

# 階段負荷によるひずみ解析と繰返し粘塑性構成モデルの高精度化

秋田大学 大学院工学資源学研究科 材料工学専攻

准教授 大口健一

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009020)

キーワード：階段負荷，塑性，クリープ，非弾性構成モデル

## 1. 研究の目的と背景

機械部品の設計では，電子パッケージはんだ接続部のように，繰返し非弾性変形を許容する場合がある．このような設計で，部品の強度信頼性を十分に確保するためには，高精度で部品材料の変形が記述できる構成モデルを用いて，有限要素解析 (FEA) を実行しなければならない．

はんだ接続部の FEA を実行する際には，はんだ材が顕著な時間依存の非弾性変形挙動を示すことから，繰返し塑性構成モデルに粘性の効果を考慮した，繰返し粘塑性構成モデルが必要となる．このため，はんだ材の構成モデルを構築する研究<sup>1-3)</sup>や既存の構成モデルをはんだ材に適用する研究<sup>4, 5)</sup>がこれまでになされている．

これらの構成モデルは，統一型の粘塑性構成モデルと，全ひずみを弾性，塑性，クリープの 3 つのひずみの和で表す，いわゆる弾・塑性・クリープモデルに大別される．しかし，はんだ接続部の FEA を実行した研究例をみると，弾・塑性・クリープモデルによるものがほとんどである<sup>6-9)</sup>．この理由としては，モデルに必要な材料定数の決定方法の違いが考えられる．統一型の粘塑性構成モデルでは，多くの内部状態変数を試行錯誤的に決定する必要がある，より専門的な知識を要する．これに対し，構造が簡単な弾・塑性・クリープ構成モデルでは，引張試験とクリープ試験を行えば，必要な材料定数を比較的簡単に決定することができる．このことから，はんだ接続部の FEA では，弾・塑性・クリープモデルが広く用いられていると考えられる．ただし，そこでの弾・塑性・クリープモデルの使用の仕方には問題が存在する．

はんだ接続部は，繰返し温度サイクルに起因する繰返し負荷を受けることから，塑性ひずみの算出には移動硬

化則が用いられている．しかし，その際には実験的な検証をすることなく，等方硬化は無視されている．また，電子パッケージでの使用が現在必須となっている鉛フリーはんだ材のクリープ変形の表し方にも問題がある．鉛フリーはんだ材のクリープ変形では，明確な遷移クリープ領域がみとめられる．このため，クリープひずみの算出には遷移クリープ則を用いる必要があり，これを繰返し負荷に用いる場合には，応力反転による遷移クリープ領域の回復を考慮する必要がある．しかし，繰返し負荷下でのクリープひずみの発達挙動を実験で調査する方法がないためか，このことを考慮して鉛フリーはんだ接続部の FEA を実施したケースは少ない．

以上の問題を解決して，はんだ接続部の FEA を正確に実行するためには，繰返し負荷で生じる非弾性ひずみを塑性ひずみとクリープひずみに分離し，それぞれの発達挙動を解析することのできる実験方法が必要となる．また，その方法による解析結果は，繰返し負荷用の弾・塑性・クリープモデルを高精度化する上で大変有用となる．

著者は，瞬間的負荷とひずみ保持を繰返し階段負荷を用いて，鉛フリーはんだ材の引張りによる非弾性ひずみを時間非依存の塑性ひずみと時間依存のクリープひずみに分離し，定量化する方法を提案している<sup>10)</sup>．そこで本研究では，この方法を鉛フリーはんだ材の引張・圧縮繰返し負荷に適用し，繰返し負荷下での塑性ひずみとクリープひずみの発達挙動の解析を試みた．次いで，その解析結果に基づき，鉛フリーはんだ材の繰返し粘塑性変形挙動を正確に記述できる弾・塑性・クリープモデルを構築した．そして，構築したモデルの有用性を繰返し負荷のシミュレーションを実施することで検証した．

