

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420005

研究課題名(和文) 微細はんだ接続部のクリープ・ラチェット挙動解析による品質保証HALT法の開発

研究課題名(英文) Development of HALT Method for Assuring Strength Reliability of Micro Solder Joint Based on Analysis of Creep and Ratchetting Behavior

研究代表者

大口 健一 (Ohguchi, Ken-ichi)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30292361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器のはんだ接続部の強度信頼性は熱サイクル試験により担保されているが、その実施には長期間を要する。このため、強力な熱負荷と振動を製品が壊れるまで与えてその弱点を短期間で洗い出す超加速限界試験(HALT)を熱サイクル試験の加速試験とすることが望まれている。その実現のためには、HALTにおけるはんだ接続部の変形を有限要素解析(FEA)で把握する必要がある。そこで本研究では、HALTの高精度FEAを実行するために、微小はんだとCu/Sn系金属間化合物の変形特性を調査した。また、汎用FEAソフト用の高精度ソルバを作成し、HALTで生じ得るラチェット変形のシミュレーションが実行できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The strength reliability of solder joints in electronic equipment is evaluated by conducting a long-term heat cycle test. Recently, highly accelerated limit test (HALT), which employs a severe loading condition which combines thermal shock and strong vibration to reveal weak points of electronic equipment in a short-term, is expected to be conducted as an accelerated test of the heat cycle test. However, it has not been achieved yet because the deformation behavior of solder joint in HALT has not been clarified. Then, in this study, to conduct the high-accurate FEA of solder joints in HALT, both deformation behaviors of small-sized solder and Cu/Sn intermetallic compounds were investigated. In addition, the solver for a commercial FEA software was developed by employing a high-accuracy constitutive model for solder alloys. The solver could successfully describe the ratchetting deformation of solder joint which will occur in HALT.

研究分野：工学

キーワード：はんだ接続部 超加速限界試験(HALT) クリープ ラチェット Cu/Sn系金属間化合物

### 1. 研究開始当初の背景

電子実装基板の設計・開発では、強度信頼性の確保と開発期間の短縮化が同時に求められている。電子実装基板の強度信頼性は、最終的には実機を用いた品質保証試験で検証される。そのうち熱サイクル試験は、電子実装基板の強度信頼性を左右する、はんだ接続部の耐熱疲労性を担保する試験である。特に、微細化が進んだ現在のはんだ接続部には、従来よりも厳しい条件での負荷が作用するため、熱サイクル試験は最重要視されている。しかし、その実施には長時間を要し、最近では開発期間の長期化の要因とされている。

このため、米国やアジア諸国では、熱サイクル試験を含む品質保証試験を止め、超加速限界試験(HALT)に基づく設計手法を採用する動きがある。HALTは、品質保証試験とは異なり、強力な熱負荷と振動を製品が壊れるまで与え、製品の強度的な弱点を短期間で洗い出す試験である。すなわち、HALTに基づく設計手法とは、洗い出された弱点つぶしを繰り返すことで頑健な製品を実現しようとするものである。しかし、日本では、HALTは信頼性理論の裏付けが乏しいと考えられており、積極的な導入には至っていない。

### 2. 研究の目的

HALTに基づく設計手法により作り出される頑健な製品は、過剰品質の製品ともいえ、小型化・軽量化には対応しにくい。またHALTでは、通常の使用環境では想定できない過度の負荷を与えるため、様々な箇所故障が頻発し、高密度電子実装基板の品質保証で最重要視されている、微細はんだ接続部の耐熱疲労性を正確に評価できない可能性がある。

以上のような問題を有するものの、HALTの試験時間の短さは、電子実装基板の開発期間を短縮する上で大きな利点となる。すなわち、熱サイクル試験の加速試験としてHALTを応用することができれば、高強度信頼性の付与と開発期間の短縮を両立させる、電子実装基板の新たな開発方法の提案につながる。これを実現するには、熱サイクル試験の合格基準に相当するHALT応用型の品質保証試験の合格基準を定める必要がある。そして、そのためには微細はんだ接続部の有限要素解析(FEA)を正確に実施することが必須となる。

