

電子部品はんだ接合部の熱疲労寿命解析

山田春彦, 小川一義

Evaluation for Thermal Fatigue Life of Solder Joints in Electronic Components

Haruhiko Yamada, Kazuyoshi Ogawa

要 旨

自動車用の電子部品は過酷な温度環境で利用されるため、はんだ接合部の熱疲労に対する信頼性が重要になる。本研究では、はんだ接合部の熱ひずみ解析法および熱疲労寿命予測法の確立に向けて、実験的および解析的検討を行った。

最初に、よく使われる2種類のはんだ、63Sn-37Pbと95Pb-5Snについて、引張試験とクリープ試験により力学特性を調べ、その特性から弾性とクリープによる力学モデルを構築した。次に、そのモデルを使って、SiチップとCu板をはんだで接合した構造体の温度サイクル下での非弾性有限要素

解析を行い、解析結果の妥当性をSiチップ表面に形成した拡散型半導体ゲージを用いた実験により確認した。さらに、63Sn-37Pbはんだの疲労試験を行い、はんだの疲労寿命が温度、繰り返し速度、ひずみ保持の影響をほとんど受けず、非弾性ひずみ範囲で決まることを明らかにした。最後に、チップ抵抗部品はんだ接合部の熱ひずみ解析を行い、解析から得られる非弾性ひずみ範囲とはんだの疲労特性から寿命予測を試みた。予測結果と実験結果は、き裂の発生位置およびチップ下にき裂が入る寿命についてよい一致を示した。

Abstract

Since automotive electronic components are used under severe temperature conditions, the reliability of thermal fatigue resistance of solder joints is important. In this study, a series of experimental and analytical investigations were performed to develop a method of evaluating the thermal fatigue life of solder joints.

First, tensile and creep tests were carried out on two kinds of commonly used solders, 63Sn-37Pb and 95Pb-5Sn, to determine their mechanical properties. Using the measured properties, constitutive equations for the solders based on elasticity and creep were formulated. Next, a nonlinear finite element analysis was performed on structures with Si chips and Cu plates joined together with solders under thermal cycling. The validity of the analysis was verified by

an experiment using a diffused type strain gauge formed on a Si chip surface. Third, the fatigue test of bulk 63Sn-37Pb solder was carried out to obtain data for fatigue life prediction. It was found that the temperature, the frequency and the strain hold had little effect on the fatigue life of solder and that the fatigue life was controlled by inelastic strain range. Finally, the thermal strain at the solder joint of a chip resistor was analyzed and the thermal fatigue life was predicted from the calculated inelastic strain range and the fatigue data of solder. Good agreement was obtained between the prediction and the thermal cycling test results in respect of the location for crack initiation and the fatigue life at the bottom of the chip.

キーワード

電子部品, はんだ接合部, 熱疲労, 力学特性, 非弾性有限要素解析, 半導体ゲージ, 疲労特性, 寿命予測

1. まえがき

近年、自動車にも多くの電子機器が用いられるようになってきた。電子機器には、抵抗やコンデンサなどの電子部品をプリント回路基板に接続するのに、はんだが多く使われている。電子部品と回路基板は多くの場合熱膨張係数が異なるため、機器に温度変化が負荷されると部材間に熱膨張差が生じる。この熱膨張差による変位（ひずみ）が構造強度上最も弱いはんだに繰り返しかかると、設計によっては、はんだ接合部にき裂が発生し電氣的不良に至ることがある。自動車用の電子機器は家電機器に比べて使用温度環境が過酷なため、はんだ接合部の熱疲労に対する信頼性はより一層重要になる。

はんだ接合部の熱疲労に対する信頼性は、現状、温度サイクル試験によって評価されている¹⁾。この試験は実際の機器に温度変化を繰り返し与えるという点で有効な方法であるが、試験に時間がかかる（1000サイクル程度の評価に1～2ヶ月を要する）ため、製品開発の初期の段階から試作と試験を繰り返すと開発期間が非常に長くなってしまふ。また、この試験では、はんだにき裂が発生するか否かの判定はできるが、き裂が発生した場合にその原因を究明するための情報は得られない。そこで、はんだ接合部の熱ひずみを解析的に評価し、その熱疲労寿命を設計の段階で予測する手法が求められている。

