

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：10103

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06005

研究課題名(和文) 繰返し圧子押し込み深さ保持による実装はんだ接続部のための遷移クリープ特性評価法

研究課題名(英文) Evaluation of the Creep Deformation by the Stepped Load Indentation Test with Constant Depth for Solder Joints

研究代表者

瀧田 敦子 (TAKITA, Atsuko)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：90756959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子実装基板の強度信頼性を確保するため、FEM解析には微小はんだ接続部の変形を表すクリープ構成則が必要である。微小領域の遷移・定常クリープ特性を評価するため、圧子押し込みによって生じるひずみ成分を個別に扱わなければならない。それには、圧子押し込み時の応力-ひずみ曲線から弾・塑性特性を評価し、全体の変形から弾・塑性変形を排除する必要がある。本研究では、階段負荷の圧子押し込み深さ保持試験を数値実験で実施し、インデンテーション試験に適した基準面積を決定するとともに、圧子押し込み工程における任意の点の応力推移を取得する方法を提案する。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the reliability of the electrical device, the constitutive law expressed the deformation of the solder joint is required for the FEM. The strain component occurred by the indentation process should be separately treated to evaluate the transient-steady creep deformation in the microscopic region. The elastic-plastic deformation should be removed from the deformation occurred in the indentation process. Therefore, it is need to derive the stress-strain curve when the indenter is pushed into the specimen. In this study, the indentation tests with constant depth are conducted by the indentation test. And the reference area is identified the suitable reference area for calculation of the stress variation. When that reference area is used for calculation of stress, the stress variation coincided with nodal solution will be obtained.

研究分野：材料力学

キーワード：インデンテーション試験 遷移クリープ 応力 ひずみ曲線 有限要素解析 定常クリープ 鉛フリーはんだ

1. 研究開始当初の背景

電子機器の強度信頼性評価を行うためには、実装状態にあるはんだ接続部の変形特性、特に時間依存性変形であるクリープ特性を取得することが重要となる。はんだ接続部のクリープ特性を取得するための試験方法の一つに、インデンテーションクリープ試験がある。圧子に一定荷重を長時間負荷して、試料に圧子を押し込む。この時、得られる押し込み深さと時間の関係から定常クリープ特性が評価される。しかし、この評価手法では単軸試験に一致する結果が得られず、理論的な検証が行われなまま経験則や最適化解析に基づき補正係数を決定するといった手法が用いられている。

研究代表者は、これまでに有限要素解析による検証からインデンテーション法の応力評価に問題があることを指摘し、インデンテーション法における応力の定義している。また、圧子押し込み深さ保持試験なる一定深さ保持のインデンテーション試験を提案し、圧子押し込み時に生じる主応力面に着目してインデンテーション法に適した基準面積の決定手法を提案した。これにより、微小領域における定常クリープ特性を測定することが可能となり、実装状態における微小はんだ接続部への適用できることを示した。

しかし、電子実装に用いられる様々な種類のはんだへの適用性、結晶粒の大きさおよび結晶方位分布の影響、インデンテーション法による遷移クリープ測定手法の確立など、インデンテーション法には未だ多くの課題があるのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、インデンテーション試験だけを用いて応力-ひずみ関係を取得する方法を提案する。階段波負荷を用いた繰返圧子押し込み深さ保持試験を弾・塑性解析を実施した。圧子押し込みによる応力・ひずみが試料内部で球状に分布することを利用して、圧子押し込み工程における応力、ひずみそれぞれの変化を明らかにする。また、数値実験の結果との比較から、試料内部の応力変化の測定手法を考案した。

3. 研究の方法

(1)FEM モデル

階段波負荷による圧子押し込み深さ保持試験の数値実験は、ANSYS16 を用いて実施した。図 1 に FEM モデルを示す。Vickers 圧子はダイヤモンドから成り、ヤング率 1141GPa、ポアソン比 0.07 の弾性体とみなした。一方で、はんだ試料モデルは、ヤング率 21GPa、ポアソン比 0.35、降伏応力 36MPa、接線係数 161MPa の弾塑性の均質材料とみなした。解析

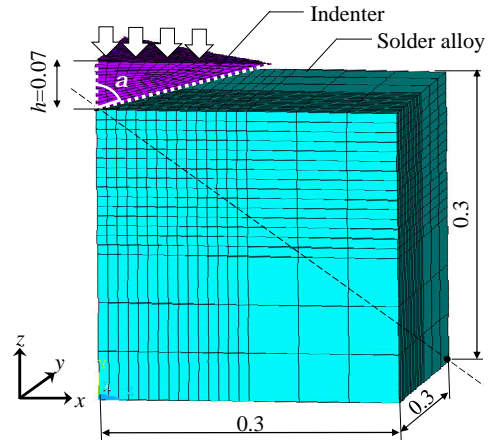


Fig.1 FE model of the indentation analysis.