そこで本研究では、微細はんだ接続部の有限要素解析(FEA)を高精度で実施するための材料特性データの収集ならびにソルバの作成を行った。また、熱サイクルに振動を重畳するHALTでは、ラチェット変形の発生が予想されることから、作成したソルバのラチェット変形の記述能力を検証した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 材料特性データの収集

微細はんだ接続部の有限要素解析(FEA)を高精度で実行するには、はんだの変形特性を微小試験片で調査する必要がある。微細はんだ

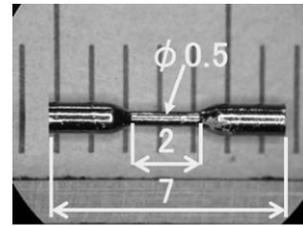


図1 微小 SAC はんだ試験片

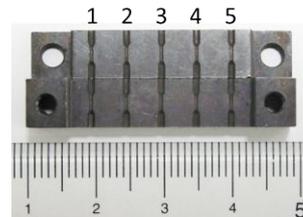


図2 試験片作製の鋳型

だ接続部の FEA では、Cu/Sn 系金属間化合物 (IMCs) の存在を考慮する必要があるため、IMCs の変形特性も調査する必要がある。

そこで、Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC) はんだを用いて図 1 に示す形状の微小試験片を作製し、その引張試験を実施した。また、微小はんだ試験片の外側に、Cu<sub>3</sub>Sn と Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> から構成される Cu/Sn 系 IMCs 層と Cu 層を設けた微小複合材料型はんだ試験片 (MCS 試験片) の引張試験を行い、Cu/Sn 系 IMCs の変形特性も調査した (発表雑誌論文 )。

微小はんだ試験片は、図 2 に示す鋳型を用いて、同時に 5 本鋳造した。MCS 試験片は、電解銅めっきを施した微小はんだ試験片を真空封入し、それを 180 に保持したマッフル炉内に一定時間置くことで作製した。炉内保持時間は、36h、48h、60h の 3 種類とした。

#### (2) FEA 用ソルバの作成・性能評価

微細はんだ接続部の FEA を高精度で実行するためには、はんだの非弾性変形が正確に記述できる構成モデルを用いることが必須となる。そこで、研究代表者が提案している弾・塑性・クリープ構成モデルの応力積分アルゴリズムを構築し、これに基づいて汎用 FEA ソフト ANSYS Ver. 15.0 用のユーザサブルーチンプログラム usermat を作成した。作成した usermat の有用性は、軸応力を重畳した繰返しせん断変形のシミュレーションを実施し、実験と比較することで検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) 微小はんだ試験片の強度と組織

図 3 は、ひずみ速度  $1.0 \times 10^{-2} \% / s$ 、室温の条件で実施した引張試験で得た、微小 SAC はんだ試験片の応力 - ひずみ曲線である。図 3 には、同時に鋳込んだ 5 本の試験片の応力 - ひずみ曲線を示してある。図中の番号は、図 2 の鋳型写真で鋳込み位置を示す番号に対応している。図 3 から、微小 SAC はんだ試験片の応力 - ひずみ曲線は、同負荷条件であっても、ばらつきを示すことがわかる。同様の比較を、ほかの鋳造作業 2 回で得た試験片 (5 本