本研究では、はんだ接合部の熱ひずみ解析法および熱疲労寿命予測法の確立に向けて以下の検討を行った。

(1) 複雑形状部品の応力・ひずみの評価には有限要素法（FEM）による解析が有効であるが、接合部のFEM解析に必要なはんだの力学特性についてはデータが少ない^{2, 3)}。そこで、自動車用電子部品の接合によく用いられる2種類のSn-Pb系はんだについて、引張試験とクリープ試験により力学特性を調べ⁴⁾、その特性からはんだの力学モデルを構築する。

(2) はんだ接合部のFEMによる熱ひずみ解析法としていくつかの方法⁵⁻¹⁰⁾が提案されているが、その解析法の妥当性を実際の接合体で検証した例

はほとんどない。そこで、はんだ接合体を作製し、これを対象に温度サイクル試験とFEM解析を行い、解析の妥当性を実験的に検証する⁴⁾。

(3) 疲労寿命の予測には、FEM解析による熱ひずみの評価とともに、はんだの疲労データが必要になる。はんだの疲労特性に関しては多くの研究¹¹⁻¹⁵⁾が行われているが、寿命予測に使えるデータとしては十分でない。そこで、電子機器の実使用状態において重要と考えられる因子（温度、繰り返し速度、ひずみ保持）を変化させた疲労試験を行い、はんだの疲労特性を明らかにする¹⁶⁾。

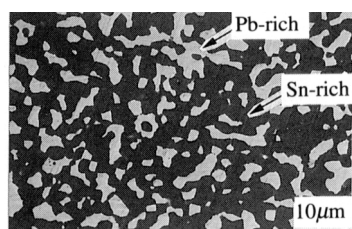
(4) 最後に、実部品のはんだ接合部を対象に熱ひずみ解析と寿命予測を行い、き裂の発生状況および寿命について温度サイクル試験結果と比較する。

2. はんだの力学特性

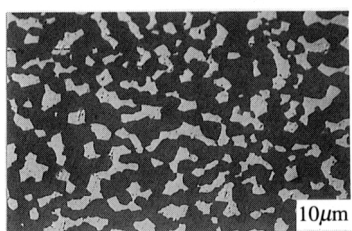
2. 1 実験方法

供試材は63Sn-37Pbと95Pb-5Snである。これらの組成の棒はんだを大気中で溶融した後、金型に鋳込んで角棒試料を作り、そこから機械加工により板状試験片を作製した。試験片平行部の寸法は、長さ16mm、幅4mm、厚さ2mmである。試験片は加工による残留応力の除去と組織の安定化を図るため、室温で1ヶ月以上放置した後試験に供した。このような試験片は実部品の接合部に比べて寸法が大きいため、冷却速度等の違いにより組織が異なることが懸念される。Fig. 1には本研究で作製した試験片と実部品接合部のはんだ組織を63Sn-37Pbの場合について比較して示す。両者ともPb-rich相（白い部分）とSn-rich相（灰色の部分）が細かく分布した様相を呈しており、組織上大きな違いはないことがわかる。

引張試験とクリープ試験は恒温槽付きのモーター駆動式試験機（荷重容量：±500N）を用いて行った。試験温度は、エンジンルーム搭載用電子機器の信頼性試験に使われる温度範囲233～398K¹⁷⁾の中で4段階に変化させた。温度のほか、引張試験ではひずみ速度を 1×10^{-4} 、 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の2段階に変化させ、クリープ試験では負荷応力を数段階に変化させた。両試験とも試験片の伸びは試験片平行部に装着した伸び計により測定した。



(a) Solder specimen



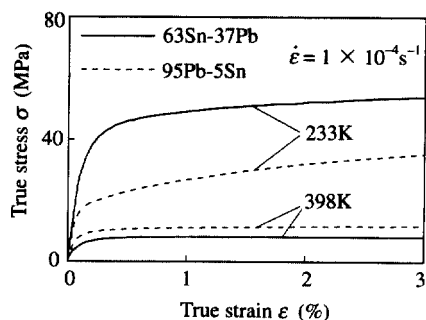
(b) Solder joint of actual component

Fig. 1 Scanning electron micrographs of 63Sn-37Pb solder.

