60Sn-40Pb はんだ材の粘塑性変形*
(ひずみ速度効果の記述)大 口 健 一^{*1}, 佐々木 克彦^{*2}, 石 川 博 将^{*2}**Viscoplastic Deformation of 60Sn-40Pb Solder Alloys**
(Description of Strain Rate Effect)

Ken-ichi OHGUCHI, Katsuhiko SASAKI and Hiromasa ISHIKAWA

In this paper, we discuss the viscoplastic deformation and the constitutive model of 60Sn-40Pb solder alloys which is used for the connection of electronic packaging. The constitutive model is developed with the concept that the deformation includes the elastic, plastic, and creep deformation, which is caused from the strain rate effect on the deformation of the solder alloys. Namely, the constitutive model proposed in this paper combines the cyclic plastic model for the time independent part of deformation with the Norton's creep one for the time dependent part. The applicability of the model is verified from the comparison of the simulations based on the model for a series of tests, such as a pure tension and a cyclic loading under several strain rates. As a result, the constitutive model can predict the essential futures of the time dependent deformation of 60Sn-40Pb solder alloys.

Key Words: 60Sn-40Pb Solder Alloys, Viscoplasticity, Creep, Cyclic Loading, Strain Rate, Constitutive Model, Electronic Packaging

1. 緒 言

電子回路装置の小形化, 多機能化のための高密度実装技術として, 微細はんだ接続が広く用いられている。多数の LSI チップが装着された実装基板は, 材料特性の異なる微小材料から構成されている。したがって, 実際の使用環境下では, LSI 自身の自己発熱や冷却などによる雰囲気温度の変化と微小材料の熱膨張率の違いによる熱変形量の差から, 微小材料を接続しているはんだ材に応力が生ずる。また, 電源のオン・オフ, 基盤の冷却などの温度変動要因により, この応力は繰返し作用する。このように, 接続用はんだ材は, 力学的に著しく厳しい使用環境下に置かれている。このため, はんだ材の基本的な力学特性および疲労特性を把握し, 疲労寿命評価法を実験的・理論的に確立することが急務となっている。

現在までも, はんだ材の力学特性・疲労特性を実験的に把握する研究が行われている。例えば Solomon⁽¹⁾ は, はんだ材の繰返し変形特性と疲労寿命

の実験的考察を行い, Coffin-Manson 則を用いた疲労寿命予測を試みている。Guo ら⁽²⁾ は, 負荷中にひずみ速度変化, または, 温度変化がある場合の 95.5 Sn-4 Cu-0.5 Ag 材の変形挙動の考察を行い, その変形機構の解明を試みている。さらに, 著者らは前報⁽³⁾ で, 塑性ひずみ仕事率密度の概念を提案し, ひずみ速度, 雰囲気温度などの負荷条件が異なる疲労寿命を予測できる疲労寿命評価法を 60 Sn-40 Pb 材による実験と繰返し粘塑性構成式から確立している。

また, 材料の粘塑性変形を記述する理論的研究も数多く行われている。例えば, 田中ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾ は, 温度変動履歴の非弾性挙動への影響を考慮した統一形構成式の構築を試みている。さらに, Freed ら⁽⁶⁾ は, 温度変化を考慮した粘塑性構成式に関する検討を行い, Ohno ら⁽⁷⁾ は, 時効効果とクリープに関する理論解析について検討している。河井⁽⁸⁾ は, 塑性ひずみとクリープの異方性との関連性について理論的検討を行っている。また, Lee ら⁽⁹⁾ は, 過応力の概念に基づく粘塑性構成式を温度変化を伴う変形解析に応用している。

実装基板上ではんだ材に作用する負荷では, ひずみ速度は一定でなく, なおかつ, 温度変化が伴うことが推察できる。さらに, はんだ材は, ひずみ速度依存性および温度依存性が鋼などの一般金属材料と比較する

* 原稿受付 1996 年 7 月 10 日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院 (〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)。^{*2} 正員, 北海道大学工学部。