## 2. 階段負荷によるひずみ解析

### 2.1 実験方法

本研究では、Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだ材の引張・圧縮繰返し負荷で生じる非弾性ひずみを、塑性ひずみとクリープひずみに分離して解析した。試験材料の Sn-3.0Ag-0.5Cu 材は、直径 8mm、標点間距離 18mm の中実円柱の試験部をもつ試験片に加工した。試験装置には、電気・油圧式引張・圧縮疲労試験機(島津製作所 EHF-FB1)を用いた。

引張・圧縮繰返し負荷には、図 1 の概念図に示す三角波(TW)と階段波(SW)の 2 つの負荷波形を用いた。繰返し負荷は、いずれの波形においても試験片が破断するまで与えた。繰返し負荷のひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ 、周期  $T$  といった負荷条件は、表 1 に示す値とした。

階段負荷は、図 1 に示すように、瞬間的にひずみ増分 $\Delta\varepsilon_s$ を与える瞬間的負荷(IS)部と、ひずみを $\Delta t_{ms}$ 保持するひずみ保持(MS)部から成る。本研究では、 $\Delta t_{ms}$  を 0.5 s に設定し、 $\Delta\varepsilon_s$  は周期  $T$  を $\Delta t_{ms}$  で除すことで得られるステップ数で 1 サイクルの全ひずみ量を除した値とした。

### 2.2 ひずみ解析方法

図 2(a), (b)の応力-ひずみ曲線は、負荷条件 3 での繰返し負荷試験を TW と SW の各波形で実施して得たものである。これらを比較すると、TW では滑らかな応力-ひずみ曲線となるのに対し、SW では IS による応力増加と MS による応力緩和を繰返すことで、波を打った応力-ひずみ曲線となることがわかる。しかし、2 つの応力-ひずみ曲線で応力レベルはほぼ等しく、ヒステリシスループの面積に相当する非弾性ひずみエネルギー密度もほぼ等しい値をとる。また、図 2(a), (b)の各図中に示す  $N_f$  は各負荷による疲労寿命であり、これらもほぼ等しい値である。このようなヒステリシスループ形状と疲労寿命  $N_f$  の比較は、表 1 の他の負荷条件においても行った。その結果、いずれの条件においても同様の一致が認められた。

粘塑性材料では、非弾性ひずみ中の塑性ひずみとクリープひずみの比率と非弾性ひずみエネルギー密度は、いずれも疲労寿命と高い相関をもつ。このことを考慮すれば、上述の TW と SW の比較における非弾性ひずみエネルギー密度と疲労寿命の一致は、ひずみ振幅と周期が同一の繰返し負荷であれば、TW と SW で生じる塑性ひずみとクリー

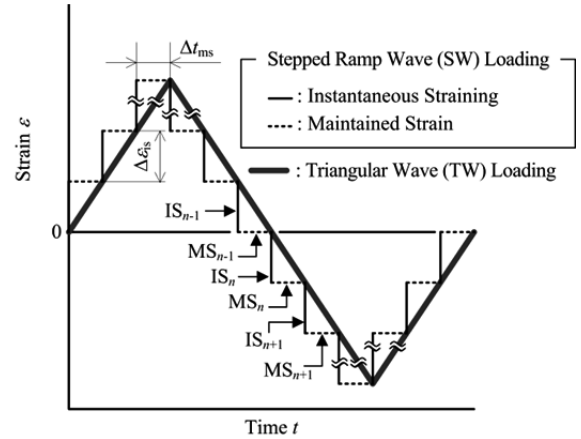


図 1 繰返し負荷波形の概念図

表 1 繰返し負荷条件

No.	Strain amplitude $\Delta\varepsilon$ (%)	Period $T$ / s	Temp.
1	0.50	400	R.T. (295K)
2	0.25	20	
3	0.50	40	
4	1.0	80	

