

機関番号：84510

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560098

研究課題名（和文）電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の強度評価法に関する研究

研究課題名（英文）Creep-Fatigue Life Evaluation for Lead-Free Solder Connections in Electronic Devices

研究代表者

野崎 峰男（NOZAKI MINEO）

兵庫県立工業技術センター・技術支援部・主任研究員

研究者番号：10470238

研究成果の概要（和文）：電子機器の小型化に伴い、電子デバイスの実装密度の高度化や使用時の高発熱化が進み、電子デバイスの動作環境の苛酷さが増大している。したがって、電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の最適設計および品質保証の面から、鉛フリーはんだは強度部材としての認識が高まっており、鉛フリーはんだの高精度な強度評価法の開発が切望されている。本研究では、鉛フリーはんだの疲労試験結果に基づき、鉛フリーはんだ接合部の設計に適用するための鉛フリーはんだ疲労寿命評価法を開発した。

研究成果の概要（英文）：In recent years, operating condition of electronic devices is becoming increasingly severe due to the temperature raise with high density mounting of electronic devices. Solder connections in electronic devices are a key part for the quality assurance of electronic devices and the quality assurance of solder connection is strongly needed. Therefore, development of an accurate and efficient fatigue life estimation method applicable to solders is needed for the quality assurance of solder connections. In this study, a fatigue life estimation method for Sn-3.5Ag solder was developed based on the results of fatigue test using Sn-3.5Ag solder.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：材料力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：鉛フリーはんだ、低サイクル疲労、クリープ疲労、応力集中、相当ひずみ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、電子機器の小型化に伴い、電子デバイスの実装密度の高度化や使用時の高発熱化が進み、電子デバイスの動作環境の苛酷さが増大している。さらに、Sn-37Pb はんだに代表される従来から多用されている鉛系はんだは、鉛が環境に与える影響の重大性から使用が困難になりつつあり、電子デバイスのはんだ接合部も鉛フリーはんだへの転換が進んでいる。電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の最適設計および品質保証の面から、鉛フリ

ーはんだは強度部材としての認識が高まっており、鉛フリーはんだの高精度な強度評価法の開発が切望されている。

(2) 電子デバイスのはんだ接合部は、電源の on/off 等に伴い、接合部品（材質：銅合金、樹脂、はんだ等）間の熱膨張係数の差により繰返し熱応力を受ける。はんだ接合部の形状は、はんだ付けの際、素子からのリードおよび基板側のランド等の被接合物の形状の影響によりフィレットや切欠きを有する場合が多い。

さらに、はんだは常温で著しくクリープを呈する材料である。したがって、動作中の電子デバイスのはんだ接合部は、応力集中部にクリープ疲労負荷(クリープおよび疲労に起因する損傷を同時に与える負荷)を受けており、はんだ接合部の品質保証のためには、応力集中部に関するクリープ疲労寿命評価法を開発することが必要である。しかし、これまで、応力集中を伴うはんだ接合部のクリープ疲労寿命評価法に関する実験的研究はあまり実施されていない。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では、応力集中を伴うはんだ接合部のクリープ疲労寿命評価に適用するために、Sn-3.5Ag はんだの環状切欠き試験片を用いたクリープ疲労試験を実施した。得られた実験結果から、クリープ疲労下での Sn-3.5Ag はんだのき裂発生、き裂伝ばおよび破損寿命に及ぼす応力集中係数およびひずみ波形の影響を明らかにすることを目的とした。

(2) (1)で明らかにした応力集中係数およびひずみ波形の影響を定量化し、Sn-3.5Ag はんだのき裂発生、き裂伝ばおよび破損寿命についての評価式の提案を目指した。

(3)耐熱鋼等における高温強度評価でよく使用されている線形累積損傷則は、Sn-3.5Ag はんだには適用できないことの根拠を(1)での実験結果より明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1)本研究で用いた環状切欠き試験片(弾性応力集中係数  $K_t=2.6, 4.2$  および  $6.0$ )の形状および寸法を図1に示す。試験片は、Sn-3.5Ag はんだの延べ棒をステンレス製の鋳型によって直径50mm、長さ200mmのインゴットに铸造(大気中594K、空冷)し、図1の形状・寸法に切削加工した。さらに、組織安定化のため試験直前に試験片の熱処理(大気中430K×1時間、空冷)を行った。

