

〔(公財)スズキ財団科学技術研究助成金交付事業〕

## ミニチュア試験片を用いた電子デバイスはんだ接合部の破損寿命予測法の開発

野崎峰男

### 1 目的

電子デバイスのはんだ接合部は電源の on/off に伴い、被接合部品間の熱膨張係数の差により繰返し熱応力を受ける。さらにはんだは室温で著しくクリープを呈するため、動作中の電子デバイスのはんだ接合部は疲労とクリープによる損傷を受けることが知られている<sup>1)</sup>。これまではんだ接合部の疲労およびクリープ損傷を評価するため、はんだ試験片を用いた数々の破損寿命評価が実施されてきた<sup>2-4)</sup>。しかしはんだ接合部の寸法は約 0.1~1mm であるにもかかわらず、これらの破損寿命評価は、ほとんどが標点部の直径 10mm 程度の試験片(バルク試験片)を用いたものであった。したがってのはんだ接合部の設計への適用を目指した破損寿命評価を実施するためには、はんだ接合部とできるだけ同等寸法の試験片(ミニチュア試験片)を用いることが必要となる。

本研究では、低融点のはんだのひとつで今後適用性の拡大が期待される Sn-58Bi のクリープ疲労寿命評価法を検討し、電子デバイス Sn-58Bi 接合部のクリープ疲労寿命評価に応用するため、Sn-58Bi ミニチュア試験片を用いた完全両振対称三角波、完全両振非対称三角波、引張ひずみ保持波による 313K でのクリープ疲労試験を実施した。試験結果について、Coffin-Manson 則、線形累積損傷則、粒界すべり損傷モデル<sup>5), 6)</sup>に基づくクリープ疲労寿命評価を実施し、3つのクリープ疲労寿命評価法の Sn-58Bi ミニチュア試験片への適用性を明らかにした。なお粒界すべり損傷モデルについては、Sn-37Pb および Sn-3.5Ag バルク試験片のクリープ疲労寿命評価に有効とされている<sup>5)</sup>。

### 2 実験方法

本研究で用いた供試材の化学成分は、Bi: 58.1 (wt.)、Cu: 0.001、Sb: 0.001、Sn: 残量である。Sn-58Bi ミニチュア試験片の形状および寸法を図 1 に示す。クリープ疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機を使用し、図 2 に示す 5 種類のひずみ波形を用い 313K で実施した。全ひずみ範囲  $\Delta\epsilon_t$  は、PP 波では 0.5、0.7、1.0、1.2% の 4 レベル、CC、PC、CP、TH 波ではそれぞれ 0.7% とした。また破損繰返し数  $N_f$  は、引張応力振幅が  $1/2 N_f$  のそれから 25% 低下したときの繰返し数として定義した<sup>5)</sup>。

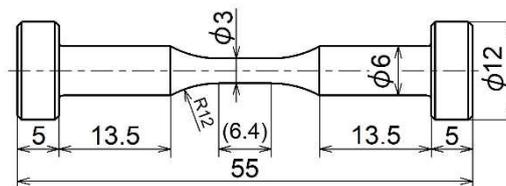


図 1 ミニチュア試験片の形状および寸法 (mm)

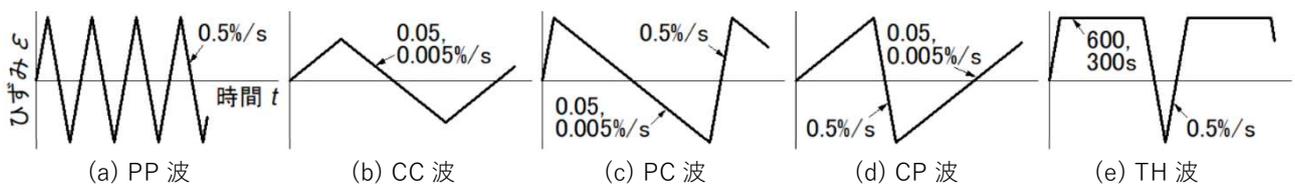


図 2 ひずみ波形

### 3 結果と考察

#### 3.1 Coffin-Manson 則

図3に各ひずみ波形における非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数との関係を示す。図において、PP波の実験結果がほぼ直線状にプロットされたことから、PP波のそれは次式で記述される Coffin-Manson 則を満足する。

$$N_f = 3.551 \times 10^2 (\Delta \epsilon_{in})^{-1.385} \quad (1)$$

Coffin-Manson 則により評価した予測破損寿命と実験破損寿命との比較を図4に示す。図よりPPおよびPC波の予測破損寿命と実験破損寿命は、係数2の範囲内で一致し、CC、CP、TH波のそれらは係数3の範囲内で整理された。