と著しい⁽³⁾。著者らが先に提案した疲労寿命評価法⁽³⁾を実装状態に拡張し、構造解析などによるより適正な疲労寿命評価を行うためには、負荷中のひずみ速度変化および温度変化に対応できるはんだ材の力学的構成モデルが必要である。しかしながら、現在までに、負荷の途中でひずみ速度が変化した場合に見られる特徴的なはんだ材の応力-ひずみ関係を正確に記述できる簡便な構成モデルはほとんどない。

そこで本研究では、ひずみ速度変化や温度変化を伴う負荷を記述可能な構成式の構築の第一段階として、まず、ひずみ速度効果にのみ着目し、はんだ材の著しいひずみ速度依存性による特徴的な変形挙動を的確に記述できる構成モデルの構築を行う。はんだ材の変形は、つねに弾性変形、塑性変形、クリープ変形(粘性変形)を同時に含むことから、弾性変形は背応力を考慮した Hooke の法則より、塑性変形は Mises の降伏条件と Prager-Ziegler の移動硬化則より、クリープ変形は Norton 則よりそれぞれ求め、全体のひずみをそれらの和で表して構成モデルを構築する。つまり、構成式の枠組は古典的手法であるが、上述の3種類の変形様式が移動硬化則より定まる背応力を介し、連結されているのが本モデルの特徴である。そして、その適用性を 60 Sn-40 Pb はんだ材を用いた、ひずみ速度の変化を伴う純粋引張実験および一定ひずみ振幅の引張り・圧縮実験により検討する。

2. 実験方法

本研究で使用した試験片は、電子回路装置の接続用はんだとして使用される 60 Sn-40 Pb 材である。60 Sn-40 Pb 材は、Sn と Pb が 60:40 の重量比から成っている。試験片の形状は直径 5 mm、標点間距離 20 mm の中実円柱である。試験片の製作は、実際の電子回路装置のはんだ接続部の鋳造状態を考慮する必要があるため、黒鉛製の鋳型に溶融した前述の重量割合の Sn と Pb を流し込み、自然空冷状態で冷却する方法で行い、試験片は、残留応力を除去するため、鋳造後 2 週間室温で放置した後、実験に使用した⁽³⁾。また、試験機は、引張り・圧縮試験機(Instron 社製 Model 5565)を使用した⁽³⁾。なお、実験は雰囲気温度を試験機付属の恒温槽により一定に保って行った。

まず、構成モデルの構築および材料定数の決定のための基礎実験として、クリープ実験と3種類のひずみ速度 0.001, 0.01, 0.1%/s での純粋引張実験および一定ひずみ振幅 0.5% での引張り・圧縮繰返し負荷実験を行った。次いで、構成モデルの速度依存性への適用性を検証するために、負荷中にひずみ速度が変化する

純粋引張実験および引張圧縮繰返し負荷実験を行った。すべての実験は、303 K (30°C) で行い、この温度下での試験片の縦弾性係数は 10.7 GPa であった⁽³⁾。なお、温度変動下での温度効果の記述については別報にて発表予定である。

3. 構成モデル

3.1 全ひずみ増分および弾性ひずみ増分 本研究では、まず、以下の仮定を適用する。(1) 60 Sn-40 Pb はんだ材のような著しいひずみ速度依存性を示す材料の変形には、つねに時間非依存成分である弾性変形、塑性変形と時間依存成分であるクリープ変形が同時に含まれている。(2) 弾性ひずみ増分、塑性ひずみ増分、クリープひずみ増分の方向はつねに共軸である。(3) 非弾性変形(塑性変形、クリープ変形)により異方性は誘起されない。以上の三つの仮定より、全ひずみ増分テンソルは、弾性ひずみ増分テンソル、塑性ひずみ増分テンソル、クリープひずみ増分テンソルの和として次式で表せられる。