(2)標点部中央に切欠き部が位置するよう伸び計を取付け、電気油圧サーボ疲労試験機により標点距離10mmでの公称ひずみ制御のクリープ疲労試験を実施した。ここで公称ひずみとは、切欠き部を含む標点間の変位を標点距離で除した値である。試験に用いたひずみ波形を図2に示す。ひずみ波形は、高速変形部、低速変形部および引張ひずみ保持部で構成される5種類(pp波、cc波、pc波、cp波およびth波)のものをを用いた。公称全ひずみ範囲( $\Delta\epsilon_t$ )は、すべての試験で0.3%とした。試験温度は313K、大気中とし、試験片はプルロッドに巻きつけた100Wのバンドヒータにより間接的に加熱した。また、試験中の試験片標点部の温度変

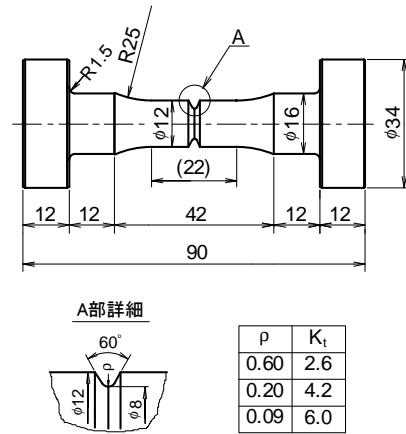


図1 試験片の形状および寸法(mm)

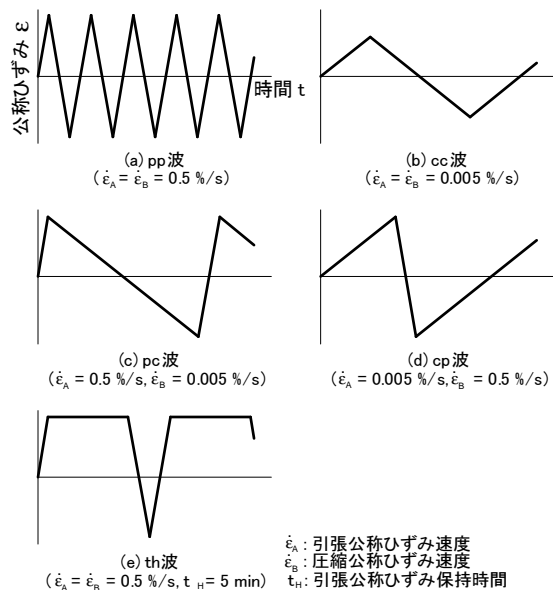


図2 ひずみ波形

動は、 $\pm 1K$ 以内であった。

(3)本研究では、クラックメータを用いた電位差法によりき裂発生繰返し数( $N_c$ )を検出した。クラックメータは交流電流を用いており、電流供給用のリード線から0.5A、392Hzの交流電流を試験片に通電し、切欠き端部間の電位差をリード線により検出するものである。

## 4. 研究成果

### (1)き裂発生、き裂伝ばおよび破損繰返し数に及ぼす切欠き形状およびひずみ波形の影響

図3に1例として、クラックメータで検出したpc波での繰返しに伴う切欠き端部間の電位差の変化を示す。ここで図中の $V_{max}$ とは、1サイクル中で引張最大公称ひずみ時の電位差である。図3より、試験開始からき裂発生までの $V_{max}$ は、ほぼ一定であるが、き裂の発生後は増加することがわかる。本研究では、

$V_{max}$ が増加し始める繰返し数として $N_c$ を定義し、き裂伝ば繰返し数( $N_p$ )は、 $N_p = N_f - N_c$ で算出した。ここで、 $N_f$ は破損繰返し数で、引張側応力振幅が $1/2 N_f$ 時のそれから25%低下したときの繰返し数として定義した。

