

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560070

 研究課題名（和文） 応力緩和モニタリングによる
電子実装基板用インデンテーションクリープ法の高精度化

 研究課題名（英文） Improvement of Indentation Creep Method for Electronic Packages
by Monitoring Stress Relaxation Behavior

研究代表者

大口 健一 (OHGUCHI KEN-ICHI)

秋田大学・工学資源学研究科・准教授

研究者番号：30292361

研究成果の概要（和文）：インデンテーションクリープ試験は、電子実装基板の強度信頼性評価技術としての実用化が期待されている。しかし、クリープ則を導出しても、引張クリープ試験によるクリープ則と一致しない問題を有する。本研究では、この問題が応力の算出基準面積の定義に起因することを示した。その上で、インデンテーション試験における新たな基準面積と、応力緩和挙動からクリープ特性を評価する、新たなインデンテーション試験法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The indentation creep test is expected to be put into practical use for evaluating the strength reliability of electronic packages. However, there is a problem that the creep law derived by the test does not correspond to that derived by tensile creep tests. This study showed that this problem was caused by the definition of the reference area for calculating the stress in the indentation test. Based on this fact, a new reference area for indentation tests and a new indentation test method which evaluates creep characteristics by monitoring stress relaxation behavior were proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

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：応力緩和、インデンテーション、クリープ、電子実装基板

1. 研究開始当初の背景

電子実装基板の設計では、はんだ接続部の強度信頼性を確保することが重要となる。そのためには、はんだ材の変形特性を正確に反映させた、有限要素解析(FEA)を実行する必要がある。しかし、部品実装時の熱影響により、はんだ接続部は電極との接合面に Cu/Sn 系の金属間化合物層(IMCs層)を有する。高密度実装のために微細化したはんだ接続部で

は、その内部に占める IMCs 層の割合は大きくなる。このため、微細はんだ接続部は、はんだ材を単体で評価した場合は異なる変形特性を有することになる。

以上のことから、はんだ接続部の変形特性を実機上で評価することができる試験技術の確立が望まれている。特に、はんだ材の変形では、クリープ変形が支配的であるため、クリープ特性を実機上で評価することがで

きる試験技術の確立が望まれている。

このような試験技術としては、評価部に圧子を押し込むインデンテーション試験が有望とされている。すなわち、一定荷重で圧子を評価部に押し込み、押し込み深さの時間変化からクリープ特性を評価する、インデンテーションクリープ法が有望視されている。しかし、この試験法は、クリープ則を導出しても、バルク材の引張クリープ試験で得られるものと一致しないという問題を有する。

2. 研究の目的

引張クリープ試験結果とインデンテーションクリープ試験結果を一致させる方法に関する研究は、これまでもなされている。しかし、そこで提案されている方法は、経験則的な面が強く、理論的裏付けが弱い。

そこで、本研究では、クリープ則の不一致の原因を明らかにすると共に、理論的な裏付けを有する、この問題の解決法について検討した。また、これらの検討結果に基づき、インデンテーション試験による新たなクリープ特性評価法を提案した。

3. 研究の方法

(1) 研究の流れ

クリープ則の不一致の原因として、バルク材とインデンテーション試験における試験部では、クリープ特性の評価領域のサイズが異なること、いわゆる寸法効果を挙げる研究例も存在する。そこで、本研究では、まず、インデンテーションクリープ試験を模擬した FEA による数値実験を実施し、この寸法効果の有無について検討した。すなわち、バルク材の引張クリープ試験で得られたクリープ則の材料定数を用いて、インデンテーションクリープ試験の FEA を実施した。この解析結果には、インデンテーションクリープ試験でクリープ則を定式化する際に、最もよく用いられている材料定数の導出法を適用した。そして、ここで導出した材料定数と、解析に使用した材料定数を比較することにより、寸法効果の有無について検討した。

この検討の結果、クリープ則の不一致の原因は寸法効果ではなく、応力の算出時に用いる基準面積にあることが判明した。このため、圧子を押し込み、その位置を保持するインデンテーションの FEA による数値実験を実行し、そこでみられる応力緩和挙動から、インデンテーション試験に適した応力の算出基準面積について考察した。そして、この考察結果に基づき、引張クリープ試験と同じクリープ則を導出することが可能な、新たなインデンテーション試験法について検討した。