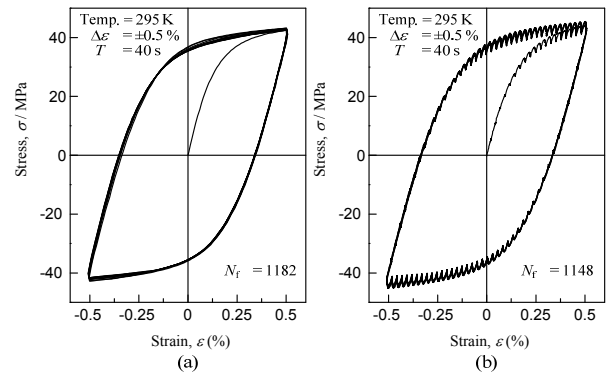


図 2 負荷条件 3 での応力-ひずみ曲線  
(a) TW 負荷 (b) SW 負荷

プひずみの量が等しいことを意味する。したがって、一般的な TW による繰返し負荷下で生じる塑性ひずみとクリープひずみは、これらのひずみの定量化が可能な SW 負荷試験を同条件で実施すれば推定できる。

そこで、表 1 のすべての繰返し負荷条件で生じる塑性ひずみとクリープひずみを SW 負荷試験の結果に基づき定量化した。その手順を以下に示す。

(a) ヤング率  $E$  と各 MS 部での応力緩和量  $\Delta\sigma_t$  を次式<sup>10, 11)</sup>に用いて、各 MS 部で生じるクリープひずみ増分  $\Delta\varepsilon_t^c$  を算出する。

$$\Delta\varepsilon_t^c = -\Delta\sigma_t / E \quad (1)$$

(b) ステップ(a)で算出したクリープひずみ増分  $\Delta\varepsilon_t^c$  を

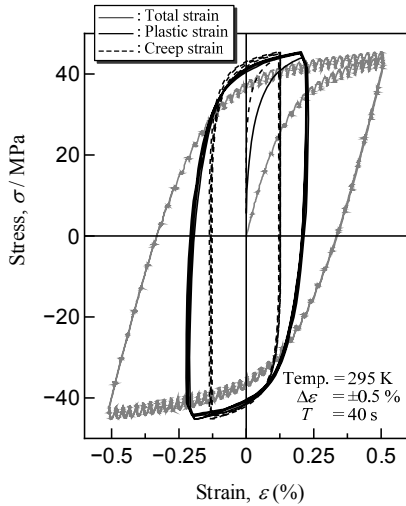


図3 負荷条件3における応力-塑性ひずみ曲線と応力-クリープひずみ曲線

積算し、繰返し負荷で生じるクリープひずみを算出する。(c) ステップ(b)で算出したクリープひずみと Hooke の法則により算出した弾性ひずみを全ひずみから減じて、塑性ひずみを算出する。

定量化の一例として、以上の処理を図2(b)に対して施した結果を図3に示す。図3で、黒の実線は応力-塑性ひずみ曲線、点線は応力-クリープひずみ曲線である。これらを比較すると、負荷条件3の繰返し負荷では、塑性ひずみの方がクリープひずみよりも多く生じることがわかる。このような処理を負荷条件1~4によるすべての繰返し負荷に対して施し、それらを解析して判明した事実を次節で述べる。

### 2.3 ひずみ解析結果

図4は、全ひずみ振幅が0.25, 0.5, 1.0と異なる負荷条件2~4での応力-塑性ひずみ曲線の一部と、これを用いて1回目の除荷開始時における流れ応力を求めた結果である。ここで図4(b)の流れ応力  $R$  は、図4(a)の除荷開始時の応力と圧縮側の降伏応力の差に1/2を乗じて算出した値である。なお、圧縮側の降伏応力は、除荷開始時の塑性ひずみとの差が  $5.0 \times 10^{-5}$  になったときの応力とした。また、図4(b)の横軸の塑性ひずみは、除荷を開始した時点での値である。

まず、図4(a)で初期降伏応力  $\sigma_{y0}$  と負荷条件2~4での圧縮側での各降伏応力  $(\sigma_{y1})_2, (\sigma_{y1})_3, (\sigma_{y1})_4$  を比較した。その結果、いずれの条件でも圧縮側の降伏応力の大きさは初期降伏応力よりも小さく、移動硬化が生じているこ