#### 3.2 線形累積損傷則

線形累積損傷則(LDR)を用いて Sn-58Bi ミニチュア試験片の疲労損傷  $\Phi_f$  およびクリープ損傷  $\Phi_c$  をそれぞれ次式より求めた。

$$\Phi_f = \sum \frac{N}{N_f}, \quad \Phi_c = \sum \frac{t}{t_r} \quad (2)$$

ここで  $N_f$  は PP 波の破損繰返し数、 $N$  は CC、PC、CP、TH 波での破損繰返し数であり、 $t_r$  および  $t$  は静クリープ破断時間およびクリープ負荷時間である。 $\Phi_f + \Phi_c = 1$  のとき試験片は破壊すると仮定して求めた予測破損寿命と実験破損寿命との比較を図5に示す。図よりそれぞれの波形で係数2~232の範囲で評価され、特にCC波では極端な安全側の評価となった。

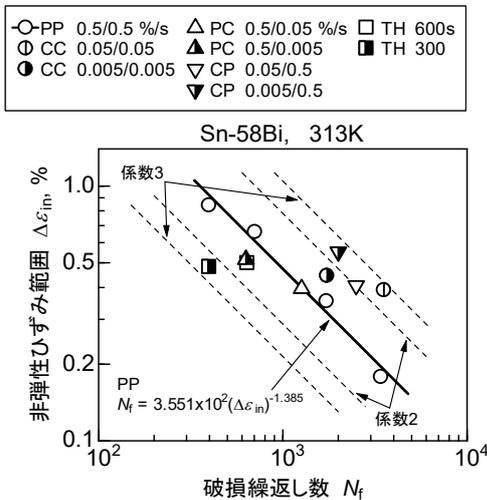


図3 非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数との関係

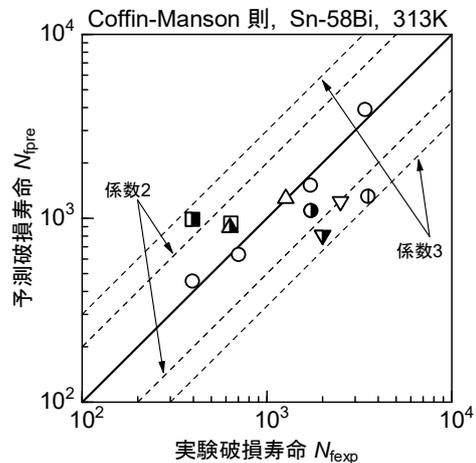


図4 Coffin-Manson 則による予測破損寿命と実験破損寿命との比較(凡例は図3に準じる)

#### 3.3 粒界すべり損傷モデル

粒界すべり損傷モデル(GBSM)は、任意のひずみ波形により負荷された材料は、図2に示す各ひずみ波形で独立に生じるそれぞれの粒界すべり量  $u_{CC}$ 、 $u_{PC}$ 、 $u_{CP}$ 、 $u_{TH}$  の和が、限界値  $u_{CR}$  に達したとき破壊するという仮定に基づいたものである。したがって粒界すべり損傷モデルに基づくクリープ疲労寿命評価則は次式で表される。

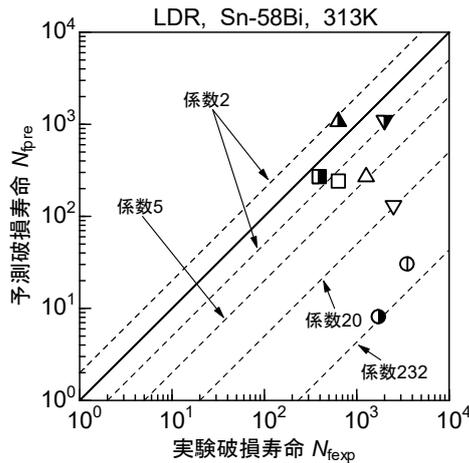


図 5 線形累積損傷則による予測破損寿命と実験破損寿命との比較(凡例は図 3 に準じる)

