

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4899058号  
(P4899058)

(45) 発行日 平成24年3月21日(2012.3.21)

(24) 登録日 平成24年1月13日(2012.1.13)

(51) Int.Cl.	F I
<b>GO 1 N 3/00 (2006.01)</b>	GO 1 N 3/00 A
	GO 1 N 3/00 R

請求項の数 5 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2007-46689 (P2007-46689)	(73) 特許権者	504409543
(22) 出願日	平成19年2月27日 (2007.2.27)		国立大学法人秋田大学
(65) 公開番号	特開2008-209262 (P2008-209262A)		秋田県秋田市手形学園町1番1号
(43) 公開日	平成20年9月11日 (2008.9.11)	(74) 代理人	100110537
審査請求日	平成22年1月21日 (2010.1.21)		弁理士 熊谷 繁
		(72) 発明者	大口 健一
			秋田県秋田市手形学園町1-1 国立大学 法人秋田大学内
		審査官	福田 裕司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

瞬間的負荷とひずみ保持を繰返す階段波負荷試験を実施し、瞬間的負荷部に対応する応力-ひずみ曲線から応力-弾塑性ひずみ曲線を取得する第一工程と、前記応力-弾塑性ひずみ曲線から弾・塑性特性に関する材料定数であるヤング率と塑性接線係数を導出する第二工程と、応力緩和曲線と前記第二工程で導出したヤング率から、応力と定常クリープひずみ速度の関係を取得する第三工程と、繰返し応力緩和曲線と前記第二工程で導出したヤング率から、応力とクリープひずみ速度の関係を取得し、その結果と前記第三工程の結果から、遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比を取得する第四工程と、前記第三工程及び第四工程で得た情報から、定常クリープ則と遷移クリープ則の材料定数を導出する第五工程とを含むことを特徴とする弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法。

【請求項2】

前記第一工程では、階段波負荷の全ての瞬間的負荷から弾塑性変形部のみを抽出し、それらをつなぎ合わせることで、弾・塑性特性の評価に必要な応力-弾・塑性ひずみ曲線を取得することを特徴とする請求項1記載の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法。

【請求項3】

前記第二工程では、弾・塑性特性を表す材料定数であるヤング率と塑性接線係数を、応力-弾塑性ひずみ曲線をRamberg-Osgood則で近似することにより取得することを特徴とする請求項1記載の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法。

【請求項4】

10

20

前記第三工程では、ひずみ  $\epsilon_{end}$  を保持することで得られる応力緩和曲線を用いて、応力と定常クリープひずみ速度の関係を取得することを特徴とする請求項1記載の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法。

【請求項5】

前記第四工程では、繰返し応力緩和曲線を構成する複数の応力緩和曲線と前記第二工程で取得したヤング率から、各応力緩和曲線の応力とクリープひずみ速度の関係を取得し、この結果と前記第三工程で得られた結果から、それぞれクリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度を算出し、前記クリープひずみ速度と前記定常クリープひずみ速度の差から、遷移クリープひずみ速度を算出し、算出した定常クリープひずみ速度と遷移クリープ速度を用いて、遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比を算出することを特徴とする請求項1記載の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、弾・塑性・クリープ特性評価を、瞬間的負荷部とひずみ保持部から成る1種類の階段波負荷試験のみで実行可能とする弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、計算コストの削減のために、弾・塑性有限要素解析のみに因っていた機器の設計分野においても、弾・塑性・クリープ有限要素解析が実行される機会が増えてきている。

20

これは、クリープ変形が生じる部位の存在が予測される機器に対して、より高い安全性が要求されるようになった為である。

また、計算技術の発展により、弾・塑性・クリープ有限要素解析が従来に比べ短時間で実行できるようになったこともその一因と考えられる。

弾・塑性・クリープ有限要素解析を実行するためには、解析対象となる材料の弾・塑性・クリープ特性を調査し、その特性を反映させた材料定数を決定しなければならない。

これらの材料定数は、数種類のひずみ速度による引張試験と数種類の保持応力によるクリープ試験から決定する必要がある。

また、変形特性の温度依存性を考慮する際には、これらの試験は複数の温度下で実行しなければならず、弾・塑性・クリープ有限要素解析の実施までには、さらに多くの試験の実施が不可欠となる。