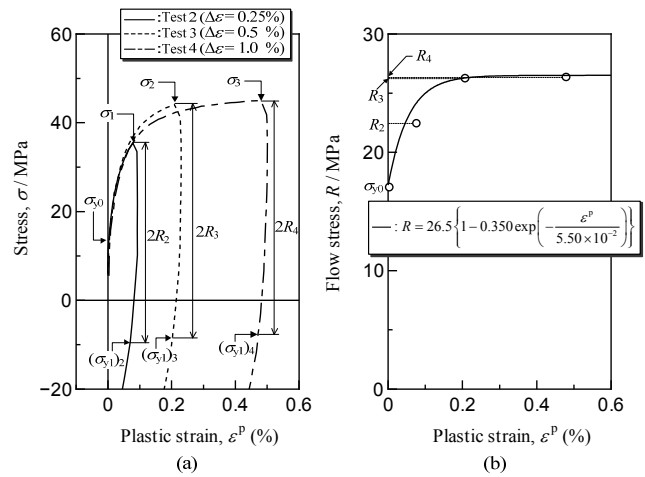


図4 全ひずみ振幅が異なる応力-塑性ひずみ曲線の一部と1回目の除荷開始時における流れ応力  
(a) 応力-塑性ひずみ曲線  
(b) 流れ応力と塑性ひずみの関係

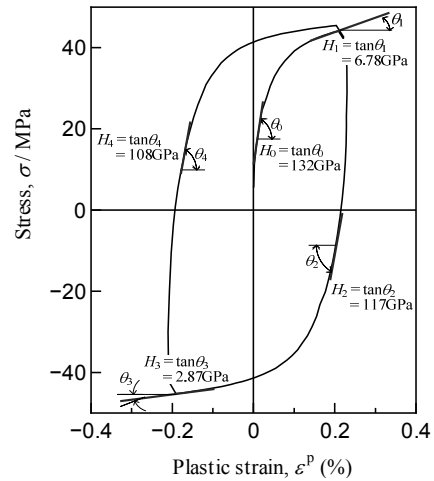


図5 降伏直後と除荷直前の塑性接線係数

とが明らかとなった。

次に図4(b)を用いて、負荷条件2~4の1回目の除荷開始時の流れ応力  $R$  を比較した。その結果、除荷開始時の塑性ひずみ量の増加に伴い  $R$  が大きくなる、等方硬化も生じていることが判明した。また  $R$  の発達は、図4(b)中の式で表すことができた。以上のことから、弾・塑性・クリープモデルを用いて Sn-3.0Ag-0.5Cu 材の変形を記述する際には、移動硬化と等方硬化を同時に考慮して、塑性ひずみを算出する必要がある。

図5は、図3中の応力-塑性ひずみ曲線の1サイクル目を抽出し、降伏直後と除荷直前の塑性接線係数  $H$  の値を調べたものである。図5で、最初の降伏直後の  $H$  は132 GPa であるが、その後のひずみ硬化により1回目の除荷

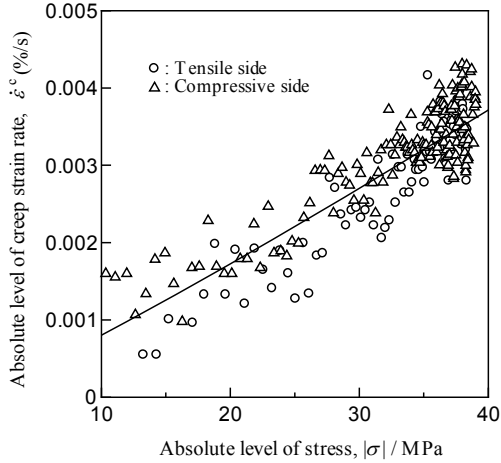


図6 負荷条件1の引張側と圧縮側でのクリープひずみ速度と応力の関係の比較

直前では6.78 GPaまで減少している。しかし、1回目の圧縮側での降伏直後の $H$ は117 GPaへと増加している。このような $H$ の変化は、この後の圧縮過程とそれに続く引張過程でもみられる。すなわち、圧縮過程でのひずみ硬化により2.87 GPaまで減少した $H$ が、除荷後の引張側での降伏直後では108 GPaへと増加している。以上のことから、Sn-3.0Ag-0.5Cu材の繰返し負荷では、除荷により $H$ の回復が起こるといえる。