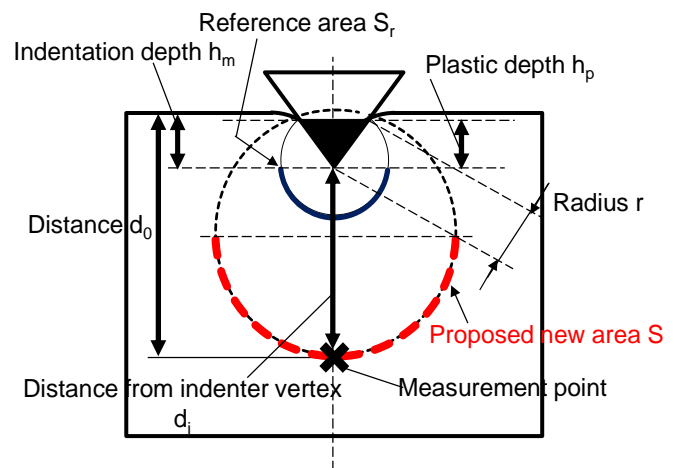


Fig.2 Schematic summary of the reference area

に用いた機械的性質は、Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだの引張試験で取得した。本研究では、圧子先端と試料が接触した状態からのシミュレーションを実施した。圧子と試料の境界面には、接触要素を用い、圧子上面を y 軸方向に移動させることにより圧子を試料に押し込む。インデンテーション試験で取得できるデータは、荷重、押し込み深さ、時間の関係である。荷重は、圧子押し込みにより試料底面に生じる反力総和とし、押し込み深さは圧子先端の移動距離とした。

(2)圧子押し込みにおける応力評価基準

本研究では、インデンテーション試験のみから圧子押し込み時の応力、ひずみの変化の取得方法を考案することを試みた。定常クリープ変形の評価方法と同様に、一方向負荷を受けたときの応力、ひずみ変化を圧子押し込み試験から推測する。

著者らはすでに荷重・押し込み深さ・時間の関係から応力評価に適した基準面を定義する方法を提案している。著者らが提案する基準面積は、図 2 の S_r で示されるように、圧子頂点

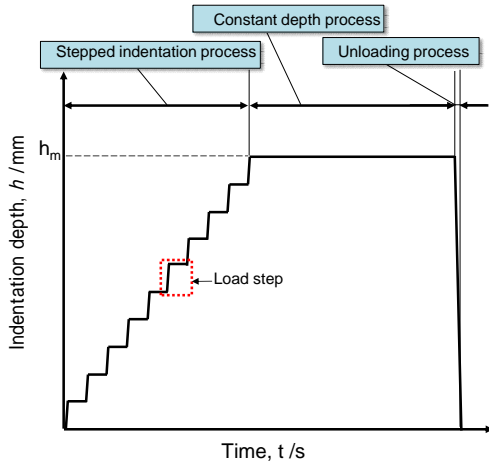


Fig.3 Schematic outline of the loading for the stepped load indentation test.

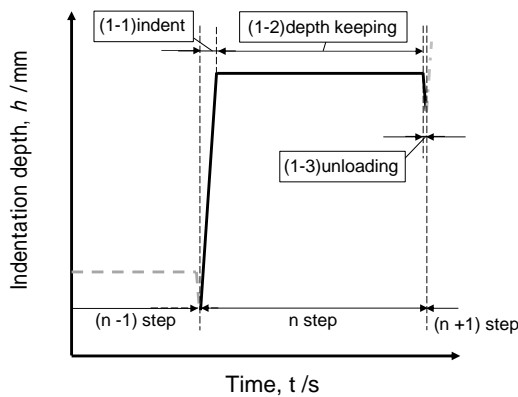


Fig.4. Composition of stepped Load process.