30

特に、クリープ試験は長時間におよぶことが多いため、このような試験を多数実施することは、材料定数を決定し弾・塑性・クリープ有限要素解析を実施するまでに膨大な時間を要することを意味する。

すなわち、計算技術の発展により弾・塑性・クリープ解析を如何に高速で実行できるようになっても、解析を実行するまでのクリープ試験時間を短縮できなければ、弾・塑性・クリープ解析を実行するためのハードルは依然高いままである。

以上のことから、材料の弾・塑性・クリープ特性を極少数の実験から速やかに評価し、この特性を反映した材料定数を的確に導出できる弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法の構築が望まれている。

40

【0003】

なお、公知技術として、IC(集積回路)チップをプリント基板に実装したICパッケージなどの電子機器において、寿命サイクル数を簡単に正確に求めて、信頼性をより簡単に正確に評価できる電子機器の信頼性評価方法及びその信頼性評価装置が知られている(特許文献1を参照)。

この公知技術は、特定の電子機器に対する周期的温度条件下にさらす加速試験、すなわち温度サイクル試験を行って、全ての電気機器に普遍的な寿命サイクル数と歪み振幅との関係式、すなわち寿命歪み関係式を求め、任意の電子機器の解析モデルに対して熱応力シミュレーションを行い、歪みの振幅を算出し、次に寿命歪み関係式に、任意の電子機器の解

50

析モデルに対する歪み振幅を代入して、任意の電子機器の解析モデルの寿命サイクル数を求めるものである。

【 0 0 0 4 】

【特許文献 1】特開 2 0 0 0 - 4 6 9 0 5 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 5 】

本発明は、従来は数種類のひずみ速度下での引張試験と数種類の保持応力でのクリープ試験を実施しなければならなかった弾・塑性・クリープ特性評価を、瞬間的負荷部とひずみ保持部から成る 1 種類の階段波負荷試験のみで実行可能とする弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 6 】

本発明の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法は、瞬間的負荷とひずみ保持を繰返す階段波負荷試験を実施し、瞬間的負荷部に対応する応力 - ひずみ曲線から応力 - 弾塑性ひずみ曲線を取得する第一工程と、前記応力 - 弾塑性ひずみ曲線から弾・塑性特性に関する材料定数であるヤング率と塑性接線係数を導出する第二工程と、応力緩和曲線と前記第二工程で導出したヤング率から、応力と定常クリープひずみ速度の関係を取得する第三工程と、繰返し応力緩和曲線と前記第二工程で導出したヤング率から、応力とクリープひずみ速度の関係を取得し、その結果と前記第三工程の結果から、遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比を取得する第四工程と、前記第三工程及び第四工程で得た情報から、定常クリープ則と遷移クリープ則の材料定数を導出する第五工程とを含むものである。

20

【 0 0 0 7 】

前記第一工程では、階段波負荷の全ての瞬間的負荷から弾塑性変形部のみを抽出し、これらをつなぎ合わせることで、弾・塑性特性の評価に必要な応力 - 弾・塑性ひずみ曲線を取得するものである。

【 0 0 0 8 】

前記第二工程では、弾・塑性特性を表す材料定数であるヤング率と塑性接線係数を、応力 - 弾塑性ひずみ曲線を Ramberg-Osgood 則で近似することにより取得するものである。

30

【 0 0 0 9 】

前記第三工程では、ひずみ  $\epsilon_{end}$  を保持することで得られる応力緩和曲線を用いて、応力と定常クリープひずみ速度の関係を取得するものである。

【 0 0 1 0 】

前記第四工程では、繰返し応力緩和曲線を構成する複数の応力緩和曲線と前記第二工程で取得したヤング率から、各応力緩和曲線の応力とクリープひずみ速度の関係を取得し、この結果と前記第三工程で得られた結果から、それぞれクリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度を算出し、前記クリープひずみ速度と前記定常クリープひずみ速度の差から、遷移クリープひずみ速度を算出し、算出した定常クリープひずみ速度と遷移クリープ速度を用いて、遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比を算出するものである。

