that the growth direction of the primary Tin crystal also affected the creep resistance of the miniature SAC solder specimen. Since the fatigue lives of solders are affected by both the strength and the creep characteristics, the fatigue life of the miniature SAC solder specimen could be affected by the distribution morphology of primary Tin crystal. Therefore, in this study, we carried out fatigue tests using the miniature SAC solder specimens under multiple load conditions and discuss the correlation between the fatigue life and the distribution morphology of primary Tin crystal.

**Key Words** : SAC solder, Miniature specimen, Fatigue characteristics , Primary Tin crystal

## 1. 緒 言

電子実装基板はんだ接続部の有限要素解析(FEA)には、はんだ材の変形特性を的確に表すことができる材料パラメータを用いなければならない。特に、微細化が進んだ現在のはんだ接続部の FEA には、はんだ接続部の実寸法に近い、微小試験片を用いて同定した材料パラメータを用いることが望ましい。このため、本研究グループでは、微小試験片を用いて Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC)はんだの変形特性を評価している<sup>(1)</sup>。ここでは、同一鑄造条件で作製した試験片を用いて、同一負荷条件で引張試験を実施しても引張強さが大きくばらつき、高強度と低強度の試験片に分かれる傾向が確認された。これは一般的なサイズのバルク試験片ではみられない現象である。そして、その原因は、微小はんだ試験片標点部内の結晶粒数がバルク試験片に比べて少なく、組織の違いが強度に対して影響を与えやすい<sup>(2)</sup>ことにあると考えられる。

このことから著者らは、微小 SAC はんだ試験片中の初晶 Sn に着目し、その形状と分布形態が強度とどのように関連するのかを調査してきた。すなわち、引張試験を実施して引張強さとの関連を、引張り・ひずみ保持試験を実施して耐クリープ性との関連を調査してきた。その中で、試験片軸方向に対する初晶 Sn の成長方向が、引張強さと耐クリープ性に影響を及ぼすことが判明した<sup>(3)</sup>。この強度特性は、はんだ接合部の強度信頼性を担保する上で最も重要となる、耐疲労性とも深く関連する。したがって、初晶 Sn の分布形態は、微小 SAC はんだ試験片の疲労特性にも影響を及ぼすと推察される。

そこで本研究では、微小 SAC はんだ試験片を用いて、ひずみ制御の引張・圧縮繰返し負荷による疲労試験を実施し、試験中の応力-ひずみ関係と疲労寿命に対して、初晶 Sn の分布形態が与える影響について検討することとした。はんだ材の疲労寿命は、ひずみ振幅に加えてひずみ速度の影響も受ける<sup>(4)(5)</sup>。このため疲労試験は、ひず

み振幅とひずみ速度を変えた負荷条件で実施した。そして、疲労試験で得られた応力-ひずみ関係と疲労寿命に対して、初晶 Sn の分布形態がどのように影響するかについて考察した。すなわち、これまでに明らかにした初晶 Sn の分布形態と引張強さおよび耐クリープ性の関係<sup>(3)</sup>に基づいて、初晶 Sn の分布形態が疲労試験における微小 SAC はんだの応力-ひずみ関係と疲労寿命に及ぼす影響について考察した。

## 2. 実験方法

本研究では、長さ 2 mm、直径 0.5 mm の円柱状標点部をもつ微小 SAC はんだ試験片の疲労試験を、引張・圧縮繰返し負荷で行うこととした。そのために、微小試験片に対してひずみ制御による引張・圧縮繰返し負荷を確実に与えることができる試験装置を製作した。この試験装置では、負荷用のアクチュエータとして、分解能 1 nm での変位をバックラッシュなしで試験片に与えることができるピエゾアクチュエータ(メステック製, MPA-UA6S)を使用した。荷重計測部には、定格容量±100 N の低荷重用のロードセル(共和電業製, LUX-B-100N-ID)を計装用コンディショナ(共和電業製, WGA-670A)と組み合わせて用いた。試験片変位は、変位分解能 1 μm の静電容量センサ(MICRO-EPSILON 製, CS1HP)で検出し、ここで検出した値をフィードバック信号として、上記のピエゾアクチュエータを制御した。