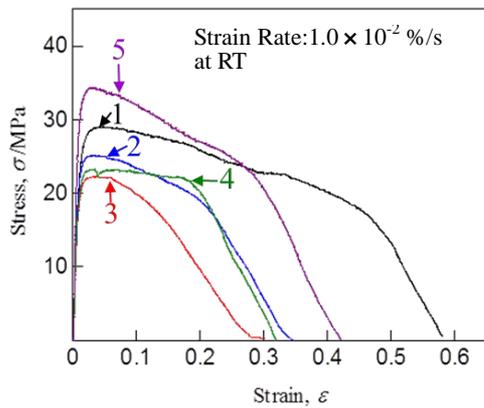


図3 微小はんだ試験片の応力 - ひずみ曲線

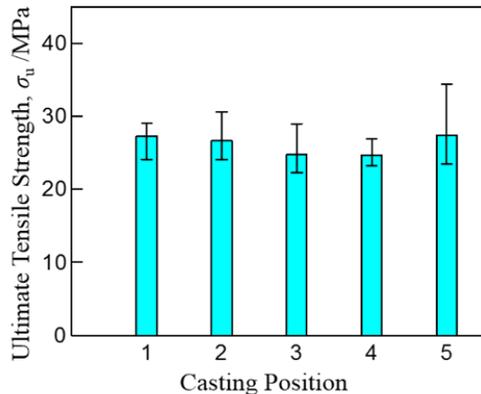


図4 引張強さの鑄込み位置による比較

×2=10本)についても行ったところ、図3と同様のばらつきが認められた。

図4は、3回の鑄造作業で作製した試験片の引張強さを、鑄込み位置毎に示したものである。エラーバーは最大値と最小値を示している。図4より、いずれの鑄込み位置でも引張強さにばらつきがあることがわかる。また、各鑄込み位置における引張強さの平均値を比較すると、平均引張強さには、大きな差はないこともわかる。

図3, 4でみられる強度のばらつきは、バルクはんだ試験片ではみられず、これは微小はんだ試験片の特徴といえる。この原因としては、微小はんだ試験片は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ことが考えられる。そこで、引張試験後の微小SACはんだ試験片の組織を調査し、その結果を強度の高低で比較した。組織は、初晶Snの形状とその分布形態に着目して調査した。すなわち、組織画像を二値化して画像中の各初晶Snの形状を抽出し、その形状を楕円近似した(図5参照)。そして、各近似楕円の長軸長さ、長軸の方位をデータ出力し、これらのデータを比較することで、強度と初晶Snの形状および分布形態との関係を調査した。なお、方位は引張方向を0°として求めた。

すべての試験片の断面を調査した結果、いずれの試験片においても、長軸長さが10~15μmの初晶Snが最も多いことが判明した。そこで、長軸長さが10~15μmの初晶Snに着目し、その方位を各試験片において0~90°

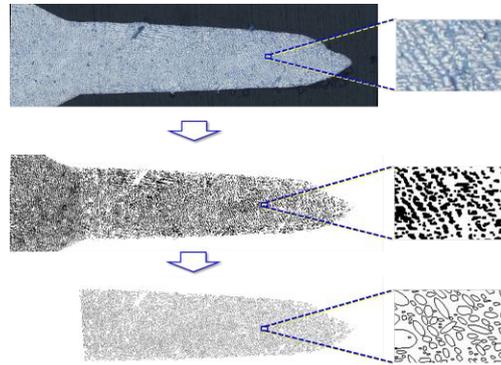
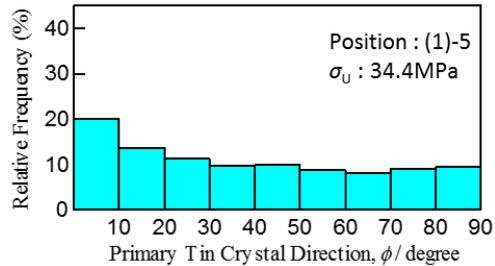
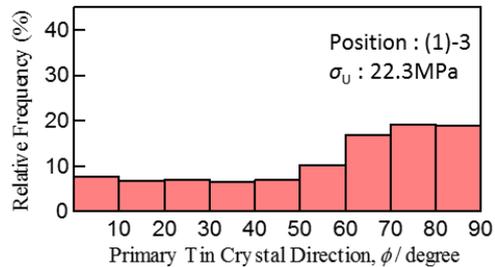


図5 画像処理方法



(a) 図3の最高強度試験片



(b) 図3の最低強度試験片

図6 初晶Sn(10~15μm)の方位ヒストグラム

の範囲で10°幅刻みに度数を求め、相対度数をヒストグラムで表した。その結果の一例を図6に示す。図6(a)と(b)はそれぞれ、図4で最高強度と最低強度を示した試験片のヒストグラムに相当する。図6で(a)と(b)を比較すると、高強度試験片では、0~10°の方位の初晶Snが多いのに対し、低強度試験片では70~90°のものが多いことがわかる。すべての試験片のヒストグラムを高強度と低強度のグループに分け、各グループで度数分布の特徴を調査したところ、初晶Sn方位は低強度の試験片では高方位角のものが多いのに対し、高強度試験片では低方位角のものが多いことが判明した。このことは、初晶Snを適切に配置すれば、微細はんだ接続部が強化できることを示唆している可能性がある。