40

【発明の効果】

【 0 0 1 1 】

本発明の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法は、材料の弾・塑性・クリープ特性を極少数の実験から速やかに評価し、この特性を反映した材料定数を的確に導出することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 1 2 】

本発明の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法の一実施例を図面に基づいて、以下に説明する。

50

図1は、本発明の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法の階段波負荷試験の概念模式図を示す。

図1では、階段波負荷試験のIS部が瞬間的負荷部、MS部がひずみ保持部に相当する。

IS部ではひずみ増分 $\epsilon_{is}$ が瞬間的に与えられるため、そこに対応する応力-ひずみ関係ではクリープの影響が排除される。

MS部では応力緩和が生じる。

また、この階段波負荷試験では、ひずみ $\epsilon_{end}$ に到達したら $t_{end}$ の間、ひずみ $\epsilon_{end}$ を保持し、MS部よりも長い時間に渡る応力緩和曲線を取得する。

表1に階段波負荷試験条件の例、 $\epsilon_{end} = 4.4 \times 10^{-2}$ 、 $t_{end} = 600 \text{ sec}$ 、を示す。

【0013】

【表1】

階段波負荷試験条件の例

Temperature	295 [K]
$\Delta\epsilon_{is}$ Strain Increment for Instantaneous Straining	$2.75 \times 10^{-4}$
$\Delta t_{ms}$ Time for Maintaining Strain	0.5 [sec.]
$\epsilon_{end}$ Strain at End of Straining	$4.4 \times 10^{-2}$
$\Delta t_{end}$ Time for Maintaining Strain at End of Straining	600 [sec.]

【0014】

図2は、階段波負荷試験で得られる応力-ひずみ曲線である。

図2の丸印で示す初期部での応力の増減は、図3の繰返し応力緩和曲線のように瞬間的負荷による応力の増加とひずみ保持による応力緩和が繰返し生じることに起因する。

また、丸印で示す終端部での応力の低下は、ひずみ $\epsilon_{end}$ で $t_{end}$ 間ひずみを保持したことで生じる図4の応力緩和曲線のように応力緩和に起因する。

【0015】

本発明では、図2の応力-ひずみ曲線と図3、図4の応力緩和曲線を、以下の5つの技術に適用することで弾・塑性・クリープ特性を評価する。

(1) 瞬間的負荷部に対応する応力-ひずみ曲線から応力-弾塑性ひずみ曲線を取得する技術。

(2) 前記応力-弾塑性ひずみ曲線から、弾・塑性特性に関する材料定数を導出する技術。

(3) 応力緩和曲線から、応力とクリープひずみ速度の関係を取得する技術。

(4) 繰返し応力緩和曲線から、遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比を取得する技術。

(5) 上記(3)、(4)で得た情報から、定常クリープ則と遷移クリープ則の材料定数を導出する技術。

上記5つの技術の詳細は、以下の通りである。

【0016】

10

20

30

40

(1) の技術：図5は、階段波負荷により応力の増減を繰返す応力-ひずみ曲線の模式図である。階段波負荷では、図5で示すように、 $i-1$ 番目のひずみ保持過程MS <sub>$i-1$</sub> で応力が $(\sigma_{\max})_{i-1}$ から $(\sigma_{\min})_{i-1}$ まで緩和させ、その後 $i$ 番目の瞬間的負荷を行う。この $i$ 番目の負荷は、弾性変形のみ生じさせる $(\sigma_{\min})_{i-1}$ から $(\sigma_{\max})_{i-1}$ までの負荷IS <sub>$i$</sub> <sup>e</sup>部と、弾・塑性変形となる $(\sigma_{\max})_{i-1}$ から $(\sigma_{\max})_i$ までのIS <sub>$i$</sub> <sup>ep</sup>部より成る。

本技術では、階段波負荷の全ての瞬間的負荷からIS<sup>ep</sup>部のみ抽出し、これらをつなぎ合わせることで、弾・塑性特性の評価に必要な応力-弾・塑性ひずみ曲線を取得する。