図4に、 $N_c$ 、 $N_p$ および $N_f$ に及ぼす $K_t$ およびひずみ波形の影響を示す。ここで、 $K_t=1.0$ の $N_f$ は、過去に実施した平滑材の低サイクル疲労およびクリープ疲労試験結果を外挿して求めた。なお、図4で $N_p$ は $N_f$ とのデータの位置がほとんど重なったため、ドット(●)で位置を示している。図4から、 $N_f$ に占める $N_c$ の割合が非常に小さいことから、破損寿命のきわめて初期にき裂が発生していることがわかる。 $K_t$ の増加に伴い $N_c$ はすべての波形で著しく減少しており、 $N_p$ および $N_f$ は、pp、ccおよびpc波については減少傾向であるが、cpおよびth波では $K_t$ の大きいところでわずかに増加する傾向が見られた。

### (2)繰返し数に伴うき裂長さの変化

本研究では、式(1)を用いることにより、図3で示される繰返し数に伴う切欠き端部間の電位差の変化をき裂長さの変化に換算した。ここで、き裂長さ( $a$ )とは、環状切欠き試験片の試験片内部方向へのき裂深さである。

$$\frac{V_{max}}{V_0} = 1 + 18.0 \left( \frac{a}{2R} \right)^{1.88} \quad (1)$$

式(1)で、 $V_0$ は実験前の無負荷時での電位差、 $R$ は切欠き底最小断面の半径である。

式(1)より得られたき裂長さと繰返し数との関係を図5に示す。各ひずみ波形で、繰返し数の増加に伴い、き裂長さはほぼ線形に単調増加した。また、き裂長さの増加の割合は、pp波の $K_t=6.0$ を除き、各ひずみ波形であまり $K_t$ 依存していない。

### (3)有限要素法による切欠き底断面のひずみ解析

本研究では、切欠き底断面のMises型相当ひずみ分布を汎用有限要素プログラムMARCにより評価した。図6に解析に用いたの要素分割図の1例を示す。使用した要素は、ガウス積分点 $3 \times 3$ の8節点アイソパラメトリック軸対称要素である。

解析で用いた繰返し応力-ひずみ関係は、平滑材のpp波での応力-ひずみ関係を多直線近似したものである。なおヤング率は、35MPa、ポアソン比は0.3とし、硬化則にはMARC複合則を使用した。また、クリープ構成関係は、図7に示すように、平滑材のth波のひずみ保持期間中の応力の変化からNorton則の定数を求めた次式を用いた。

$$\dot{\epsilon}_c = 1.329 \times 10^{-12} \sigma^{6.235} \quad (\dot{\epsilon}_c : s^{-1}, \sigma : MPa) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_c$ はクリープひずみ速度である。

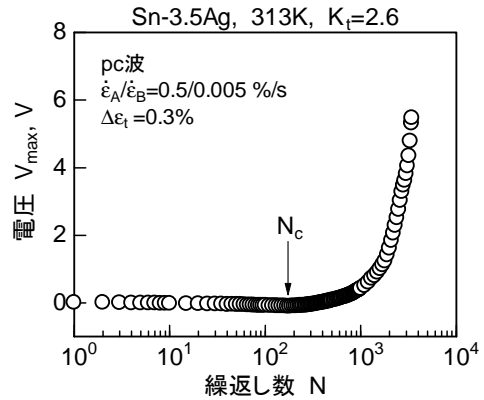


図3 繰返し数に伴う電圧の変化の例

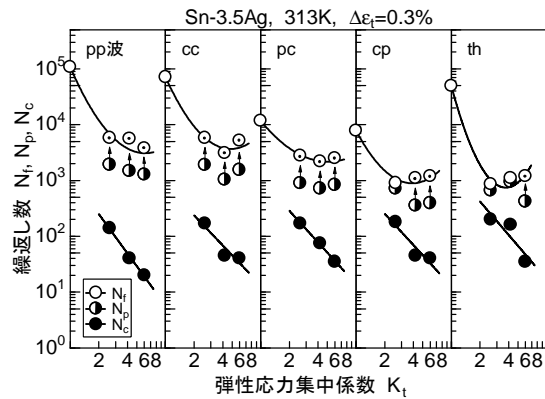


図4 き裂発生、き裂伝ばおよび破損寿命に及ぼすひずみ波形の影響

図7で、クリープ疲労試験結果から得られた $\dot{\epsilon}_c$ (式(2))は、クリープ試験結果から得られたそれよりも大きい。このことは、Sn-3.5Agはんだのクリープ疲労では、疲労損傷がクリープ損傷に影響を及ぼすことを表している。したがって、疲労損傷とクリープ損傷の線形和で表現される線形累積損傷則は、Sn-3.5Agはんだには適用できないことを示すものである。