#### (2)Cu/Sn系IMCsの引張特性

微小複合材料型はんだ試験片(MCS試験片)の引張試験は、変位速度20μm/s、室温の条件で実施した。図7に36h、48h、60hの熱処理時間で作製したMCS試験片の応力-ひずみ曲線を示す。図7には、MCS試験片と同じ180°で一定時間(36h、48h、60h)保持する熱処理を施した微小SACはんだ試験片の応力-

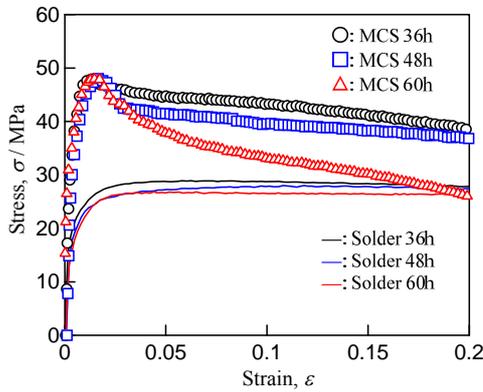


図7 MCS試験片の応力 - ひずみ曲線

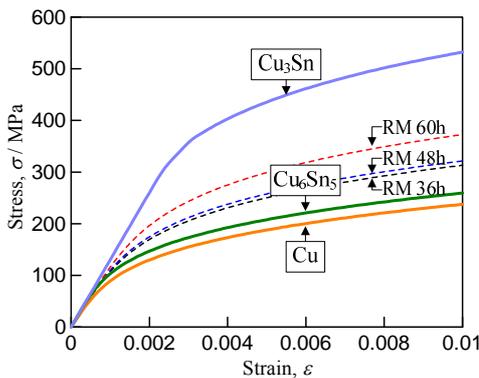


図8 Cu/Sn系 IMCsの応力 - ひずみ曲線

ひずみ曲線も示してある．図7で，MCS試験片の応力 - ひずみ曲線は，いずれも微小はんだのものよりも高い応力レベルにある．このことと熱処理の施された微小はんだ試験片がMCS試験片の芯材に相当することを考慮すれば，MCS試験片は，はんだをCu/Sn系IMCsとCuで強化した複合材料とみなすことができる．

図7からは，MCS試験片の応力 - ひずみ曲線は，いずれも約1%のひずみで引張強さを示すこともわかる．破断後の試験片を観察したところ，試験片の破断はIMCs層，Cu層，はんだの順で生じていることが判明した．ここでIMCsの破断は，くびれの発生を伴わない脆性的なものであった．また，熱処理時間を変えると，IMCs層中のCu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の面積比は変化するが，MCS試験片の一樣伸びに熱処理時間の影響はみられなかった．これらのことを考慮すると，MCS試験片の一樣伸びは，Cu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の破断伸びに相当すると考えられる．複数のMCS試験片について一樣伸びを調査した結果，その平均値は1.4%であった．このことから，Cu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の破断伸びは，1.4%程度と考えられる．

上述のように，MCS試験片は，はんだを母Cu/Sn系IMCsとCuで強化した複合材料とみなすことができる．そこでMCS試験片の引張試験結果に等ひずみ型の複合則を適用するなどして，Cu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の応力-ひずみ曲線の導出を試みた．図8に，導出したCu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の応力-ひずみ曲線を示す．導出方法の詳細は，発表雑誌論文を参照されたい．

図8から，Cu<sub>3</sub>Snの方がCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>よりも高強度であることがわかる．また，Cu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>の応力 - ひずみ曲線は，非線形性を示している．このことから，Cu<sub>3</sub>SnとCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>は塑性変形能を有する可能性のあることが判明した．

### (3) 汎用FEA解析ソフト用ソルバの作成

汎用FEAソフトANSYS Ver. 15.0のソルバに，報告者が構築した弾・塑性・クリープ構成モデルを組み込んでFEAを実行するために，ユーザサブルーチンプログラムusermatを作成した．弾・塑性・クリープ構成モデルでは，全ひずみ $\epsilon$ を弾性ひずみ $\epsilon^e$ ，塑性ひずみ $\epsilon^p$ ，クリープひずみ $\epsilon^c$ の和で表す．ここでは，塑性ひずみ $\epsilon^p$ とクリープひずみ $\epsilon^c$ を，それぞれ離散化して，以下のように表した．

$$\epsilon_{i+1}^p = \epsilon_i^p + \Delta\epsilon^p \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\epsilon_{i+1}^c = \epsilon_i^c + \Delta\epsilon^c \dots\dots\dots (3.2)$$