図6の丸印で示す曲線は、この処理を図2の応力-ひずみ曲線に適用して取得した応力-弾塑性ひずみ曲線に相当する。 10

【0017】

(2) の技術：弾・塑性特性を表す材料定数のヤング率と塑性接線係数は応力-弾塑性ひずみ関係から取得する。

特に、塑性接線係数は、応力あるいはひずみの関数として取得すれば、正確な変形シミュレーションが可能となる。

本技術では、図6で得た応力-弾・塑性ひずみ曲線を、弾性ひずみと塑性ひずみの和で弾・塑性ひずみを表すRamberg-Osgood則で図7のように応力-弾・塑性ひずみ曲線を近似する。

Ramberg-Osgood則は、数1の形で与えられる。 20

【0018】

【数1】

$$\varepsilon_t^{\text{ep}} = \frac{\sigma_t}{E} + \varepsilon_0 \left( \frac{\sigma_t}{D} \right)^m$$

【0019】

数1で、 $\varepsilon_t^{\text{ep}}$ は弾・塑性ひずみ、 $\sigma_t$ は応力、 $E$ はヤング率、 $\varepsilon_0$ は基準塑性ひずみ、 $D$ は $\varepsilon_0$ に対応する基準応力、 $m$ は硬化指数である。 30

また、右辺第1、2項目は、それぞれ弾性ひずみと塑性ひずみに相当する。

したがって、応力と塑性ひずみの関係を表す塑性接線係数 $H$ は、右辺第2項目を微分すれば、数2のように応力の関数として得られる。

【0020】

【数2】

$$H = d\sigma_t / d\varepsilon_t^{\text{p}} = \frac{D}{m\varepsilon_0} \left( \frac{\sigma_t}{D} \right)^{1-m}$$

40

【0021】

Ramberg-Osgood則による近似処理は以下の順で行う。

(i) 応力とひずみが線形関係にある低応力域で、応力とひずみの関係を直線近似してヤング率 $E$ を決定する。

(ii) 基準塑性ひずみを適当に設定し(図7の近似では $\varepsilon_0 = 5.0 \times 10^{-4}$ )、対応する基準応力 $D$ を決定する。

(iii) (i), (ii)で決定した $E$ と $D$ の値と、応力-弾・塑性ひずみ曲線の任意の点における応力とひずみの値を用いて硬化指数 $m$ を算出する。

以上のRamberg-Osgood則による近似処理を通じ、ヤング率や塑性接線係数が取得できる。

【0022】

50

(3)の技術：ひずみ保持による応力緩和では、クリープひずみの増加量と弾性ひずみの減少量が釣り合った状態にある。

本技術では、このことに着目し、応力緩和曲線から得た「応力と応力速度の関係」から、クリープ特性を評価するために不可欠となる「応力とクリープひずみ速度の関係」を取得する。

「応力と応力速度の関係」は、応力緩和曲線上の複数の点で、図8のように接線の傾きから応力速度を算出して取得する。

算出した応力速度は、数3の応力速度とクリープひずみ速度の関係に適用する。

【0023】

【数3】

$$d\varepsilon_1^c/dt = -d\varepsilon_1^e/dt = -(d\sigma_1/dt)/E$$

【0024】

数3で $d\varepsilon_1^c/dt$ はクリープひずみ速度、 $d\varepsilon_1^e/dt$ は弾性ひずみ速度、 $d\sigma_1/dt$ は応力速度、 $E$ はヤング率である。

応力緩和曲線上の複数の応力点で取得した応力速度を数3に適用すれば、「応力とクリープひずみ速度の関係」が得られる。

【0025】

10

20

(4)の技術：本発明では、数4のようにクリープひずみ速度 $d\varepsilon^c/dt$ を遷移クリープひずみ速度 $(d\varepsilon^c/dt)_I$ と定常クリープひずみ速度 $(d\varepsilon^c/dt)_{II}$ の和で表す。