疲労試験は、室温で実施した。表 1 に示すように、ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ は±0.5%と±1%の2種類とし、各ひずみ振幅での疲労試験は、2種類のひずみ速度  $d\varepsilon/dt=0.1\%/s$  と  $d\varepsilon/dt=1.0\%/s$  で実施した。すなわち、合計 4 種類の負荷条件での疲労試験を実施した。その際、同一負荷条件での試験を複数の試験片を用いて実施し、微小 SAC はんだの疲労寿命がどの程度のばらつきを示すのかも調査した(負荷条件 4 を除く)。疲労寿命  $N_f$  は、はんだの低サイクル疲労試験法標準(JSMS-SD-3-00)に従って算出した。

## 3. 実験結果および考察

表 2 に、本研究で実施したすべての疲労試験における疲労寿命  $N_f$  を示す。表 2 で、同ひずみ振幅でひずみ速度の異なる負荷条件 1 と負荷条件 2 の平均疲労寿命を比較すると、負荷条件 1 は 1300 サイクルに対し、負荷条件 2 の場合は 962 サイクルとなった。このように、はんだ材の疲労寿命はひずみ速度の影響を受け、同ひずみ振幅の際、速度の速い方の疲労寿命が長くなった。同様に、負荷条件 3 と負荷条件 4 の平均疲労寿命を比較すると、負

Table 1 Test conditions for cyclic tension-compression loading tests.

Loading condition number	Strain amplitude $\Delta\varepsilon$ (%)	Strain rate $d\varepsilon/dt$ (%/s)
1	±1	1
2	±1	0.1
3	±0.5	1
4	±0.5	0.1

Table 2 Fatigue life for cyclic tension-compression loading tests.

Number	Strain amplitude $\Delta\varepsilon$ (%)	Strain rate $d\varepsilon/dt$ (%/s)	Fatigue life $N_f$ (cycle)	Number	Strain amplitude $\Delta\varepsilon$ (%)	Strain rate $d\varepsilon/dt$ (%/s)	Fatigue life $N_f$ (cycle)
1	±1	1	1836	9	±0.5	1	2248
2			510	10			11300
3			1600	11			1192
4			500	12			2632
5		2054	13	6988			
6		0.1	622	14		0.1	4800
7			1062				
8			1202				

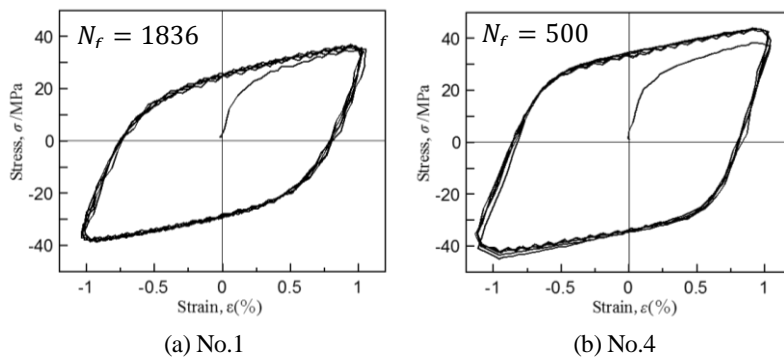


Fig. 1 Hysteresis loops for tension-compression loading test ( $\Delta\epsilon = \pm 1.0\%$ ,  $d\epsilon/dt = 1.0\%/s$ ).

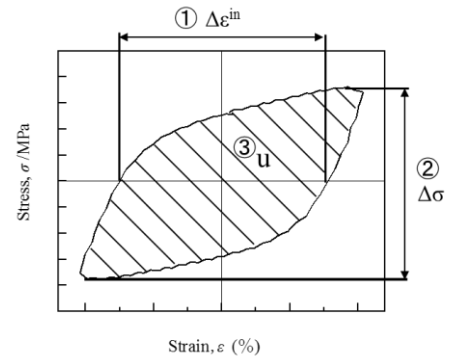


Fig. 2 Schematic of calculation of Each material property.