$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p + de_{ij}^c \dots \dots \dots (1)$$

式(1)で、 de_{ij} は全ひずみ増分の偏差成分であり、 de_{ij}^e は $de_{ij}^e = de_{ij}^e - de_{kk}^e \delta_{ij}/3$ で表せられる弾性ひずみ増分の偏差成分である。 de_{ij}^p は塑性ひずみ増分であり、 de_{ij}^c はクリープひずみ増分である。また、 de_{kk}^e は静水圧 $d\sigma_{kk}$ と次式の関係がある。

$$de_{kk}^e = \frac{d\sigma_{kk}}{3\kappa} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 κ は体積弾性率であり、縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν を用いると、 $\kappa = E/3(1-2\nu)$ である。なお、塑性変形およびクリープ変形中は体積が一定であるという非圧縮性の仮定から、塑性とクリープひずみ増分の軸方向成分の和 de_{kk}^p および de_{kk}^c はともに零である。したがって、式(1)に式(2)を考慮すれば全ひずみ増分 de_{ij} が算出できる。

等方性材料に対して、塑性変形中において背応力を新たな負荷原点として考慮すると、弾性ひずみ増分を次式の Hooke の法則により算出できる。

$$de_{ij}^e = \frac{ds_{ij} - db_{ij}}{2\mu} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 μ は横弾性係数であり、 $\mu = E/2(1+\nu)$ である。また、 db_{ij} は背応力増分の偏差成分、 ds_{ij} は偏差応力増分であり、 $ds_{ij} = d\sigma_{ij} - d\sigma_{kk} \delta_{ij}/3$ で表せられる。

3.2 塑性ひずみ増分 塑性ひずみ増分は、先に著者らが行った下記の繰返し塑性構成モデル⁽¹⁰⁾から求める。すなわち、非弾性変形により誘起する異方性を考慮しない場合、塑性ひずみ増分を以下のように導

出できる。

まず、背応力を考慮した von Mises の降伏条件より、相当応力 $\bar{\sigma}$ を次式で定義する。

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{3}{2} (s_{ij} - b_{ij})(s_{ij} - b_{ij}) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 b_{ij} は背応力の偏差成分である。さらに、負荷関数を相当応力を用いて次式で定義する。

$$f = \bar{\sigma} - R \quad (5)$$

ここで、 R は流れ応力である。式(5)と、降伏曲面と塑性ひずみ増分の垂直性の仮定より、塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ は次式で与えられる。

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} (s_{ij} - b_{ij}) \quad (6)$$

式(6)で、 $d\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ増分である。

今、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ と相当応力が次式で表せると仮定する。

$$\bar{\epsilon}^p = \frac{K}{E} \left(\frac{1}{D} \right)^m \bar{\sigma}^{m+1} \quad (7)$$

ここで、 K は定数であり、 D は抗応力、 m は硬化指数である。硬化、軟化安定材の応力-ひずみ関係は、繰返し負荷により安定し、一定のループを描くという実験事実⁽¹¹⁾に基づき、 D 、および m はそれぞれ次式により表せる⁽¹²⁾と仮定する。

$$D = D_0 \left\{ 1 - \alpha \exp \left(-\frac{p}{c_1} \right) \right\} \quad (8)$$

$$m = m_0 \left\{ 1 - \beta \exp \left(-\frac{p}{c_2} \right) \right\} \quad (9)$$

式(8)、(9)で、 D_0 、 α 、 c_1 、 m_0 、 β 、 c_2 は材料定数である。また、 p は、前負荷まで、すなわち、 n 回目の負荷方向の変化を受けるまでに累積された塑性ひずみ $\int_{(n-1)} d\bar{\epsilon}^p$ であり、現負荷方向中は一定値である。

式(7)の両辺を微分すると、相当塑性ひずみ増分は次式で与えられる。

$$d\bar{\epsilon}^p = \frac{K}{E} (m+1) \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{D} \right\}^m d\bar{\sigma} \quad (10)$$