【0026】

【数4】

$$d\varepsilon^c/dt = (d\varepsilon^c/dt)_I + (d\varepsilon^c/dt)_{II}$$

【0027】

また、遷移クリープひずみ速度は数5のように、定常クリープひずみ速度に比例する型で与える。

【0028】

【数5】

$$(d\varepsilon^c/dt)_I = C_1 \cdot (d\varepsilon^c/dt)_{II}$$

【0029】

数5の比例係数 $C_1$ は、遷移クリープひずみが発達するとゼロとなる関数として、数6で表す。

【0030】

【数6】

$$C_1 = C_1 \exp\left(-\frac{\bar{\varepsilon}_1^c}{C_2}\right)$$

【0031】

(4)の技術は、数5、数6を定式化するために必要となる「遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比」を取得するためのものである。

「遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比」は、以下の手順で取得する

30

40

50

。

## 【 0 0 3 2 】

(i) ひずみ  $\epsilon_{end}$  で  $t_{end}$  間ひずみを保持すること (図 1、2 参照) で得られる応力緩和曲線では、クリープひずみが十分に発達しているため、クリープ変形は定常クリープのみで生じる。

そこで、ここで得られる応力緩和曲線を (3) の技術に適用して、「応力とクリープひずみ速度の関係」を取得する。

そして、この関係を図 9 のようにプロットして、この関係の近似曲線から、定常クリープ則を定式化する。

図 9 では、定常クリープ則として数 7 の Norton 則を用いた。

10

## 【 0 0 3 3 】

## 【数 7】

$$(d\bar{\epsilon}^c / dt)_{II} = A\bar{\sigma}^n$$

## 【 0 0 3 4 】

(ii) 図 10 の繰返し応力緩和曲線を構成する複数の応力緩和曲線に (3) の技術を適用し、各応力緩和曲線の  $\sigma_{max} \sim \sigma_{min}$  における「応力とクリープひずみ速度の関係」を取得する。

20

## 【 0 0 3 5 】

(iii) (ii) で取得した複数の応力緩和曲線でのクリープひずみ速度  $d\bar{\epsilon}^c / dt$  中の定常クリープひずみ速度  $(d\bar{\epsilon}^c / dt)_{II}$  を、(i) で定式化した定常クリープ則から算出する。

そして、 $d\bar{\epsilon}^c / dt$  と  $(d\bar{\epsilon}^c / dt)_{II}$  の差から、遷移クリープひずみ速度  $(d\bar{\epsilon}^c / dt)_I$  を算出する。

さらに、 $d\bar{\epsilon}^c / dt$ 、 $(d\bar{\epsilon}^c / dt)_{II}$ 、 $(d\bar{\epsilon}^c / dt)_I$  の各クリープひずみ速度を積算して、全クリープひずみ量、定常クリープひずみ量、遷移クリープひずみ量を求める。

## 【 0 0 3 6 】

30

(iv) (iii) で算出した定常クリープひずみ速度と遷移クリープひずみ速度を用いて、「遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比」を算出する。

## 【 0 0 3 7 】

(5) の技術：定常クリープ則の材料定数は、(4) の技術の手順 (i) により決定する。

遷移クリープひずみ則は、(4) の技術で取得した「遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比」と、その比を取得した時点での遷移クリープひずみの関係を図 11 のようにプロットし、その近似曲線から数 6 中の定数の値を決定することで定式化する。

。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 3 8 】

40

【図 1】本発明の弾・塑性・クリープ特性の迅速評価方法の階段波負荷試験の概念模式図である。

【図 2】階段波負荷試験で得られる応力 - ひずみ曲線の模式図である。

【図 3】繰返し応力緩和曲線の模式図である。

【図 4】応力緩和曲線の模式図である。

【図 5】階段波負荷により応力の増減を繰返す応力 - ひずみ曲線の模式図である。

【図 6】応力 - 弾・塑性ひずみ曲線の模式図である。

【図 7】応力 - 弾・塑性ひずみ曲線の近似模式図である。

【図 8】応力緩和中の応力速度の模式図である。

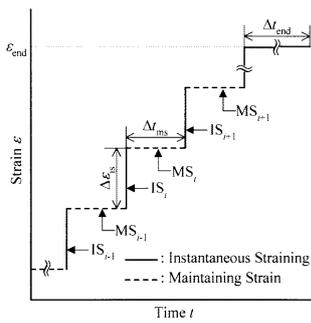
【図 9】応力緩和曲線から取得したクリープひずみ速度と応力との関係の模式図である。