式(3.1)，(3.2)で添え字*i*と*i+1*は，現計算ステップの始点と終点を表す． $\Delta\epsilon^p$ と $\Delta\epsilon^c$ は，それぞれ，現計算ステップにおける塑性ひずみ増分とクリープひずみ増分である．

塑性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^p$ は，次式で表す．

$$\Delta\epsilon^p = \frac{3}{2\bar{\sigma}_{i+1}^p} \frac{\Delta\bar{\sigma}^p}{H'} (s_{i+1} - b_{i+1}) \dots\dots\dots (3.3)$$

式(3.3)で*s*は偏差応力，*b*は背応力の偏差成分である． $\bar{\sigma}^p$ は， $\bar{\sigma}^p = \sqrt{3/2}(s-b) : (s-b)$ で与えられるスカラー量であり， $\Delta\bar{\sigma}^p$ はその増分である．また，*H'*は相当塑性ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}^p$ と $\Delta\bar{\sigma}^p$ の関係を与える塑性接線係数である．背応力の偏差成分*b*は次式で表す．

$$b_{i+1} = b_i + 2/3 H' \Delta\epsilon^p \dots\dots\dots (3.4)$$

式(3.3)，(3.4)中の*H'*は，次式で表す．

$$H' = \frac{D}{m\epsilon_0} \left( \frac{\bar{\sigma}}{D} \right)^{1-m} \dots\dots\dots (3.5)$$

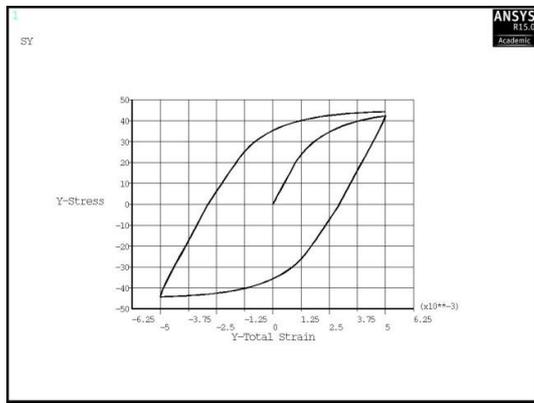
式(3.5)で $\bar{\sigma}$ はMisesの相当応力，*D*は応力 - 弾塑性ひずみ曲線で $\epsilon_0 = 5.00 \times 10^{-4}$ の塑性ひずみに対応する応力，*m*は硬化指数である．

式(3.2)のクリープひずみ増分 $\Delta\epsilon^c$ は，次式で与える．

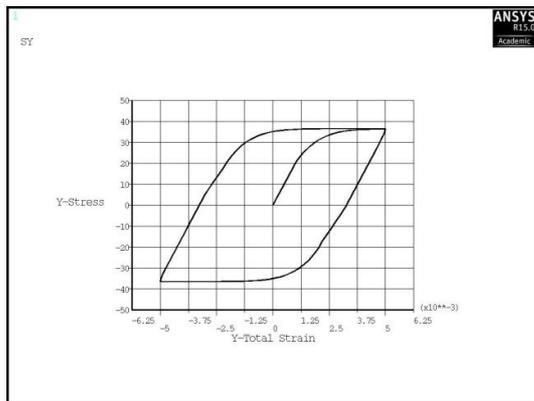
$$\Delta\epsilon^c = \frac{3s_{i+1}}{2\bar{\sigma}_{i+1}^c} \dot{\epsilon}_{i+1}^c \Delta t \dots\dots\dots (3.6)$$