を中心とした半球の表面積であり，次式で表される．

$$S_r = 2\pi \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^2 h_p^2 \quad (1)$$

ここで， α は2分の1圧子先端角度であり， h_p は塑性深さである．

塑性深さ h_p は任意の押し込み深さ h_m において圧子押し込み時に圧子と試料が接触している部分の押し込み深さを意味し，除荷工程で得られる荷重と押し込み深さの関係（すなわち，除荷曲線）の傾き dF/dh を用いて次式で計算できる．

$$h_p = h_m - \frac{1}{dF/dh} F_{us} \quad (2)$$

ここで， F_{us} は除荷開始時の荷重である．

しかし，式(1)で表す基準面積 S_r は押し込み深さ h_m に対応する基準面積であり，深さが変化すると基準面積は随時変化する．よって，圧子押し込み工程における応力変化を得るためには，押し込み工程の複数の応力値で圧子を取除き，除荷曲線を取得しなければならない．そこで，本研究では，階段波負荷を用いた圧子

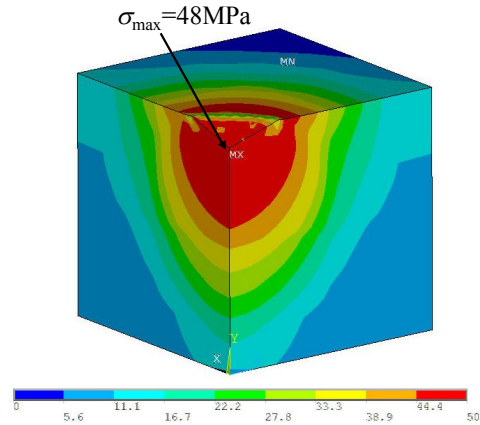


Fig.5 Distribution of the equivalent stress when the indentation depth is 2.0×10^{-2} mm.

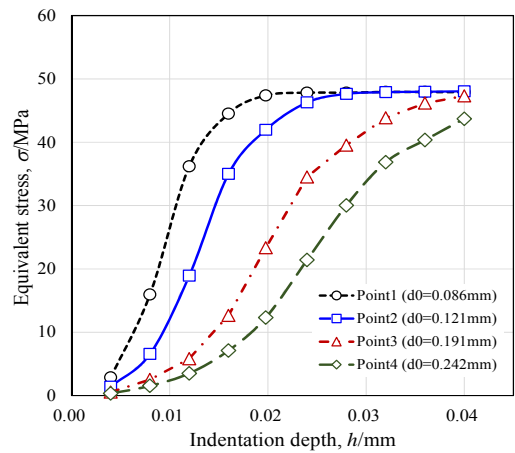


Fig.6 Relationship between the stress and the indentation depth.

押し込み深さ保持試験という新しいインデントーション試験を提案する．

(3) 繰返し圧子押し込み試験の提案

図3に繰返し圧子押し込み試験の概略図を示す．この試験は次の3つの工程から成る．；階段波負荷で圧子を試料に押し込む第1工程，押し込み深さを保持する第2工程，圧子を試料から取り除く第3工程．階段波負荷による押し込み工程では，図4に示すように3つの工程を複数回繰返し，目標の押し込み深さまで圧子を押し込む．

本研究では，押し込み工程を10回のステップに分けて提案試験のFEM解析を実施した．押し込み速度 1.0×10^{-2} mm/s で1ステップあたり 4.0×10^{-3} mm 押し込み，10秒間深さを保持したのちに 1.0×10^{-2} mm/s で 4.0×10^{-4} mm 圧子を試料から取り除いた．圧子と試料を接触させた後で次のステップに移る．目標深さ 4.0×10^{-2} mm に到達後は，押し込み深さを9000s保持し，除荷を行った．

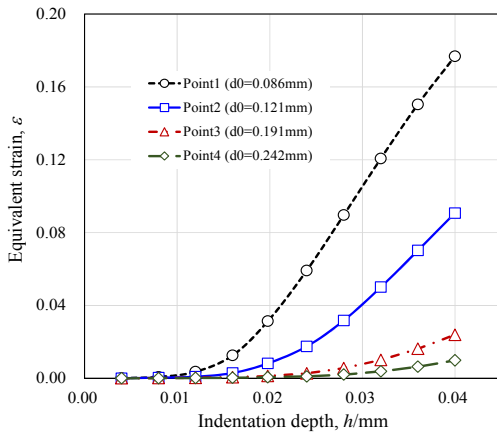


Fig.7. Relationship between the strain and the indentation depth.