式(4)、(6)、(10)より、最終的に次式の塑性ひずみ増分を得る。

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{3B}{2} \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{D} \right\}^m \frac{1}{\bar{\sigma}^2} (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl})(ds_{kl} - db_{kl}) \quad (11)$$

ここで、 $B = 3K(m+1)/2E$ である。

背応力は、次式の Prager-Ziegler の移動硬化則を用いて定めた。

$$db_{ij} = (s_{ij} - b_{ij}) d\chi \quad (12)$$

式(12)で $d\chi$ は定数である。式(12)と Prager の適合条件 $df = 0$ および塑性仕事増分 $dW^p = (s_{ij} - b_{ij}) d\epsilon_{ij}^p = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^p$ の関係より、背応力増分は次式で表される。

$$db_{ij} = \frac{3}{2\bar{\sigma}^2} \{ (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl}) ds_{kl} \} - \frac{dR}{\bar{\sigma}} (s_{ij} - b_{ij}) \quad (13)$$

さらに、 D 、 m と同様に、流れ応力 R が次式で表せると仮定する。

$$R = R_0 \left\{ 1 - \lambda \exp \left(-\frac{p_a}{c_3} \right) \right\} \quad (14)$$

ここで、 R_0 、 λ 、 c_3 は材料定数である。また、 p_a は負荷方向の変化にかかわらず現負荷中を含めた累積塑性ひずみ $\int d\bar{\epsilon}^p$ である。雰囲気温度が一定の場合、式(14)の両辺を微分すると次式を得る。

$$dR = \frac{1}{c_3} (R_0 - R) d\bar{\epsilon}^p \quad (15)$$

したがって、式(13)、(15)より、背応力増分は最終的に次式となる。

$$db_{ij} = \frac{3}{2\bar{\sigma}^2} \{ (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl}) ds_{kl} \} - \frac{1}{c_3 \bar{\sigma}} (R_0 - R) (s_{ij} - b_{ij}) d\bar{\epsilon}^p \quad (16)$$

なお、背応力は負荷方向の変化がない場合、その負荷中は一定値である。すなわち、負荷方向が変化すると、負荷方向が変化した瞬間の背応力の値を新たな原点として適用し、次の負荷を計算する。

3.3 クリープひずみ増分 本研究で扱う 60 Sn-40 Pb はんだ材の 303 K でのクリープ曲線を図 1 に示す。図 1 は、3 種類の一定負荷 7.5 MPa、10 MPa、12.5 MPa においてクリープ試験を行ったときの結果である。いずれの一定荷重下においても、遷移クリープ領域がほとんど見られず、定常クリープと加速クリープのみでクリープ曲線が構成されていることが図 1 よりわかる。このことは、ある一定応力荷重下で微小時間内に生じる 60 Sn-40 Pb はんだ材のクリープひずみが、定常クリープ則で表示できることを示してい

Fig. 1 Creep curves

る。そこで、微小時間内に発生するクリープひずみが、次式の Norton 則⁽⁵⁾⁽⁷⁾ で表示できると仮定する。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3A}{2} \bar{\sigma}^{n-1} (s_{ij} - b_{ij}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

上式で $\dot{\epsilon}_{ij}$ は、クリープひずみ速度、 A , n は材料定数である。式(17)より、微分時間 dt 中に生ずるクリープひずみ増分は次式となる。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{3A}{2} \bar{\sigma}^{n-1} (s_{ij} - b_{ij}) dt \quad \dots\dots\dots (18)$$

3・4 クリープ変形を考慮した粘塑性構成モデル
式(1)に式(3), (11), (18)を代入すると次式を得る。

$$de_{ij} = \frac{ds_{ij} - db_{ij}}{2\mu} + \frac{3B}{2} \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{D} \right\}^m \frac{1}{\bar{\sigma}^2} (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl})(ds_{kl} - db_{kl}) + \frac{3A}{2} \bar{\sigma}^{n-1} (s_{ij} - b_{ij}) dt \quad \dots\dots\dots (19)$$