式(3.6)で $\Delta t$ は現計算ステップの時間増分である． $\dot{\epsilon}^c$ は相当クリープひずみ速度であり，次式で与えた．

$$\dot{\epsilon}_{i+1}^c = A \bar{\sigma}_{i+1}^n \dots\dots\dots (3.7)$$



(a) ひずみ振幅±0.5% , ひずみ速度0.1%/s



(b) ひずみ振幅±0.5% , ひずみ速度0.01%/s

図9 引張・圧縮繰返し負荷シミュレーション

式(3.7)で  $A$ ,  $n$  は材料定数である。

usermat プログラムでは、以上の構成モデルの応力積分を、計算時間ステップ  $\Delta t$  の大きさに影響を受けにくい、陰解法で行うこととした。すなわち、構成モデルの応力積分を、予測子 - 修正子法によるリターンマッピングで行うプログラムを作成した。この応力積分アルゴリズムと、FEA の高速化のために必要となるコンシステント接線の導出法については、引用文献を参照されたい。

#### (4) usermat プログラムの性能評価

作成した usermat プログラムの性能を評価するために、まず 3 次元 1 要素の 1/4FE モデルに引張・圧縮繰返し負荷を与えるシミュレーションを実行した。

図9は、ひずみ振幅が±0.5%と共通で、ひずみ速度が 0.1%/s と 0.01%/s と異なる引張・圧縮繰返し負荷のシミュレーションを実行して比較したものである。シミュレーションには、SAC はんだの室温における材料定数を用いた。図9(a), (b)では、いずれも滑らかな曲線でヒステリシスループを描いていることがわかる。また、これらを比較すると、(a)のひずみ速度が 0.1%/s の方が、(b)の 0.01%/s よりも応力レベルが高い。すなわち、高ひずみ速度の方が高い応力レベルとなる、ひずみ速度依存性が記述されている。このことから、弾・塑性・クリープ構成モデルが usermat 内での確に機能しているといえる。

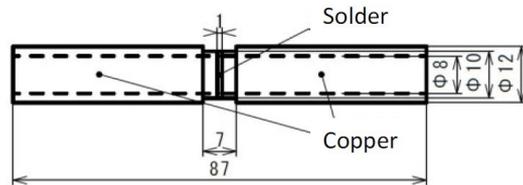


図10 銅-はんだ接合体試験片

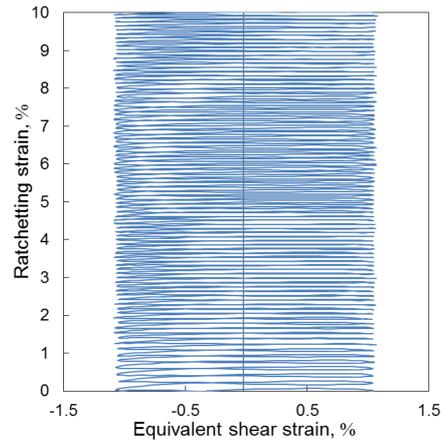


図11 軸ひずみ - せん断ひずみ関係

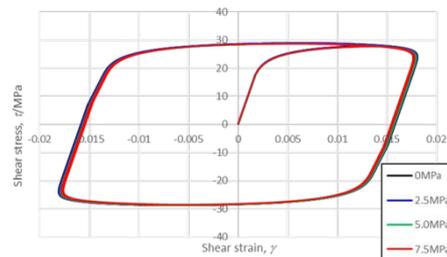


図12 せん断応力-せん断ひずみ曲線 (シミュレーション)

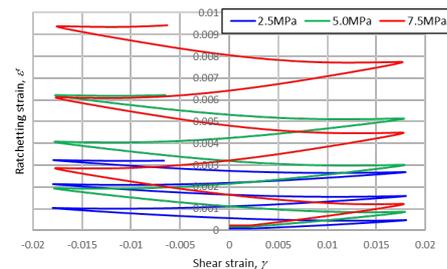


図13 軸ひずみ-せん断ひずみ関係 (シミュレーション)

計算時間ステップ  $\Delta t$  を変えて図9と同様の解析を行った際には、 $\Delta t$  が異なっても、同一形状のヒステリシスループが得られた。このことは、usermat で採用した陰解法による応力積分法には、解析結果に対する計算時間ステップ  $\Delta t$  の大きさの影響を小さくする効果があることを示している。また、そのコーディング方法に問題がなかったことも示している。