有限要素法の負荷条件は、図6の上端ABを図2に示したひずみ波形に従い3サイクル分変位させたものである。なお、節点Aは伸び計の先端が接触する点に対応している。

有限要素法により得られた切欠き底断面のMises型相当ひずみ範囲( $\Delta\bar{\epsilon}$ )分布を図8に示す。図より、どのひずみ波形においても切欠き底からの距離0~約1mmの範囲で、 $\Delta\bar{\epsilon}$ が著しく大きくなった。このことにより、切欠き底断面における切欠き底からの距離0~約1mmの環状部分のが、環状切欠き試験片のき裂発生、き裂伝ばおよび破損繰返し数に主として関与すると推察される。

### (4)Mises型平均ひずみ範囲を用いたき裂発生、き裂伝ばおよび破損繰返し数の予測

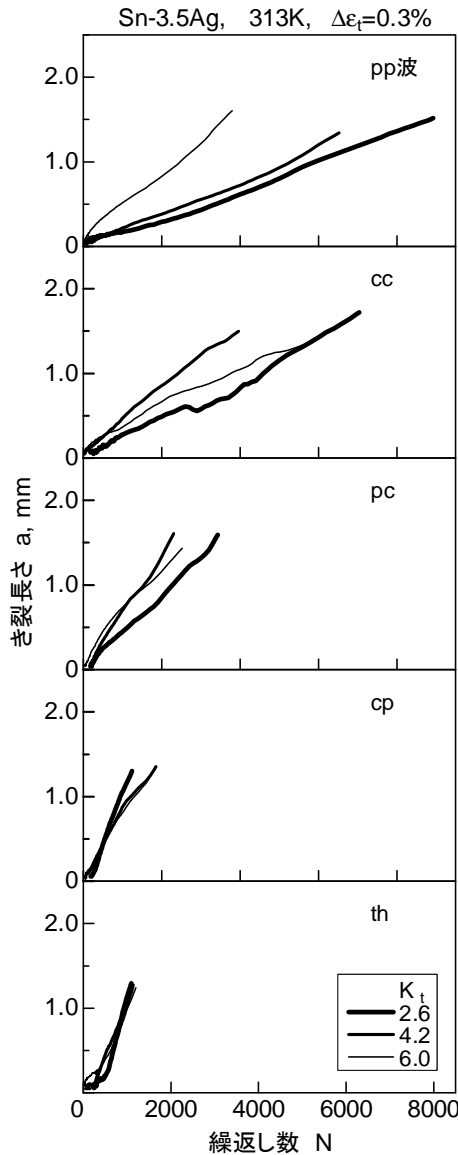


図5 き裂長さと繰返し数との関係

本研究では、 $N_c$ 、 $N_p$  および  $N_f$  の整理および予測を行うため、ひずみに関するパラメータとして次式で定義される Mises 型平均ひずみ範囲 ( $\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda i}$ ,  $i=c$  or  $f$ ) を導入した。

$$\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda i} = \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} \Delta\bar{\epsilon} d\lambda \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{\bar{a}_i}{R} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{a}_c$  ( $=0.056$  mm) および  $\bar{a}_f$  ( $=1.194$  mm) はそれぞれ式(1)で求めたき裂発生および破損繰返し数でのき裂長さの平均である。また、 $R$  ( $=4$  mm) は切欠き底断面の半径である。

図9に pc 波で  $K_t=2.6$  における  $\Delta\bar{\epsilon}$  と  $\lambda$  との関係を一例として示す。図9を参考に、繰返し数が  $N_c$  および  $N_f$  時におけるそれぞれのき裂長さと  $\Delta\bar{\epsilon}$  の分布との対応関係を考慮