(2) 数値実験方法

全ての数値実験は、汎用 FEA ソフト ANSYS を用いて、高さ 0.05mm のダイヤモンド製ビ

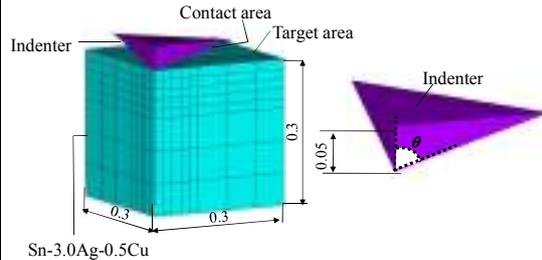


図 1 FE モデル

表 1 Sn-3.0Ag-0.5Cu 材の材料定数

E	ν	σ_Y	ET	A	n
21 GPa	0.35	38 MPa	162 MPa	8.10×10^{-19}	9.32

ッカーズ圧子を 0.6mm × 0.6mm × 0.3mm の Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだ試料に押し込む工程を模擬して実施した。FE モデルは、図 1 に示すように 3 次元 4 分の 1 モデルで作成し、総要素数 918、総節点数 904 でメッシュ分割した。圧子と試料の界面には接触要素を配置した。試料への圧子の押し込みは、圧子の上面に負荷を与えて行った。

Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだの変形は、弾・塑性・クリープ構成モデルで表した。弾・塑性構成モデルには、ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、降伏応力 σ_Y 、材料接線係数 ET を用いる二直線近似の等方硬化則を用いた。クリープ構成モデルには、次式で表される定常クリープ則の Norton 則を用いた。

$$d\epsilon^c / dt = A\sigma^n \quad (1)$$

式(1)で $d\epsilon^c / dt$ はクリープひずみ速度、 A と n は材料定数である。

Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだの弾・塑性・クリープ構成モデルに用いた材料定数を表 1 に示す。なお、表 1 の材料定数は、バルク試験片を用いた引張試験と引張クリープ試験で得たものである。

ビッカーズ圧子の変形は弾性変形のみとして、ヤング率 1140GPa、ポアソン比 0.07 を用いて表した。

4. 研究成果

(1) インデンテーションクリープの数値実験

① 負荷方法： インデンテーションクリープ試験では、任意の荷重 F_m に到達するまで、圧子を一定の負荷速度で試料に押し込み、荷重 F_m に到達後は一定時間 t_m の間その荷重値を保持する。本研究では、図 2 に示すように、 F_m までの圧子押し込みを 10mN/s で行い、荷重保持時間 t_m は 9000s とするインデンテーションクリープ試験の数値実験を行った。荷重 F_m は、50、300、500、1000、1500、2000 mN の 6 通りとした。