次いで、usermat のラチェット変形の記述能力を検証するために、銅管を SAC はんだで接合した図10に示す形状の接合体試験片を用いて、繰返しねじりに軸方向の引張負荷を重畳させた二軸負荷試験を実施した。その結果の一例を図11に示す。図11は、せん断ひ

ずみ振幅  $\Delta\gamma = \pm 0.865\%$  ( $\Delta\gamma/3^{1/2} = \pm 1.0\%$ ), 引張重畳応力 5MPa での試験で得られた軸ひずみ(ラチェットひずみ) - せん断ひずみ関係である. この図より, 銅 - はんだ接合体では, 繰返しねじりに引張負荷を重畳させると, 軸方向のひずみが発達するラチェット変形が生じることがわかる.

usermat のラチェット変形の記述能力を検証するための FEA は, 図 10 の寸法で作成した FE モデルに, 引張負荷を重畳させた繰返しねじりを与えて実行した. その際, せん断ひずみ振幅  $\Delta\gamma$  は  $\pm 1.73\%$  ( $\Delta\gamma/3^{1/2} = \pm 2.0\%$ ), 重畳させる引張応力は, 0, 2.5, 5.0, 7.5MPa の 4 種類とした. この FEA で得られた, せん断応力 - せん断ひずみ曲線を図 12 に示す. 図 12 で軸応力の違いによるヒステリシスループ形状の相違はみられない. この現象は, 同負荷条件での実験でも確認された. このことから, usermat は繰返しねじり挙動を適切に記述することができるといえる.

図 13 は, 図 12 と同時に得た軸ひずみ - せん断ひずみ関係である. 図 13 から, usermat によりラチェット変形が記述されていることがわかる. FEA と同負荷条件の実験では, 重畳する引張応力の増加に伴い, ラチェットひずみの発生量も増加する現象がみられた. この現象は, 図 13 において再現されている. 以上のことから, usermat が銅 - はんだ接合体のラチェット変形の記述能力を有することが判明した. すなわち, usermat は複合負荷の FEA にも適用可能である.

#### <引用文献>

大口 健一, はんだ接続部の変形解析用ソルバの開発, 溶接学会誌, 第 79 巻, 第 3 号, 2010, 215-219

#### 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 4 件)

Ken-ichi Ohguchi and Kengo Kurosawa, An Evaluation Method for Tensile Characteristics of Cu/Sn IMCs Using Miniature Composite Solder Specimen, Journal of Electronic Materials, 査読有, Vol. 45, No. 6, 2016, 3183-3191

Yusuke Tomizawa, Takehito Suzuki, Katsuhiko Sasaki, Ken-ichi Ohguchi and Daisuke Echizenya, Biaxial Ratchetting Deformation of Solders Considering Halt Conditions, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 725, 2016, 299-304

Ken-ichi Ohguchi and Katsuhiko Sasaki, Estimation of Plastic and Creep Strain Development of SAC Solder, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 725, 2016, 305-310

Atsuko Takita, Katsuhiko Sasaki, Ken-ichi Ohguchi and Hiroyuki Fujiki, Evaluation of the Stress Distribution by the Stepped Load Indentation Test with Constant Depth, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 725, 2016, 293-298

#### [学会発表](計 5 件)

大口 健一, 黒沢 憲吾, 石澤 裕也, 銅 - はんだ接合体のせん断試験 FEA による Cu/Sn 系 IMCs の材料非線形の評価, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015.9.16, 北海道大学

名取 拓也, 大口 健一, 応力変動による SAC はんだのクリープひずみ硬化回復挙動, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015.9.16, 北海道大学

瀧田 敦子, 佐々木 克彦, 大口 健一, 深さ保持インデンテーション試験による鉛フリーはんだのクリープ特性評価, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015.9.16, 北海道大学

黒沢 憲吾, 大口 健一, ラップジョイント試験片を用いた SAC はんだ接合部 IMCs 層の塑性変形能の評価, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.14, 九州大学

大口 健一, 石澤 裕也, 黒沢 憲吾, 荒川 明, 引張強さにばらつきを示す微小 SAC はんだ試験片の初晶 Sn の形状と分布形態, M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016.10.8, 神戸大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

大口 健一 (OHGUCHI, Keni-chi)  
秋田大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 30292361