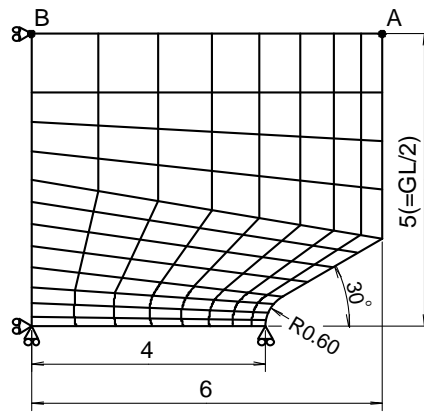


図6 要素分割図( $K_t=4.2$ )

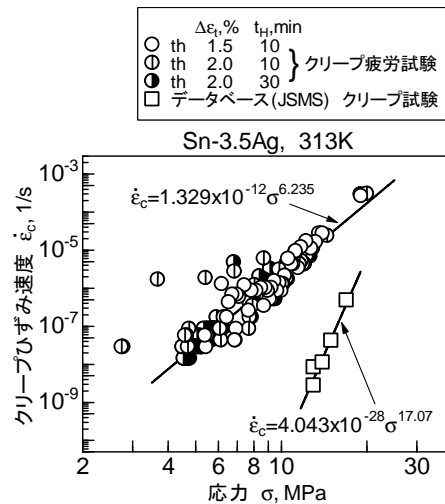


図7 クリープ構成関係

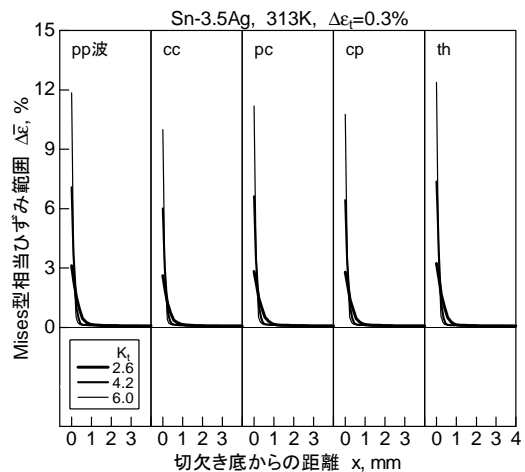


図8 切欠き底断面の Mises 型相当ひずみ範囲分布

すると、き裂発生に主として関与している  $\Delta\bar{\epsilon}$  の分布領域は、 $\lambda=0 \sim \lambda_c$  の範囲で、破損に関与する領域は  $\lambda=0 \sim \lambda_f$  と考えることができる。

図 10 に  $N_c$  を  $\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda_c}$  で、 $N_f$  を  $\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda_f}$  で整理したものを示す。図 10(a) では  $K_t$  ごとにデータ点が集まっており、また、あまりひずみ波形の影響は見られない。したがって、 $N_c$  はひずみ波形よりも  $K_t$  に依存している。しかし、図 10(b) では、データ点は  $\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda_f}=1.0\%$  付近にあり、ひずみ波形ごとの集団を形成している。このことは、 $N_f$  は  $K_t$  よりもひずみ波形に依存していることを示すものである。

これらの考察から本研究では、 $\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda_i}$  ( $i=c$  or  $f$ ) を使用し、 $N_c$  を算出するときには  $K_t$  の影響が強く現れ、 $N_f$  を算出するときにはひずみ波形の影響が強く現れるような  $N_c$  および  $N_f$  の評価式(式(5)、(6))を提案する。

$$N_i = 1.031 \times 10^4 (\Delta\bar{\epsilon}_{\lambda_i})^{-1.947} \cdot W \quad (5)$$

$$W = 1.01(\dot{\epsilon}_c)^{0.0169} + (\dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_c)^{-0.444} + (\dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_c)^{-0.551} + 0.683 \exp(-39.2t_H) + 0.317 \quad (6)$$