ところで、ある全ひずみ速度 $\dot{e}_{ij}$ で負荷をする場合、微小時間 dt 中に生ずる全ひずみ増分 de_{ij} は $\dot{e}_{ij} dt$ で表される。また、応力増分 ds_{ij} は、全ひずみ速度 $\dot{e}_{ij}$ に起因する応力速度を $\dot{s}_{ij}$ とすると、 $\dot{s}_{ij} dt$ で表されなければならない。したがって、式(19)は次式のひずみ速度と応力速度の関係となる。

$$\dot{e}_{ij} = \frac{\dot{s}_{ij} - \dot{b}_{ij}}{2\mu} + \frac{3B}{2} \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{D} \right\}^m \frac{1}{\bar{\sigma}^2} (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl}) \times (\dot{s}_{kl} - \dot{b}_{kl}) + \frac{3A}{2} \bar{\sigma}^{n-1} (s_{ij} - b_{ij}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

また、同様に背応力増分は式(16), (10)より次式となる。

$$\dot{b}_{ij} = \frac{3}{2\bar{\sigma}^2} \{ (s_{ij} - b_{ij})(s_{kl} - b_{kl}) \dot{s}_{kl} \} - \frac{B}{c_3 \bar{\sigma}^2} (R_0 - R)(s_{ij} - b_{ij}) \left\{ \frac{\bar{\sigma}}{D} \right\}^m \times (s_{kl} - b_{kl})(\dot{s}_{kl} - \dot{b}_{kl}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

すなわち、式(20), (21)が、本構成モデルの基本式である。

Fig. 2 Pure tension (experiment)

4. シミュレーション結果および考察

4・1 単軸負荷への適用 純粋引張負荷および引張り・圧縮繰返し負荷に3章の構成モデルを適用するために、まず、式(2)を考慮して、式(20), (21)を単軸状態に書き換えるとそれぞれ次式となる。

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{\dot{\sigma}_t - \dot{b}_t}{E} + \frac{2B}{3} \left\{ \frac{\sigma_t - b_t}{D} \right\}^m (\dot{\sigma}_t - \dot{b}_t) + A |\sigma_t - b_t|^n \text{sgn}(\sigma_t - b_t) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\dot{b}_t = \dot{\sigma}_t - \frac{2B}{3c_3} (R_0 - R) \left\{ \frac{\sigma_t - b_t}{D} \right\}^m (\dot{\sigma}_t - \dot{b}_t) \quad \dots\dots\dots (23)$$

式(22), (23)で、 ϵ_t , σ_t , b_t はそれぞれ単軸ひずみ、単軸応力、単軸の背応力である。また、 $\text{sgn}(x)$ は、変数 x が正の時は $+1$ 、負のときは -1 を与える関数である。

背応力を考慮して変形をシミュレーションする場合、負荷の方向が変化した瞬間の背応力が次の負荷方向をシミュレーションするための原点として適用される。すなわち、ある一定の負荷方向をシミュレーションしている間は、その適用原点(背応力)は変化しない。そこで、負荷方向が変化した瞬間の背応力を $\hat{b}_t$ で表し、現負荷中で $\hat{b}_t = 0$ を考慮すると、式(22), (23)はそれぞれ次式となる。

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{\dot{\sigma}_t}{E} + \frac{2B}{3} \left\{ \frac{\sigma_t - \hat{b}_t}{D} \right\}^m \dot{\sigma}_t + A |\sigma_t - \hat{b}_t|^n \text{sgn}(\sigma_t - \hat{b}_t) \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\dot{b}_t = \dot{\sigma}_t - \frac{2B}{3c_3} (R_0 - R) \left\{ \frac{\sigma_t - \hat{b}_t}{D} \right\}^m \dot{\sigma}_t \quad \dots\dots\dots (25)$$