50

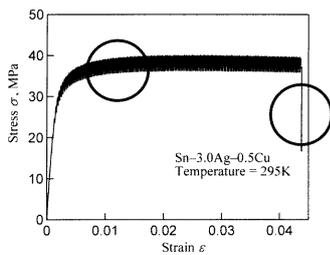
【図10】繰り返し応力緩和曲線の模式図である。

【図11】遷移クリープひずみ速度と定常クリープひずみ速度の比と遷移クリープひずみの関係の模式図である。

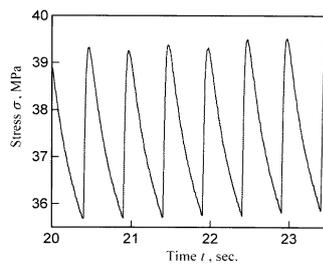
【図1】



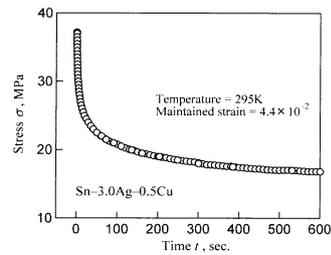
【図2】



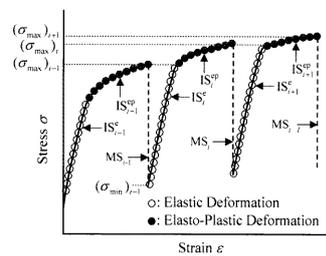
【図3】



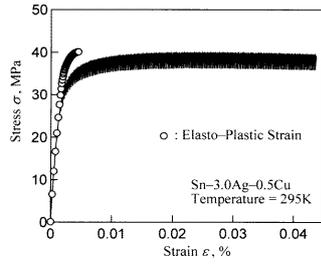
【図4】



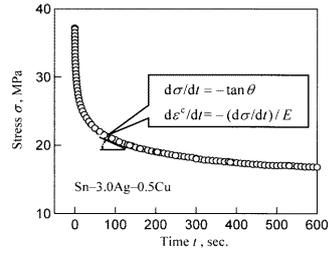
【図5】



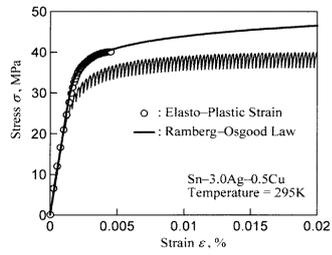
【 6 】



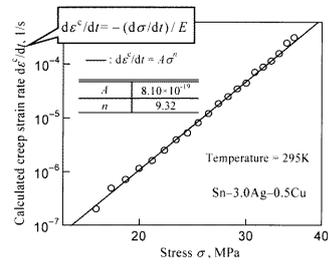
【 8 】



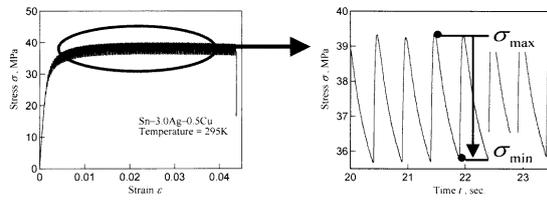
【 7 】



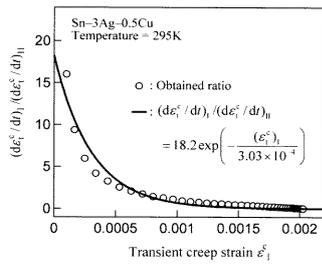
【 9 】



【 10 】



【 11 】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2000-214058(JP,A)  
特開昭57-203935(JP,A)  
特開平08-145864(JP,A)  
特開平09-318515(JP,A)  
特開2005-345308(JP,A)  
特開2007-085778(JP,A)  
大口健一 他, "段階波負荷による鉛フリーはんだの弾・塑性・クリープ特性評価", [No. 06-1] 日本機械学会2006年度年次大会講演論文集(1), 社団法人日本機械学会, 2006年 9月15日, 731~732頁

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 3/00~3/62  
JSTPlus(JDreamII)