図6は、負荷条件1の繰返し負荷による応力-クリープひずみ曲線を用いて、最初の引張過程と圧縮過程におけるクリープひずみ速度と応力の関係をプロットしたものである。なお、引張側と圧縮側の比較を容易にするために、クリープひずみ速度と応力のいずれも絶対値で示している。図6で、○で示される引張側と△で示される圧縮側のデータを比較すると、同じ応力レベルで生じるクリープひずみ速度の絶対値はほぼ等しい。

ここで、最初の引張過程でのクリープ変形によるひずみ硬化が後続の圧縮過程でのクリープ変形に影響を及ぼすと仮定する。この場合、同一の応力レベルでクリープひずみ速度を引張側と圧縮側で比較した際には圧縮過程の値の方が小さくなるはずである。しかし、図6ではそのような傾向がみられない。このことは、引張過程でのクリープ変形によるひずみ硬化は、圧縮過程でのクリープ変形に影響しないことを意味する。そしてこのことを換言すれば、Sn-3.0Ag-0.5Cu材の繰返し負荷で生じるクリープ変形では、応力反転による遷移クリープ領域の回復が生じるといえる。

### 3. 弾・塑性・クリープモデルの高精度化

本研究では、前章で示した情報に基づき、著者が構築した弾・塑性・クリープモデル<sup>10,11)</sup>の高精度化を試みた。すなわち、全ひずみを次式のように弾性ひずみ $\epsilon^e$ 、塑性ひずみ $\epsilon^p$ 、クリープひずみ $\epsilon^c$ の和で表す構成モデルの高精度化を試みた。

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c \quad (2)$$

式(2)の弾性ひずみはHookeの法則を用いて算出する。塑性ひずみとクリープひずみは、まず次式のように後退オイラー法を用いて離散化した形で表す。

$$\epsilon_{i+1}^p = \epsilon_i^p + \Delta\epsilon^p \quad (3)$$

$$\epsilon_{i+1}^c = \epsilon_i^c + \Delta\epsilon^c \quad (4)$$

式(3)、(4)で $\Delta\epsilon^p$ と $\Delta\epsilon^c$ は、塑性ひずみ増分とクリープひずみ増分である。

Sn-3.0Ag-0.5Cu材の繰返し負荷では、移動硬化と等方硬化を同時に考慮する必要があることを前章で示した。このため、塑性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^p$ は次式の負荷関数 $F$ から導出することとした。

$$F = \bar{\sigma}^p - R \quad (5)$$

式(5)で $\bar{\sigma}^p$ は次式で与えられるスカラー量である。

$$\bar{\sigma}^p = \sqrt{3/2(s-b):(s-b)} \quad (6)$$

式(6)で $s$ は偏差応力、 $b$ は移動硬化を表すための背応力の偏差成分である。

式(5)中の $R$ は流れ応力であり、図4(b)中の近似式の形に基づいて、次式で表す。

$$R = R_0 \left\{ 1 - C_1^{pl} \exp(-\bar{\epsilon}^{apl} / C_2^{pl}) \right\} \quad (7)$$

式(7)で $R_0$ 、 $C_1^{pl}$ 、 $C_2^{pl}$ は正の値の材料定数、 $\bar{\epsilon}^{apl}$ は累積塑性ひずみである。

式(5)~(7)を用いて、塑性ひずみ増分は次式のように導出される。

$$\Delta\epsilon^p = \left\{ 3\Delta\bar{\epsilon}^p / (2\bar{\sigma}_{i+1}^p) \right\} (s_{i+1} - b_{i+1}) \quad (8)$$