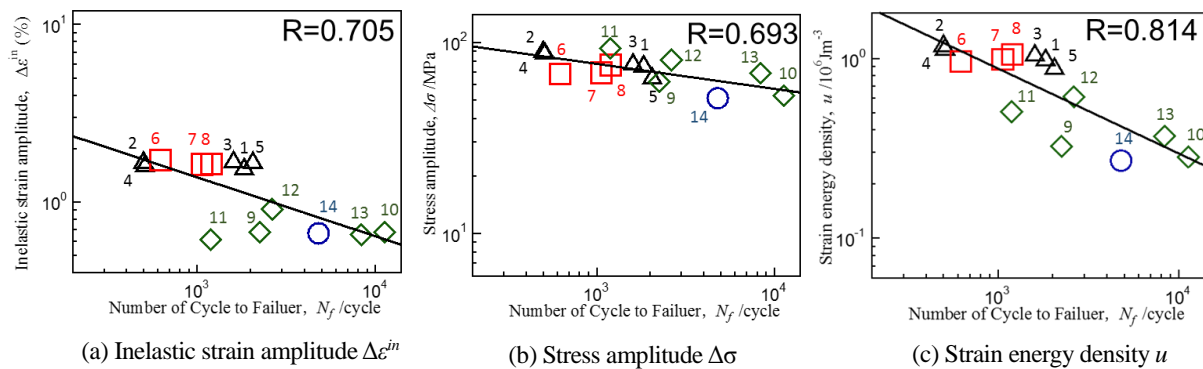


Fig. 3 Relationship between material properties and fatigue life  $N_f$

荷条件 3 は 4892 サイクルに対し、荷条件 4 では 4800 サイクルとなり、荷条件 1, 2 を比較した際と同様の傾向を示した。これは、バルク試験片で疲労試験を行った際と同様の傾向を示している<sup>6)</sup>。しかし、荷条件 1 での疲労試験に使用した 5 本の試験片の疲労寿命を比較すると、同一荷条件でも疲労寿命  $N_f$  にばらつきがみられる。例えば、No. 5 と No. 4 の間では、約 4.1 倍の差もある。次いで、荷条件 3 の 5 本の試験片に関して比較すると、荷条件 1 と同様の傾向がみられ、No. 11 と No. 10 の間では、約 9.5 倍の差もある。このように、疲労試験を行うと同一荷条件でも、疲労寿命  $N_f$  にばらつきがみられた。このような現象が発生する理由として、微小 SAC はんだ試験片中の初晶 Sn の分布形態が影響していることが考えられる。

図 1 (a), (b) は、荷条件 1 で引張・圧縮繰返し荷重試験を行った際の、No.1 と No.4 の 5 サイクル目までのヒステリシスループである。図 1(a), (b) より、どちらの試験片においても繰返しひずみ硬化が発生していることがわかる。また、このように同一荷条件であってもヒステリシスループが示す応力レベルにばらつきがみられた。応力レベルのばらつきに関しては、先行研究で得た引張強さのばらつき<sup>6)</sup>と同様の傾向を示した。

疲労試験により得られたヒステリシスループからは、一般的にはんだ材の疲労寿命評価パラメータとして用いられる非弾性ひずみ振幅  $\Delta\epsilon^{in}$  に加え、応力振幅  $\Delta\sigma$  を算出した。非弾性ひずみ振幅  $\Delta\epsilon^{in}$  と応力振幅  $\Delta\sigma$  は、それぞれ図 2 の①と②に示される範囲である。さらに、変形と熱への変化に費やした仕事を意味する、ひずみエネルギー密度  $u$  も導出した。図 2 は非弾性ひずみ振幅  $\Delta\epsilon^{in}$ 、応力振幅  $\Delta\sigma$ 、ひずみエネルギー密度  $u$  がヒステリシスループのどの部分に相当するのかわかを示したものである。ひずみエネルギー密度  $u$  は、図 2 中でヒステリシスループの面積を意味し、図 2 中のハッチングした部分の③がこれに該当する。これら全てに対し疲労寿命との関係を調査した。なお、導出する全てのパラメータは、ヒステリシスループが安定し始める 5 サイクル目のものを採用した。

図 3 に、各パラメータと疲労寿命との関係を示す。図 3(a)~(c)はそれぞれ、非弾性ひずみ振幅  $\Delta\epsilon^{in}$ 、応力振幅  $\Delta\sigma$ 、ひずみエネルギー密度  $u$  と疲労寿命  $N_f$  との関係を表している。これらの全てにおいて値が大きくなるほど疲労寿命が短くなる傾向にあった。図 3(a)より、荷条件 1 の結果をみると同一荷条件でも疲労寿命にばらつきがみられる。これは、荷条件 3 においても同様の傾向がみられ、ばらつきはより顕著であった。はんだ材はひ