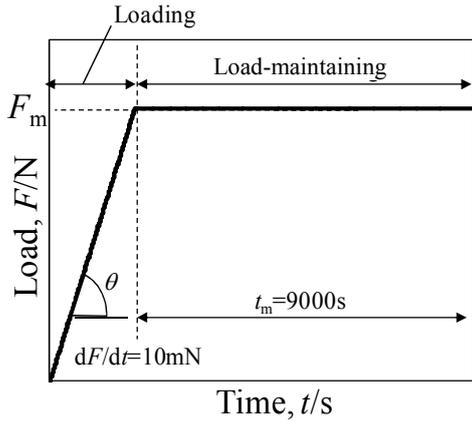


図2 インデンテーションクリープ試験の負荷方法

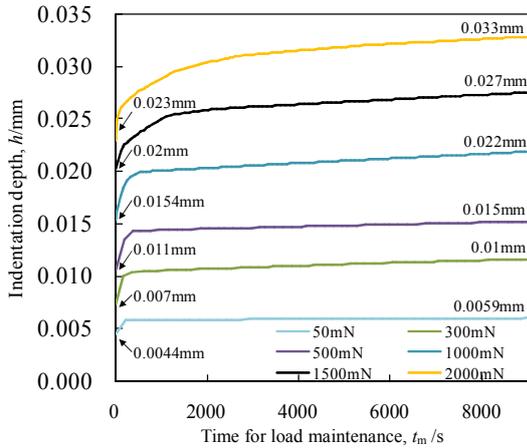


図3 圧子押し込み深さと時間の関係

②結果： 図3は、数値実験結果として得た圧子押し込み深さ h と時間 t の関係を表す $h-t$ 曲線である。いずれの保持荷重においても、時間の経過に伴い、圧子の押し込み深さが増加することがわかる。

インデンテーションクリープ試験によるクリープ特性の評価では、まず、任意の圧子深さ h で求めた $h-t$ 曲線の傾き dh/dt を次式に適用し、クリープひずみ速度を算出する。

$$d\epsilon^c / dt = \frac{dh / dt}{h} \quad (2)$$

次に、クリープひずみ速度を得た圧子深さにおける圧子と試料の接触面積 S_c を求め、保持荷重 F_m を S_c で除すこと応力を算出する。そして、以上のように算出したクリープひずみ速度 $d\epsilon^c / dt$ と応力 σ の関係をベキ乗則で近似して、式(1)のクリープ則を導出する。この方法が、最も一般的なインデンテーション試験によるクリープ特性の評価法である。

以上の評価法を図3の $h-t$ 曲線に適用した結果の例として、保持荷重 $F_m=1000\text{mN}$ についての $d\epsilon^c / dt$ と応力の関係 σ を図4に示す。図4で、○印は $h-t$ 曲線から求めた $d\epsilon^c / dt$ と σ の関係を表し、点線はその関係のベキ乗則による近似結果である。赤の実線は、表1の材

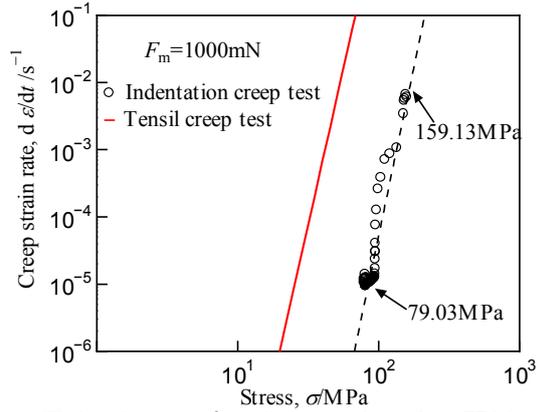


図4 クリープひずみ速度と応力の関係

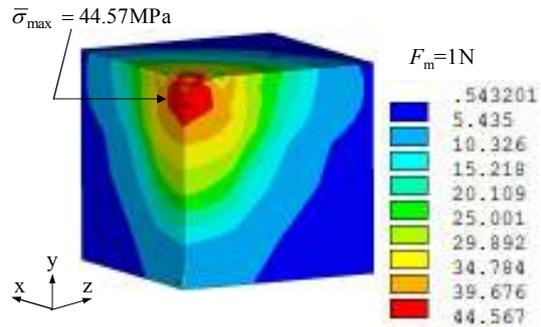


図5 インデンテーションクリープにおける相当応力分布

料定数を用いた Norton 則による $d\epsilon^c / dt$ と σ の関係である。すなわち、バルク材の引張クリープ試験から導出した Norton 則による $d\epsilon^c / dt$ と σ の関係である。図4より、数値実験であるにも関わらず、インデンテーションクリープ試験とバルク材を用いた引張クリープ試験の間で、クリープ則の不一致が生じていることがわかる。数値実験では、はんだ材の微視組織の影響等による寸法効果は存在しない。したがって、クリープ則の不一致の問題は、寸法効果に起因するものではないことになる。

図5は、保持荷重 $F_m=1000\text{mN}$ のインデンテーションクリープで、 1000mN に到達した時点ではんだ内の相当応力分布である。図5で相当応力の最大値は 44.57 MPa であり、圧子の直下で確認される。一方、図4の応力は $79.03\sim 159.13\text{ MPa}$ の範囲にあり、図5の値と大きな差がある。