式(8)中で $\Delta\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ増分であり、塑性接線係

数  $H$  を用いて  $\Delta\bar{\varepsilon}^p = \Delta\bar{\sigma} / H$  と表される。塑性接線係数  $H$  は次式で与える。

$$H = \{D / (m\varepsilon_0)\} (\bar{\varepsilon}^{\text{ph}} / \varepsilon_0)^{(1-m)/m} \quad (9)$$

式(9)で、 $D$  は塑性ひずみ  $\varepsilon_0 = 5.0 \times 10^{-4}$  に対応する基準応力、 $m$  は Ramberg-Osgood 則の硬化指数<sup>10)</sup>である。 $\bar{\varepsilon}^{\text{ph}}$  はひずみ硬化を表す変数であり、図 5 で示した  $H$  の回復、すなわちひずみ硬化の回復を考慮して次式で表す。

$$\bar{\varepsilon}^{\text{ph}} = \bar{\varepsilon}^{\text{apl}} - \min(\bar{\varepsilon}_N^{\text{apl}}) \quad (10)$$

式(10)で  $\bar{\varepsilon}_N^{\text{apl}}$  は  $N$  回目の除荷過程が完了したときの累積塑性ひずみである。この項により、負荷開始時に  $\bar{\varepsilon}^{\text{ph}}$  はゼロにリセットされ、ひずみ硬化の回復が表される。

式(6)、(8)で用いられた背応力の偏差成分  $\mathbf{b}$  も塑性ひずみとクリープひずみと同様に、 $\mathbf{b}_{i+1} = \mathbf{b}_i + \Delta\mathbf{b}$  のように離散化して表す。その増分  $\Delta\mathbf{b}$  は次式で表す。

$$\Delta\mathbf{b} = \Delta\chi(\mathbf{s}_{i+1} - \mathbf{b}_{i+1}) \quad (11)$$

式(11)で  $\Delta\chi$  は次式で与えられる比例定数である。

$$\Delta\chi = \left[ 3 / \{2(\bar{\sigma}_{i+1}^p)^2\} \right] \{(\mathbf{s}_{i+1} - \mathbf{b}_{i+1}) : \Delta\mathbf{s} - (2/3)\bar{\sigma}_{i+1}^p \Delta R\} \quad (12)$$

クリープひずみ増分  $\Delta\mathbf{e}^c$  は次式で与えられる。

$$\Delta\mathbf{e}^c = \left\{ 3\bar{\varepsilon}_{i+1}^c / (2\bar{\sigma}_{i+1}) \right\} \mathbf{s}_{i+1} \Delta t \quad (13)$$

式(13)で  $\Delta t$  は現計算ステップの時間増分、 $\bar{\sigma}_{i+1}$  は Mises 型の相当応力、 $\bar{\varepsilon}_{i+1}^c$  は相当クリープひずみ速度である。 $\bar{\varepsilon}_{i+1}^c$  は次式のように、相当遷移クリープひずみ速度  $(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_I$  と相当定常クリープひずみ速度  $(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_{II}$  の和として表す。

$$\bar{\varepsilon}_i^c = (\bar{\varepsilon}_i^c)_I + (\bar{\varepsilon}_i^c)_{II} \quad (14)$$

$(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_I$  は、比例係数  $C^{\text{cr}}$  を用いて、 $(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_{II}$  に比例する次式の形<sup>10,11)</sup>で表す。

$$(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_I = C^{\text{cr}} (\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_{II} \quad (15)$$

$(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_{II}$  は次式の Norton 則で表す。

$$(\bar{\varepsilon}_{i+1}^c)_{II} = A\bar{\sigma}_{i+1}^n \quad (16)$$

式(15)の比例係数  $C^{\text{cr}}$  は、次式で表す。

$$C^{\text{cr}} = C_1^{\text{cr}} \exp\{-\bar{\varepsilon}^{\text{ch}}_I / C_2^{\text{cr}}\} \quad (17)$$