ずみ速度依存性を顕著に示す材料として知られているが、図 3(b)を見ると、負荷条件 1 よりもひずみ速度が遅い負荷条件 2 の試験結果の中に、負荷条件 1 よりも応力振幅の大きいものがみられた。このような現象が発生する理由としても、微小 SAC はんだ試験片中の初晶 Sn の分布形態が影響していることが考えられる。また、図 3(c)より、疲労寿命との相関は、ひずみエネルギー密度  $u$  が最も高くなった。ひずみエネルギー密度は非弾性ひずみ振幅と応力振幅の影響を両方受けるため、両者の値が大きくなるほど、ひずみエネルギー密度の値は大きくなる。このことから、応力振幅と非弾性ひずみ振幅の影響を両方考慮することのできるひずみエネルギー密度  $u$  の相関が最も高くなったと考えられる。

ここで、引張強さ、耐クリープ性と初晶 Sn の分布形態との関係<sup>3)</sup>を踏まえて、図 3 で示したパラメータの内、応力振幅と疲労寿命の関係について検討する。同一負荷条件で応力振幅が大きいということは、同一ひずみでの応力値が大きいことを意味し、高強度な試験片に該当すると考えられる。そのため、その組織には 30~40°の初晶 Sn が少ない傾向にあると推察される。一方、同一負荷条件で応力振幅が小さいということは、同一ひずみ中でクリープひずみ量が多くなるために応力値が小さくなることを意味し、耐クリープ性が低い試験片であると考えられる。そのため、その組織には 30~40°の初晶 Sn が多い傾向にあると推察される。以上の推察と図 3(b)の応力振幅と疲労寿命の関係より、30~40°の度数が少ないということは疲労寿命が短くなると考えられる。

#### 4. 結 言

本研究では、ひずみ振幅とひずみ速度を変えた 4 種類の引張・圧縮繰返し負荷による疲労試験を行い、ヒステリシスループから得られた、非弾性ひずみ振幅、応力振幅、ひずみエネルギー密度を算出し、疲労寿命との関係を調査した。その結果、以下の結言を得た。

- (1) 微小 SAC はんだ試験片を用いて疲労試験を行ったところ、同一負荷条件であっても疲労寿命に最大で 9.5 倍のばらつきがみられ、ヒステリシスループの応力振幅にもばらつきがみられた
- (2) ヒステリシスループの応力振幅や疲労寿命にばらつきがみられた。これは先行研究における引張強さと同様の傾向を示したことになり、初晶 Sn の分布形態が影響している可能性を示唆している。
- (3) 材料パラメータと疲労寿命の関係を調査したところ、応力振幅と非弾性ひずみ振幅の影響を両方考慮することのできるひずみエネルギー密度の相関が最も高いことが分かった。
- (4) 応力振幅と疲労寿命の関係を調査したところ、同一負荷条件であっても応力振幅の値が大きいほど疲労寿命が短くなる傾向にあった。引張強さと初晶 Sn の分布形態の関係を踏まえると、30~40°の初晶 Sn が少ないと疲労寿命が短くなる傾向にあると考えられる。

#### 文 献

- (1) 大口健一, 黒沢憲吾, 石澤裕也, 荒川明, “引張強さにばらつきを示す微小 SAC はんだ試験片中の初晶 Sn の分布形態”, M&M 材料力学カンファレンス 2017 講演論文集, No17-5(2017), OS1608.
- (2) Kariya, Y., “Mechanical Reliability of Solders in Small Volume”, *Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol. 9, No. 3(2006), pp. 138-142.
- (3) 菅絢一郎, 大口健一, 福地孝平, 黒沢憲吾, “引張強さにばらつきを示す微小 SAC はんだ試験片中の初晶 Sn の分布形態”, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, No19-1(2019), J04212P.
- (4) Ohguchi, K. Sasaki, K., Yuze, Y. and Fukuchi, K., “Fatigue life estimation of SAC solder based on inelastic strain analysis using stepped ramp wave loading”, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 6, No. 5 (2019), Paper No.19-00137.
- (5) Ohguchi, K. Sasaki, K., “Investigation of Effect of Creep Strain on Low-Cycle Fatigue of Lead-Free Solder by Cyclic Loading Using Stepped Ramp Waves”, *Journal of ELECTRONIC PACKING*, Vol.132, (2010), pp. 041010-1-041010-7.