この差の原因は、保持荷重 F_m を接触面積 S_c で除して応力を算出する方法にあると考えられる。また、図5で応力分布が圧子の直下だけでなく広範囲に及んでいることを考慮すれば、応力の算出基準面積として、圧子と試料の接触面積 S_c を用いることは不相当と考えられる。そして、これがインデンテーションクリープ試験と引張クリープ試験でのクリープ則の不一致の原因と考えられる。

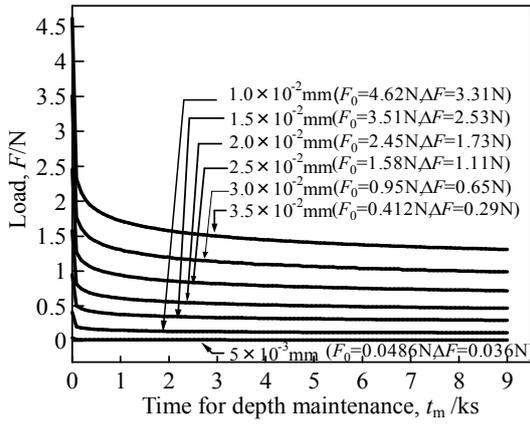


図6 圧子深さ保持による荷重緩和曲線

(2) 応力緩和挙動を用いた応力算出基準面積についての検討

①検討方法： 研究代表者が提案している、引張り・ひずみ保持試験をインデンテーション法に応用し、インデンテーション試験に適した応力の算出基準面積について検討した。引張り・ひずみ保持試験とは、任意のひずみまで引張試験を行った後に一定時間ひずみを保持する試験である。この試験法をインデンテーション法に応用する際には、引張過程を圧子押し込みに、ひずみ保持過程を圧子の深さ保持に置き換える。

引張り・ひずみ保持試験では、ひずみ保持過程で得られる応力緩和曲線から、引張クリープ試験と同等のクリープ則を得ることができる。すなわち、応力緩和曲線上の複数の応力点での接線の傾きからクリープひずみ速度を算出し、算出した各クリープひずみ速度と対応する応力の関係をプロットすれば、クリープ則を導出することができる。

ここでは、圧子の押し込み・深さ保持を模擬したFEAによる数値実験を実施し、圧子の深さ保持過程で生じる応力緩和の挙動からクリープ則を導出した。この導出作業を通じて、インデンテーション試験での応力の算出に適した基準面積について考察した。

②結果： 圧子押し込み・深さ保持のFEAは、目標押し込み深さを0.005~0.035mmの範囲で0.005mmずつ変えた、7種の条件で実施した。各目標深さまでは圧子を 4.0×10^{-4} mm/sで押し込んだ。そして、圧子が所定の深さに到達次第、その深さで圧子の位置を9000s間保持した。この数値実験の結果として、圧子深さ保持過程で得た荷重緩和曲線を図6に示す。

図6を用いて、応力の算出基準面積について検討するために、まず、基準面積を S_r として、圧子の深さ保持過程で生じるクリープひずみ速度と荷重緩和速度 dF/dt の関係を表す次式を導出した。