ところで、式(24)の右辺第3項めは定常クリープを表す Norton 則である。ここで用いられる定数 A および n を実験から簡単に定めシミュレーションに用いるために、定数 A および n に関して以下のような処理を行った。

図2は、3種類のひずみ速度 0.001, 0.01, 0.1%/s で純粋引張試験を行ったときの結果であり、それぞれの応力-ひずみ関係を実線、一点鎖線、破線で示している。図2より明らかなように、はんだ材の場合は、一般金属材料と比較すると加工硬化が小さく、なおかつ、一定応力でひずみが進行するひずみ範囲が存在する。例えば、ひずみ速度 0.01%/s での負荷の場合、ひずみが約 1.3% で応力増分が零になり、ひずみ 1.3% 以降は一定応力 (16.7 MPa) でひずみが進行する。また、その一定応力の値は、与えるひずみ速度により著しく異なる。そこで、この一定応力と与えたひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ の関係が、Norton 則と同様な次式の関数で表示できると仮定した。

$$\dot{\epsilon}_0 = A_0 \sigma_{lim}^{n'} \quad (26)$$

ここで、 σ_{lim} は純粋引張試験において応力増分が零になる一定応力値であり、 A_0, n' は定数である。

さらに、繰返し負荷時の一定応力 σ_{lim} は以下のように仮定する。図3に、一例として、ひずみ速度 0.01%/sでの純粋引張実験の応力-ひずみ関係と、純粋引張実験と同一のひずみ速度での引張り・圧縮繰返し負荷実験での硬化安定時の引張側の応力-ひずみ関係との比較を示す。図3では比較のために、繰返し負荷実験での応力-ひずみ関係のひずみの値を原点にシフトして表示している。図3から明らかなように、純粋引張実験で見られる一定応力値が、繰返し負荷安定時の応力-ひずみ関係でも存在し、それらの値はほぼ等しい。このことから、引張り・圧縮繰返し負荷の場合も背応力を考慮すれば、式(26)と同様に一定応力値とひずみ速度の関係を次式のように表せられると仮定できる。

$$\dot{\epsilon}_0 = A_1 (\sigma_{lim} - \bar{b}_t)^{n''} \quad (27)$$

上式で A_1, n'' は定数である。ここで、簡単化のために $n' = n'' = n$ とすると、式(26)、(27)より定数 A_1 は次式で与えられる。

Fig. 3 Comparison of pure tension with cyclic loading

Fig. 4 Simulation of pure tension

$$A_1 = \left(\frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{lim} - \bar{b}_t} \right)^n A_0 \quad (28)$$

また、式(28)の A_1 は、応力-ひずみ関係が一定応力 σ_{lim} に収束したときの値であり、そのまま、式(24)右辺第3項めの定数 A と同値として扱うことができない。そこで、式(24)右辺第3項めの定数 A が、適用原点のひずみ(背応力に対応するひずみ) ϵ_t^0 からのひずみの大きさ $|\epsilon_t - \epsilon_t^0|$ の増加に伴い、 A_1 に収束するとし、さらに、式(28)を用いて次式で表せると仮定する。

$$A = \left\{ 1 + C \exp \left(-\frac{|\epsilon_t - \epsilon_t^0|}{c_4} \right) \right\} \left(\frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{lim} - \bar{b}_t} \right)^n A_0 \quad (29)$$

上式で、 C, c_4 は定数である。

4.2 純粋引張りおよび一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷

図4に、純粋引張時の応力-ひずみ関係のシミュレーション結果を示す。図4で実線、一点鎖線、破線はそれぞれひずみ速度 0.001, 0.01, 0.1%/sでのシミュレーション結果を示し、○, △, □印は図2の実験結果を示している。図4でシミュレーション結果は実験結果をほぼよく表しているが、0.1%/sのひずみ速度で、ひずみ約0.8%からシミュレーション結果と実験結果のずれが見られる。これは、式(28)の導出で $n' = n$ としたための差であると考えられる。