ここで  $C_1^{\text{cr}}$  と  $C_2^{\text{cr}}$  は正の値の材料定数であり、クリープによるひずみ硬化を表す変数  $(\bar{\varepsilon}^{\text{ch}})_I$  が発達すると、式(17)はゼロに収束する。この変数  $(\bar{\varepsilon}^{\text{ch}})_I$  は、図 6 で示した応力反転による遷移クリープ領域の回復を表すために、次式のように表した。

$$(\bar{\varepsilon}^{\text{ch}})_I = \bar{\varepsilon}_1^{\text{acr}} - \min\{(\bar{\varepsilon}_1^{\text{acr}})_N\} \quad (18)$$

式(18)で、 $\bar{\varepsilon}_1^{\text{acr}}$  は累積相当遷移クリープひずみ、 $(\bar{\varepsilon}_1^{\text{acr}})_N$  はクリープひずみ速度に  $N$  回目の方向の変化が生じたときの累積相当遷移クリープひずみである。この項により、クリープひずみ速度の方向が変化したときに  $(\bar{\varepsilon}^{\text{ch}})_I$  はゼロにリセットされ、遷移クリープ領域の回復が表される。

#### 4. シミュレーション

前章で示した弾・塑性・クリープモデルの適用性を検証するために、Sn-3.0Ag-0.5Cu 材の繰返し負荷のシミュレーションを実行した。シミュレーションに用いた材料定数を表 2 に示す。表 2 の材料定数のうち  $R_0$ 、 $C_1^{\text{pl}}$ 、 $C_2^{\text{pl}}$  は図 4 の近似式から決定した。これら以外の値は、SW による引張試験で決定した値<sup>10)</sup>を用いた。

図 7 に実験とシミュレーションの比較を示す。図 7(a) は、ひずみ振幅 0.5% で周期が 40 s の一定ひずみ速度  $5 \times 10^{-2}$  %/s での繰返し負荷である。○で示す実験と実線で示すシミュレーションを比較すると、小さな差異は認められるものの、全体的にはシミュレーションは実験結果をよく表していることがわかる。

図 7(b)、(c) で○印で示す実験結果は、ひずみ振幅が 0.5% で引張側と圧縮側でひずみ速度が異なる条件での繰返し負荷によるものである。すなわち、図 7(b) は、ひずみ速度が引張側で  $5 \times 10^{-1}$  %/s、圧縮側で  $5 \times 10^{-3}$  %/s の Fast-Slow の条件による応力-ひずみ関係である。また図 7(c) は、引張側と圧縮側のひずみ速度を図 7(b) の条件と入れ替えた、Slow-Fast の条件による応力-ひずみ関係である。このようなひずみ速度の違いにより、図 7(b)、(c) のヒステリシスループの応力レベルは、(b) では引張側の方が圧縮側よりも高く、(c) では圧縮側の方が引張側よりも高い。この結果、いずれの図においても、ヒステ

表2 シミュレーションに用いた材料定数

$E$	$D$	$m$	$R_0$	$C_1^{pl}$	$C_2^{pl}$	$A$	$n$	$C_1^{cr}$	$C_2^{cr}$
26.0 GPa	30.2 MPa	3.2	26.5 MPa	0.35	$5.50 \times 10^{-2}$	$8.10 \times 10^{-19}$	9.15	18.2	$3.03 \times 10^{-4}$