$$d\epsilon^c / dt = - \frac{dF / dt}{ES_r} \quad (3)$$

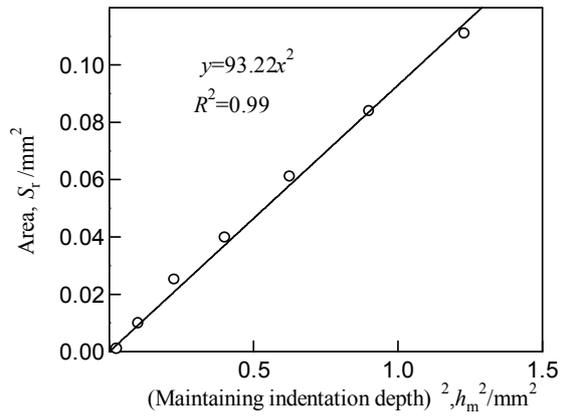


図7 基準面積と押し込み深さの関係

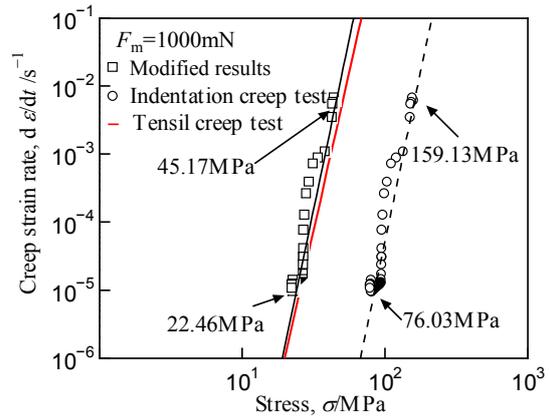


図8 クリープひずみ速度と修正応力の関係

式(3)で E はヤング率である。

式(3)のクリープひずみ速度は式(1)のNorton則で表せることから、次式が成立する。

$$\frac{|dF / dt|}{ES_r} = A \left(\frac{F}{S_r} \right)^n \quad (4)$$

式(4)より、基準面積 S_r は次式で表されることになる。

$$S_r = \left(\frac{|dF / dt|}{AEF^n} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (5)$$

図6の荷重緩和曲線は、数値実験の結果であるため、式(5)中のヤング率 E 、およびNorton則の材料定数 A と n は、表1で示した既知の値である。したがって、式(5)を用いれば、すべての圧子押し込み深さに対応する基準面積 S_r を算出することができる。

式(5)を用いて算出した各押し込み深さに対応する基準面積 S_r と、押し込み深さ h_m の二乗値との関係を図7に示す。図7から、基準面積 S_r は押し込み深さの二乗値 h_m^2 に比例し、次式で表されることがわかる。

$$S_r = 93.22 h_m^2 \quad (6)$$

既述したように、通常インデンテーション試験で応力を算出する際には、圧子と試料の

接触面積 S_c を用いる。ビッカース圧子の場合には、 S_c は圧子の押し込み深さ h^2 の関数として、次式で与えられる。

$$S_c = 26.46h^2 \quad (7)$$

式(6)と式(7)は、いずれも押し込み深さの二乗に比例する形であるが、その比例係数の値は式(6)の方が約3.5倍大きい。このことは、インデンテーション試験で応力を算出する際には、従来よりも大きな基準面積を用いなければならないことを意味する。

図8は、式(6)による基準面積 S_r を用いて、保持荷重 $F_m=1000\text{mN}$ のインデンテーションクリープ試験の応力を修正し、クリープひずみ速度とその修正応力の関係を図4に加えたものである。修正した応力は、元の応力よりも低く、その最大値は図5の最大に近いことがわかる。また、クリープひずみ速度と修正した応力の関係は、引張クリープ試験での関係とほぼ一致している。すなわち、式(6)を用いてインデンテーション応力を算出すれば、インデンテーションクリープ試験と引張クリープ試験におけるクリープ則の不一致の問題は解決できることがわかる。

以上のことから、インデンテーションクリープ試験でクリープ特性を評価する際には、式(6)のように、従来よりも大きな基準面積が得られる押し込み深さの関数を使用して、応力を算出する必要のあることが判明した。

(3) 圧子押し込み・深さ保持・除荷試験の提案

インデンテーション試験でクリープ特性を評価する際には、応力の算出時に従来よりも大きな基準面積を用いる必要のあることは既に述べた。しかし、実際のインデンテーション試験では、ヤング率や Norton 則の材料定数が未知であるため、成果(2)で示した方法で応力の算出基準面積を導出することができない。

そこで、応力の算出基準面積、ヤング率、Norton 則の材料定数を同時に導出するために、圧子押し込み・深さ保持・除荷試験法を提案した。この試験の荷荷方法は、図9に示すように3段階から成る。すなわち、まず、圧子を一定速度で任意の目標深さ h_m まで試料に押し込む。 h_m に到達した後は、一定時間 t_m の間、圧子の深さを h_m で保持する。保持時間 t_m の経過後は、圧子を試料から離して除荷する。このような荷荷方法での試験を、3種類の目標深さ h_m について実施する。