図5に、一例としてひずみ振幅 0.5%、ひずみ速度 0.1%/sで繰返し負荷を行ったときの実験結果を示す。図5より、1サイクルめから2サイクルめに繰返し硬化が見られるが、その後は繰返し硬化がほとんど見られないことがわかる。図6に構成モデルでのシミ

Fig. 5 Cyclic tension compression loading (strain rate: 0.1%/s, strain amplitude: 0.5%, experiment)

ュレーション結果を示す。図6と図5を比較すると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4および図6のシミュレーションにおいて、構成モデルの材料定数を以下のように定めた。まず、3種類のひずみ速度での純粋引張実験から σ_{lim} を求め、その値と式(26)より A_0 および n を算出した。また、材料定数 D_0 , α , c_1 , m_0 , β , c_2 , R_0 , λ , c_3 , C は、他の2種類のひずみ速度 0.001%/s および 0.01%/s を含めたすべての繰返し負荷と純粋引張実験に基づいて、最適な値を試行錯誤的に求めた。その結果、それらの材料定数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} D_0 &= 33 \text{ MPa}, m_0 = 2.60, R_0 = 15.0 \text{ MPa} \\ \alpha &= 0.380, \beta = 0.100, \lambda = 0.0005 \\ c_1 = c_2 = c_3 &= 0.0005, A_0 = 1.11 \times 10^{-6}, n = 3.23 \\ C &= 18.0, c_4 = 0.150 \end{aligned} \quad \cdots \cdots (30)$$

4・3 ひずみ速度変化を伴う負荷 4・2節で定めた材料定数、式(30)を用いて、ひずみ速度変化を伴う

Fig. 6 Cyclic tension-compression loading (strain rate: 0.1%/s, strain amplitude: 0.5%, simulation)

Fig. 7 Pure tension with change of strain rate

負荷のシミュレーションを行った。まず、純粋引張中にひずみ速度変化がある場合のシミュレーションを試みた。図7に、ひずみ 0~0.2% でひずみ速度 0.001%/s、ひずみ 0.2~0.4% でひずみ速度 0.01%/s、ひずみ 0.4~0.8% でひずみ速度 0.1%/s と段階的にひずみ速度を変化させたときの応力-ひずみ関係を示す。図7で○印は実験結果であり、実線はシミュレーション結果である。

図8は、ひずみ振幅 0.5% での引張り・圧縮繰返し負荷を引張側のひずみ速度を 0.01%/s、圧縮側のひずみ速度を 0.001%/s で行ったときの実験結果である。図8より、引張側の硬化量が、圧縮側の硬化量に比べ

Fig. 8 Cyclic tension compression loading with different strain rate of 0.01%/s in tensile side from that of 0.001%/s in compressive side (experiment)

Fig. 9 Cyclic tension-compression loading with different strain rate of 0.01%/s in tensile side from that of 0.001%/s in compressive side (simulation)

Fig. 10 Cyclic tension-compression loading under strain rate of 0.01%/s during $|\varepsilon_e| < 0.2$ and 0.001%/s during $|\varepsilon_e| \geq 0.2$ (experiment)

Fig. 11 Cyclic tension-compression loading under strain rate of 0.01%/s during $|\varepsilon_e| < 0.2$ and 0.001%/s during $|\varepsilon_e| \geq 0.2$ (simulation)

て著しく大きいことがわかる。図8と同一負荷条件の繰返し負荷のシミュレーション結果を図9に示す。

図10は、ひずみ振幅0.5%、ひずみ速度0.001%/sで引張り・圧縮繰返し負荷をループが安定するまで与えた後、ひずみが-0.2%から+0.2%の間で、ひずみ速度を0.01%/sに変化させて行ったときの実験結果である。図10から、ひずみ速度が速い範囲では硬化量が著しく大きくなることがわかる。また特に、速いひずみ速度から遅いひずみ速度に変化した場合、応力が徐々に減少し再び遅いひずみ速度での応力-ひずみ曲線に一致する。図10と同一負荷条件での繰返し負荷のシミュレーション結果を図11に示す。図7~11より、いずれの負荷に対してもシミュレーションと実験結果はよく一致していることがわかる。特に、図10で見られるひずみ速度の急変に伴う応力変動の特徴的な現象を的確に表している。