ここで、 $W$  はひずみ波形による平滑材の  $N_f$  の低下率を示し、過去に実施した Sn-3.5Ag はんだ平滑材のクリープ疲労試験結果に基づく値である。なお pp 波での  $N_i$  は、式(5)で  $W=1$  として求めた。また、 $N_p$  の算出には実験と同様に次式を用いた。

$$N_p = N_f - N_c \quad (7)$$

図 11 に式(5)~(7)より予測した  $N_c$ 、 $N_p$  および  $N_f$  とそれぞれの実験値を比較したものを示す。図 11(a) で  $N_c$  の予測値と実験値は、pc、cp および th 波はほぼ係数 2 の範囲内で整理できたが、pp および cc 波は係数 10 付近の危険側に整理された。また、図 11(b) より  $N_p$  の予測値と実験値は、pc および cp 波は係数 2 の範囲で整理され、pp、cc および th 波は係数 2 から 6 までの危険側に整理された。さらに、図 11(c) より  $N_f$  の予測値と実験値は、pc および cp 波は係数 2 の範囲内で整理されたが、pp、cc および th 波は係数 2 から 5 までの危険側に整理された。

### (5)まとめ

本研究成果は、電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の疲労寿命設計に適用されるものである。鉛フリーはんだ接合部の疲労寿命に及ぼす同接合部の応力集中およびひずみ波形の影響を鉛フリーはんだ単体の疲労試験結果から定量化し、鉛フリーはんだ単体の疲労寿命評価式を提案した研究は、本研究以外に見当たらない。

今後の展望としては、鉛フリーはんだの破損寿命の予測精度をさらに向上させることを目的とし、本研究とは異なった切り口で鉛フ

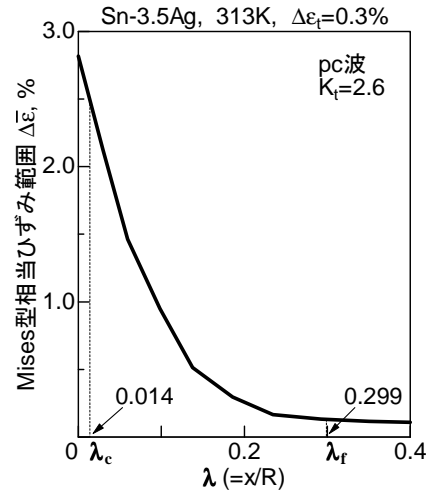
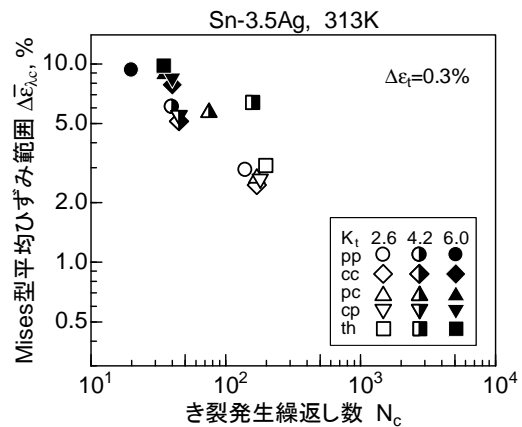
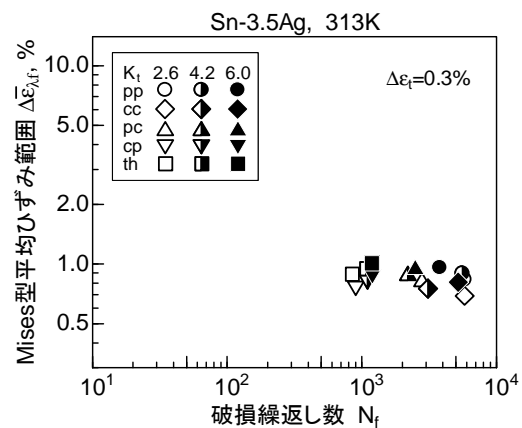