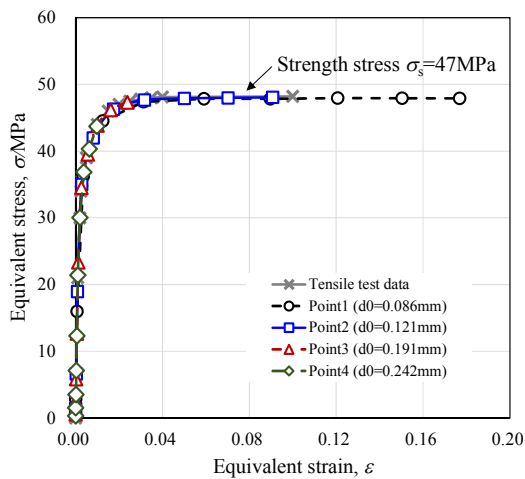


Fig.8 Stress - strain curve obtained from the nodal stress of each node

4. 研究成果

(1)測定位置の特定

図5の相当応力分布図に示すように、圧子を試料に押し込んだとき、試料に生じる応力は一様ではない。この章では、単軸試験で取得されるSS曲線を取得するために応力・ひずみを測定すべき場所を数値実験で検証する。

図6に、圧子が試料に40mm押し込まれる過程で生じる応力と押し込み深さの関係を示す。図6は、それぞれ試料内部の異なる位置における応力変化を表す。相当応力は、各ステップの押し込み終了時の節点解である。凡例のd0は、初期状態の圧子と任意の節点の距離を意味し、圧子押し込み位置からの距離が大きくなるほど、押し込み深さに対する応力増加率が小さいことが分かる。

図7は、圧子が試料に40mm押し込まれる過程で生じる応力と押し込み深さの関係を示す。圧子押し込み位置からの距離が大きくなるほど、ひずみの増加率が小さくなることが分かる。以上より、測定点と押し込み位置の距離によって、応力変化、ひずみ変化に相違がみられることが明らかになった。

図8は図6と図7の節点解から取得できる応力とひずみの関係である。全ての節点で得られた節点解の応力ひずみ曲線は、×で示される単軸試験の応力-ひずみ曲線に一致する。ゆえに、引張試験の結果に一致する応力-ひずみ関係を取得するためには、同一の地点で単軸半径方向の応力、ひずみを取得しなければならない。

(2)応力変化の推定方法

ここで押し込み深さ 2.0×10^{-2} mmの相当応力分布を表す図5を見てみると、圧子頂点を中心に同心球状に応力が分布していることが分かり、主応力もまた同じように分布する。圧痕直下は応力が高く、図中に赤のエリアで示すように相当応力は引張強さに到達する。この領域は押し込み深さが増加するにつれ拡大する。式(1)に示される基準面積上の応力は、押し込み荷重 F を基準面積 S_r で除すことで計算される。

$$\sigma_r = \frac{F}{S_r} \quad (3)$$

押し込み深さ 2.0×10^{-2} mmの時、基準面積上の応力は48MPaであり、図8に示す引張試験で得られたSS曲線の引張強さによく一致する。圧子押し込みによる応力推移を取得するには、応力が引張強さに到達した領域よりも外側を計測点にしなければならない。任意の点における応力 σ_a を算出するため、図2に赤線で示す基準面 S_a を提案する。

主応力も相当応力と同様に圧痕周囲に球状に分布することが知られている。よって、任意の点もまた特定の応力等高面に含まれる。そこで、本研究では任意の点、圧子試料の境界含む球面を仮定し、下側の半球表面を用いて応力を計算することを提案する。任意の点における応力を計算するための基準面積 S_a は、次の式を用いて計算される。

$$S_a = 2\pi \left(\frac{d_0 - h_m - r}{2} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 d_0 、 r はそれぞれ、初期における任意の点と押し込み位置の距離、接触部における稜線長さを表す。

$$r = \frac{1}{\cos \alpha} h_p \quad (5)$$

式(3)の S_r に式(4)の基準面 S_a を置き換えて、任意の点における応力 σ_a が計算される。ただし、試料の応力は引張強さ以上にはならないため、基準面積 S_a を用いて計算される応力が式(3)で計算される応力より大きいとき、任意の点における応力 σ_a として引張強さを採用することとした。