5. 結 言

本研究では、ひずみ速度依存性が著しい60Sn-40Pbはんだ材の変形挙動を記述するために、負荷中のクリープ変形を考慮して構成モデルを構築した。そして、構成モデルのひずみ速度を変化させた純粋引張負荷および繰返し負荷への適用性について検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 全ひずみ増分を弾性ひずみ増分、塑性ひずみ増分、クリープひずみ増分の和とした。そして、塑性ひずみ増分をPrager-Zieglerの移動硬化則、クリープひずみ増分をNorton則にそれぞれ基づいて算出し構成モデルを構築した。

(2) 構成モデルで用いる材料定数は、3種類のひずみ速度での純粋引張実験と繰返し負荷実験により、比較的容易に定められる。

(3) 上記(2)で定めた材料定数を用いて純粋引張中および繰返し負荷中にひずみ速度が変化する負荷のシミュレーションが可能である。特に、ひずみ速度の急変に伴う応力変動の特徴的な現象を的確に表現できる。

なお、本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)、および、日本学術振興会特別研究員(大口)に交付する科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の援助を受けた。謝意を表す。

文 献

- (1) Solomon, H. D., Fatigue of 60/40 Solder, *IEEE CHMT* 9, 4 (1986), 423-432.
- (2) Guo, Z., Pao, H. Y. and Conrad, H., Plastic deformation kinetics of 95.5Sn-4Cu0.5Ag solder joints, *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, 117(1995), 100-104.
- (3) 大川健一・佐々木克彦・石川博将, 繰返し粘塑性構成式を用いた60Sn-40Pb材の疲労寿命予測, *機論*, 62-594, A (1996), 202-208.
- (4) 田中英一・秦茂則・宇佐見卓也, 改良9Cr-1Mo鋼の非弾性挙動の温度依存性と温度変動履歴依存性, *機論*, 60-569, A (1994), 198-204.
- (5) 田中英一・鈴木晴久, 改良9Cr-1Mo鋼の温度履歴依存性のモデル化, *日本機械学会東海支部第44期総会講演会講演論文集*, (1995-3), 39-40.
- (6) Freed, A. D. and Walker K. P., Viscoplasticity with Creep and Plastic Bounds, *Int. J. Plasticity*, 9(1993), 213-242.
- (7) Ohno, N., Kawabata, M. and Naganuma, J., Aging Effects on Monotonic Stress-Paused, and Alternating Creep of Type 304 Stainless Steel, *Int. J. Plasticity*, 6 (1990), 315-327.

- (8) 河井昌道, 塑性ひずみによって生じるクリープ異方性の記述(第1報, 表現定理に基づく…形式), 機論, **56** 522, A (1990), 326-334.
 - (9) Lee, K. D. and Krempl, E., Uniaxial thermomechanical loading. Numerical experiments using the thermal viscoplasticity theory based on overstress, *Eur. J. Mech., A/Solids*, **10**(1991), 173-192.
 - (10) 石川博将・佐々木克彦・中川貴雄, 背応力の記憶項を考慮した繰返し塑性構成式, 機論, **59**-558, A(1993), 82-88.
 - (11) Freed, A. D. and Walker, K. P., Viscoplastic model development with an eye towards characterization, *ASME, MD-43/AMD-168* (1993), 71-88, Material Parameter Estimation for Modern Constitutive Equations.
 - (12) 佐々木克彦・石川博将, ハイブリッド繰返し塑性構成式の sinusoidal 負荷への適用, 機論, **56** 532, A(1990), 168-174.
-