図 9 Mises 型相当ひずみ範囲と  $\lambda$  との関係



(a) き裂発生寿命



(b) 破損寿命

図 10 Mises 型相当ひずみ範囲と寿命との関係

リーはんだの疲労寿命評価法を開発することである。具体的には、本研究で用いた環状切欠き試験片による破壊力学のパラメータとき裂伝ば速度の関係を求め、鉛フリーはんだの疲労寿命評価に応用することを予定している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Mineo Nozaki, Shengde Zhang, Masao Sakane, Kaoru Kobayashi, Notch Effect on Creep-Fatigue Life for Sn-3.5Ag Solder, Engineering Fracture Mechanics, Vol.78, No.6, 2011 年, pp.1794~1807, 査読有
- ② 野崎峰男, 7 電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の強度評価に関する研究、兵庫県立工業技術センター研究報告書、第 19 号、2010 年、p.11~12、査読無
- ③ 野崎峰男, 25 電子デバイスの鉛フリーはんだ接合部の強度評価に関する研究、兵庫県立工業技術センター研究報告書、第 18 号、2009 年、p.41~42、査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① Mineo Nozaki, Shengde Zhang, Masao Sakane, Kaoru Kobayashi, Multiaxial Study of Notched Component of Sn-3.5Ag Solder in Creep-Fatigue, The Ninth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture (ICMFF9), 2010 年 6 月 7 日、パルマ大学(イタリア)
- ② 野崎峰男, 坂根政男, 小林 馨, Sn-3.5Ag はんだ切欠き材のクリープ疲労寿命評価法、日本材料学会第 46 回高温強度シンポジウム、2008 年 12 月 4 日、登別グランドホテル

[その他]

- ①アウトリーチ活動状況
  - ・野崎峰男、材料強度評価に基づく製品化事例、高専&工技センターものづくり支援セミナー in 明石、明石市・明石高専ものづくり連携事業、2010 年 1 月 28 日、明石市産業交流センター
  - ・野崎峰男、破壊試験による材料評価について、加古川ものづくり塾技術研修会、加古川市主催、2011 年 1 月 20 日、加古川市民会館

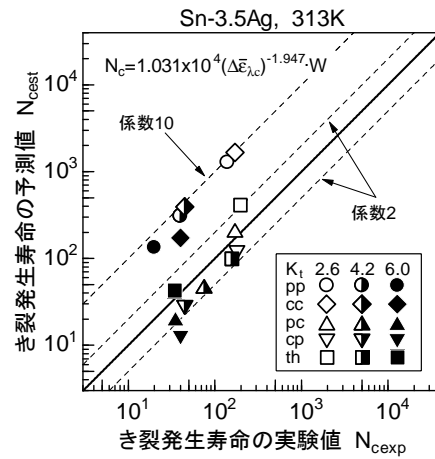
6. 研究組織

(1) 研究代表者

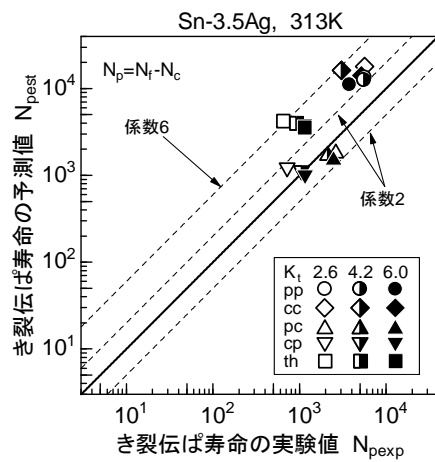
野崎 峰男 (NOZAKI MINEO)  
 兵庫県立工業技術センター・技術支援部・主任研究員  
 研究者番号：10470238

(2) 連携研究者

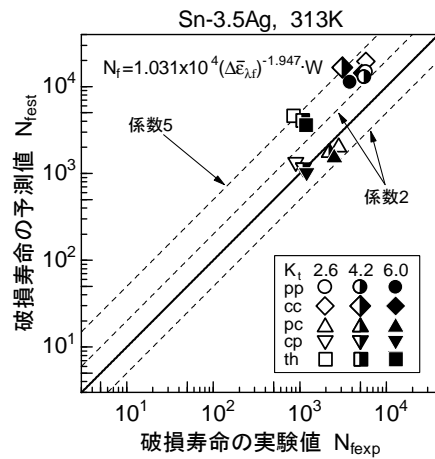
坂根 政男 (SAKANE MASAO)  
 立命館大学・理工学部・教授  
 研究者番号：20111130



(a) き裂発生寿命



(b) き裂伝ば寿命



(c) 破壊寿命

図 11 Mises 型平均ひずみ範囲による寿命予測値と実験値との比較