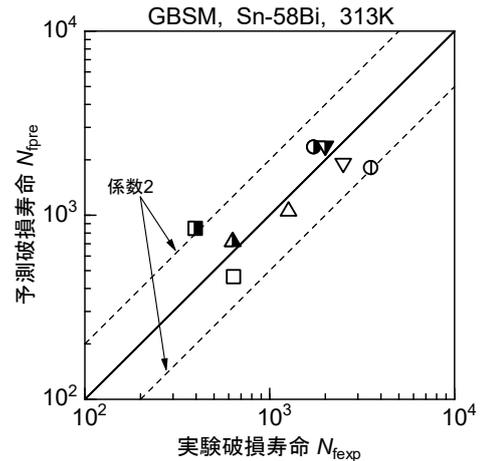


図 6 粒界すべり損傷モデルによる予測破損寿命と実験破損寿命との比較(凡例は図 3 に準じる)

$$N_f = 3.551 \times 10^2 (\Delta \varepsilon_{in})^{-1.385} \left[ 0.835 \dot{\varepsilon}_c^{0.112} + (\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_c)^{0.166} + (\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_c)^{-0.094} + e^{2.017 \times 10^{-3} t_H} \right]^{-1} \quad (3)$$

ここで  $\Delta \varepsilon_{in}$  は PP 波の非弾性ひずみ範囲、 $\dot{\varepsilon}_p$  および  $\dot{\varepsilon}_c$  はそれぞれひずみ波形の fast 部および slow 部のひずみ速度、 $t_H$  はひずみ保持時間である。式(3)で評価した Sn-58Bi ミニチュア試験片の予測破損寿命と実験破損寿命との比較を図 6 に示す。評価したすべてのひずみ波形について、予測破損寿命と実験破損寿命はほぼ係数 2 の範囲で一致した。

#### 4 結論

- (1) 全ひずみ範囲が 4 レベルの PP 波をそれぞれ負荷した Sn-58Bi ミニチュア試験片の非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数との関係は、Coffin-Manson 則を満足した。
- (2) PP 波の実験結果を示す Coffin-Manson 則を用いて PP、CC、PC、CP、TH 波の寿命予測を行った結果、PP および PC 波の予測破損寿命と実験破損寿命は、係数 2 の範囲内で一致した。また CC および CP 波のそれらは係数 3 の範囲内で安全側に、TH 波は係数 3 の範囲内で危険側に整理された。
- (3) 線形累積損傷則を用いて PP、CC、PC、CP、TH 波の寿命予測を行った結果、ほぼすべての予測破損寿命は実験破損寿命より小さく、特にひずみ速度 0.005 %/s の CC 波は係数 232 の極端な安全側の評価となった。
- (4) 粒界すべり損傷モデルに基づくクリープ疲労寿命評価法を用いて CC、PC、CP、TH 波の寿命予測を行った結果、それぞれの波形での予測破損寿命と実験破損寿命は、ほぼ係数 2 の範囲内で一致しており良好な寿命予測結果となった。

#### 参考文献

- 1) 日本溶接協会編：標準マイクロソルダリング技術，日刊工業新聞社，135 (2002)
- 2) X.J.Yang, C.L.Chow, and K.J.Lau, Int.J.Fatigue, 25, 533 (2003)
- 3) Y.Tsukada, H.Nishimura, H.Yamamoto, and M.Sakane, ASME J.Electron.Packag., 127, 407 (2005)
- 4) M.Nozaki, M.Sakane, Y.Tsukada, and H.Nishimura, ASME J.Eng.Mater.Technol., 128, 142 (2006)
- 5) 日本材料学会編：はんだのクリープ疲労試験法標準，JSMS-SD-9-04，日本材料学会 (2004)
- 6) M.Sakane, T.Shiratsuchi, and Y.Tsukada, Int.J.Fatigue, 146, Article 106132 (2021)

(問合せ先 野崎峰男)