試験を実施した後は、まず、除荷過程での荷重 F と押し込み深さ h の関係曲線 ($F-h$ 曲線) から、ヤング率を導出する。その際には、インデンテーション試験によるヤング率の導出で用いられる、除荷工程初期の $F-h$ 曲線の傾き dF/dh と圧子と試料の合成縦弾性係数 E_r の関係を用いる。ビッカース圧子を用いる場合、その関係は次式で表される。

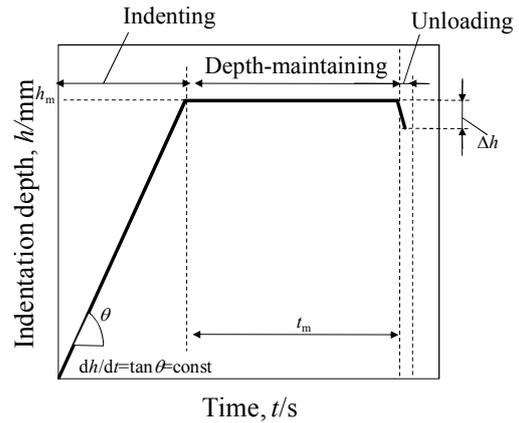


図9 圧子押し込み・深さ保持・除荷試験の荷荷方法

$$E_r = \frac{dF}{dh} \frac{1}{2h_p} \left(\frac{\pi}{26.46} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式(8)で、 h_p は塑性深さであり、除荷開始時の $F-h$ 曲線の接線と h 軸の交点として求めることができる。合成縦弾性係数 E_r は、試料のヤング率 E とポアソン比 ν 、圧子のヤング率 E_0 とポアソン比 ν_0 と次式の関係にある。

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_0^2}{E_0} \quad (9)$$

したがって、除荷時の $F-h$ 曲線から dF/dh と h_p を求めて式(9)に用いれば、試料のヤング率 E を算出することができる。

ヤング率を求めた後は、応力の算出基準面積 S_r と Norton 則の材料定数 A, n を導出する。ここで、基準面積 S_r は押し込み深さ h の二乗に比例するとして、 S_r を比例係数 C を用いた次式で表す。

$$S_r = Ch^2 \quad (10)$$

式(10)を式(4)に適用して、次式を得る。

$$\frac{|dF/dt|}{ECh^2} = A \left(\frac{F}{Ch^2} \right)^n \quad (11)$$

先述したように、圧子押し込み・深さ保持・除荷試験は、3種類の目標深さ h_{m1}, h_{m2}, h_{m3} について実施する。このため、式(11)の h を h_{m1}, h_{m2}, h_{m3} とし、各押し込み深さの保持過程で得られる荷重緩和曲線 ($F-t$ 曲線) 上の任意の荷重点において $|dF/dt|$ を求めれば、3本の式を導出することができる。その3本の式を同時に満たすように、3つの未知数 C, A, n を決定すれば、応力の算出基準面積と Norton 則の材料定数を定めたことになる。なお、 n については、 $F-t$ 曲線から得た $|dF/dt|$ と F の関係をベキ乗則で近似すれば、近似関数の指数値として得ることができる。

以上の方法を用いれば、インデンテーション試験によるクリープ特性の評価を高精度で実施することができると思われる。

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)

[学会発表] (計2件)

- ① Atsuko Takita, Katsuhiko Sasaki, and Ken-ichi Ohguchi, A New Reference Area for Indentation Creep Tests to Obtain Real Steady Creep Strain of Solder Alloy, International Conference on Electronics Packaging 2013, 2013.4.12, Osaka International Convention Center
- ② 瀧田敦子、大口健一、佐々木克彦、圧子押し込み・深さ保持によるはんだのクリープ特性評価法の提案、日本機械学会 2012 年度年次大会、2012.9.10、金沢大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大口 健一 (OHGUCHI KEN-ICHI)

秋田大学・工学資源学研究科・准教授

研究者番号：30292361