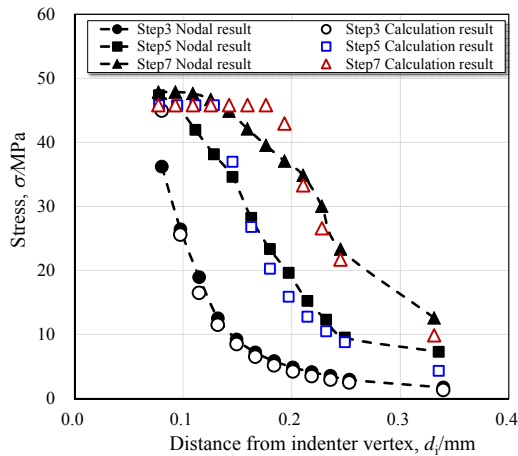


Fig.9 Comparison of the relationship between the stress and the distance from the indenter vertex.

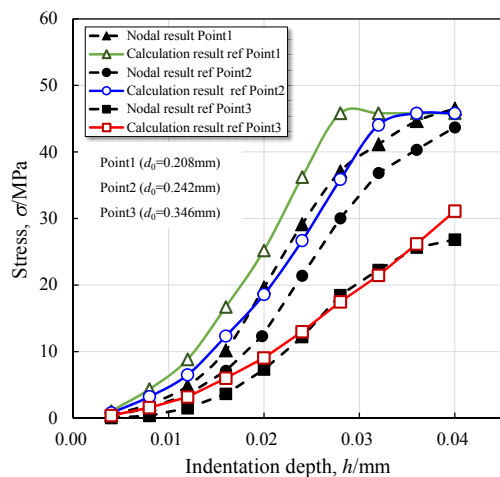


Fig.10 Relationship between the stress and the indentation depth.

(3) 応力推移の導出

提案の基準面積を用いて、3種類の押し込み深さにおける圧痕周り10か所の応力を推定した。図9は、押し込み工程3ステップ目、5ステップ目、7ステップ目における応力と測点-圧子頂点間の距離の関係を表している。図5の相当応力分布に示された応力状態と同様に、圧子から離れるほど応力が小さくなるのが分かる。また、この図で破線は解析結果から取得した関係を示し、白塗りのマーカーは提案の基準面積 S_a を用いて推定された応力を表す。提案の基準面積 S_a を用いて推定した応力分布は、節点解のそれとよく一致する。よって、提案の基準面積 S_a を用いて応力を計算すると、圧痕周辺の応力分布を推定できる。

また、圧子が試料に押し込まれる間の任意の点における応力変化の取得も試みた。図10は、押し込み深さの増加に対する応力変化を表す。

のマーカーは、試料表面から0.208mm離れた位置における応力の変化を表す。の順番で応力測定点が試料表面から離れている。図6と同様、測定点が押し込み位置から遠いほど応力増加率が減少する挙動を確認すること

ができた。図10破線は節点解より取得した各点の推移を表す。基準面積 S_a , S_r を用いて計算した応力変化は、破線で示される結果におおよそ一致した。よって、以上の方法で任意の点における応力の変化を取得することが可能である。

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 5件)

- [1] 瀧田敦子, 佐々木克彦, 大口健一, 藤木裕行, 深さ保持インデンテーションによるクリープ特性評価(不均質材料への適用), 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応大学/神奈川, 2015年11月22日
- [2] 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, 北海道大学/札幌, 2015年9月14日
- [3] A.TAKITA, K.SASAKI, K.OHGUICH, H.FUJIKI, Effective Area of Indentation Creep Test Considering Vertex Angle of Indenter, The 10th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength(APCFS2016), 富山国際会議場, 2016年9月22日
- [4] Atsuko TAKITA, Katsuhiko SASAKI, Ken-ichi OHGUCHI, Hiroyuki FUJIKI, Evaluation of Creep Deformation by Indentation Test with a Constant Depth - Applicability for Inhomogeneous Materials, The 4th International Conference SSTT 2016, 華東理工大学・上海, 2016年10月14日
- [5] Atsuko TAKITA, Katsuhiko SASAKI, Ken-ichi OHGUCHI and Hiroyuki FUJIKI, Evaluation of the Creep Deformation by the Stepped Load Indentation Test with Constant Depth, 13th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA2016), 東広島芸術文化ホールくらら, 広島, 2016年12月5日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧田 敦子 (TAKITA, Atsuko)
 室蘭工業大学・工学研究科・助教
 研究者番号: 90756959