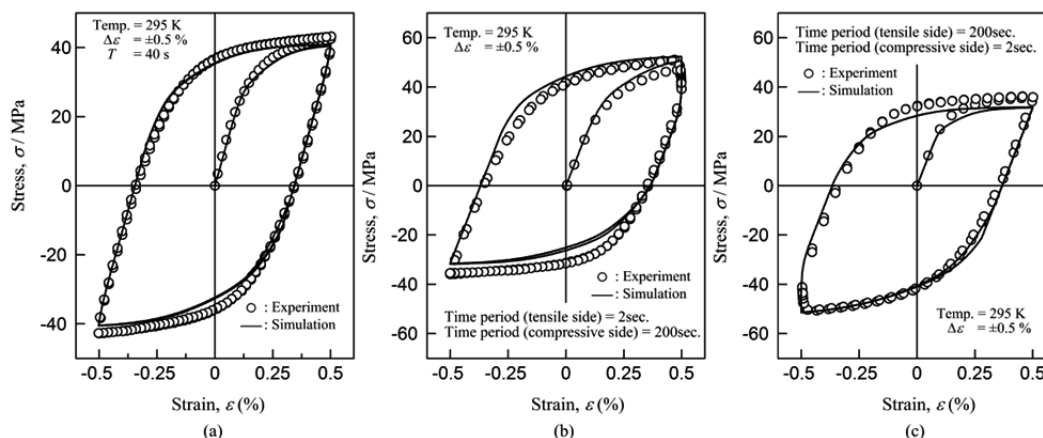


図7 引張・圧縮繰返し負荷の実験とシミュレーションの比較

- (a) 一定ひずみ速度による引張・圧縮繰返し負荷
- (b) Fast-Slow 条件による引張・圧縮繰返し負荷
- (c) Slow-Fast 条件による引張・圧縮繰返し負荷

リシスループは非対称の形状となっている。

図7(b), (c)で、シミュレーションによる応力-ひずみ曲線を実験結果と比較すると、図7(a)と同様に小さな差異は認められる。しかし、ひずみ速度の違いによる非対称のヒステリシスループ形状は、いずれの図においてもよく表されている。また、ひずみ速度が急減する図7(b)のひずみ0.5%と図7(c)のひずみ-0.5%でみられる特徴的な応力の急減もシミュレーションにより表されている。これらのことから、本研究で示した弾・塑性・クリープモデルは、Sn-3.0Ag-0.5Cu材の繰返し粘塑性変形挙動を精度よく記述することができるといえる。

## 5. まとめ

階段負荷試験を Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだ材の引張・圧縮繰返し負荷に適用すれば、繰返し負荷下で生じる非弾性ひずみを塑性ひずみとクリープひずみに分離し、各ひずみの発達挙動を詳細に解析できることが判明した。また、その解析結果に基づき弾・塑性・クリープモデルを改良した結果、Sn-3.0Ag-0.5Cu材の繰返し粘塑性変形挙動を精度よく記述することができた。これらのことから、階段負荷試験は高精度の繰返し粘塑性構成モデルを構築するために非常に有用な方法といえる。

なお、本研究の実施には天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けた。謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Kobayashi, M., Mukai, M., Takahashi, H., Ohno, N., and Kawakami, T. : Int. J. for Numerical Method in Engineering, 58 (2003), 1523-1543.
- 2) Maciucescu, L., T.-L. Sham, and Krempl, E. : ASME Journal of Electronic Packaging, 121 (1999), 92-98.
- 3) Ishikawa, H., Sasaki, K., and Ohguchi, K. : ASME J. of Electronic Packaging, 118 (1996), 164-169.
- 4) Woodmansee, M. W., and Neu, R. W. : Material Science and Engineering, A322 (2002), 79 -88.
- 5) Amagai, M., Watanabe, M., Omiya, M., Kishimoto, K., and Shibuya, T. : Microelectronics Reliability, 42 (2002), 951-966.
- 6) Shirley, D. R., Ghorbani, H. R., and Spelt, J. K. : Microelectronics Reliability, 48 (2008), 455-470.
- 7) Wiese, S. and Rzepka S. : Microelectronics Reliability, 44 (2004), 1893-1900.
- 8) Ohguchi, K., Sasaki, K., Ishibashi, M., and Hoshino, T. : JSME Int. J. Series A, 47 (2004), 371-379.
- 9) Shi, X. Q., Wang, Z. P., Zhou, W., Pang, H. L. J., and Yang, Q. J. : ASME J. of Electronic Packaging, 124 (2002), 85-90.
- 10) Ohguchi, K., Sasaki, K., and Aso, S. : ASME J. of Electronic Packaging, 131 (2009), 021003-1 -021003-7.
- 11) Ohguchi, K., Sasaki, K., and Ishibashi, M. : J. of Electronic Materials, 35 (2006), 132-139.