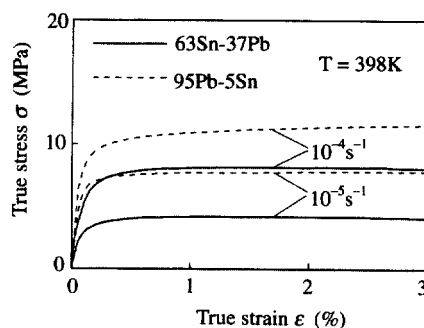
2.2 実験結果

Fig. 2には引張試験で得られた応力 - ひずみ曲線の一例を示す。(a)は温度の影響、(b)はひずみ速度の影響を表している。いずれのはんだも低い応力で弾性域からはずれる挙動を示し、その応力 - ひずみ特性には温度およびひずみ速度依存性が顕著に認められる。そして、温度の上昇あるいはひずみ速度の低下に伴って流動応力は低下する。ただし、温度依存性の大きさは材料によって異なり、63Sn-37Pbは95Pb-5Snに比べて温度依存性が高い。これは、63Sn-37Pbは95Pb-5Snに比べて融点が高いため、温度変化に対して敏感になるためと考えられる。

Fig. 3にはクリープ試験の結果を定常クリープ速度と応力の関係で整理し、233Kと398Kの温度について示す。クリープ速度は応力の増加あるいは温度の上昇に伴って加速される。また、引張特性の場合と同様に、63Sn-37Pbは95Pb-5Snに比べてクリープ速度の温度依存性が高い。他の温度における結果も含めて、クリープ速度と応力の関係は両対数グラフ上で直線になり、両者の間には以下の式で表されるべき乗クリープ則が成り立つ。



(a) Effect of temperature on stress-strain curves



(b) Effect of strain rate on stress-strain curves

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of 63Sn-37Pb and 95Pb-5Sn solders.

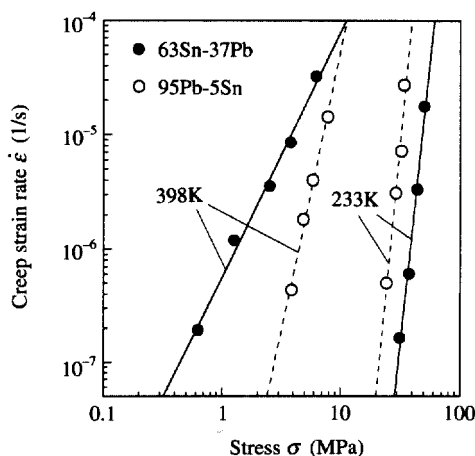


Fig. 3 Relationship between creep strain rate and stress of 63Sn-37Pb and 95Pb-5Sn solders.

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n \quad (1)$$

$\dot{\varepsilon}$: クリープ速度

σ : 応力

A: クリープ定数

n: クリープ指数

2.3 はんだの力学モデル

上記のように、はんだは引張試験やクリープ試験において顕著な非弾性挙動を示し、それが温度やひずみ速度に大きく依存する性質を有している。したがって、接合部の熱ひずみ解析では、これらの特徴を考慮したはんだの力学モデルが必要になる。この力学モデルとして、本研究では弾性クリープモデル^{6, 8)}を用いた。このモデルでは、はんだに生じるひずみは以下の式で与えられる。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_c \quad (2)$$

ε_t : 全ひずみ

ε_e : 弾性ひずみ

ε_c : クリープひずみ

このモデルの場合、非弾性ひずみはクリープひずみだけとなり塑性ひずみは含まれない。電子部品の実使用環境あるいは信頼性試験で問題となるような低ひずみ速度域 (10^{-4} s^{-1} 以下) では、非弾性変形のほとんどはクリープ変形で占められ塑性変形の影響は小さいと考えられる⁶⁾。したがって、塑性を考慮しなくてもはんだの非弾性挙動を表すことができ、実際にこのモデルを使ってFig. 2に示した応力-ひずみ曲線の非弾性挙動をほぼ表現できることを確認している。なお、クリープ変形におけるひずみ速度は式(1)のべき乗クリープ則を用いて表した。この材料モデルを構築するのに必要なパラメータ (ヤング率E, クリープ定数A, クリープ指数n) を前節の実験結果から求め、Table 1にまとめて示す。

3. はんだ接合体のFEM解析と実験検証

3.1 解析および実験方法

本研究で作製したはんだ接合体の構造をFig. 4に示す。(a)は全体構造、(b)は拡散型半導体ゲージの構造を示している。この接合体はSiチップとCu板をはんだ付けした構造から成り、はんだには63Sn-37Pbと95Pb-5Snの2種類を用いた。Siチップの表面中心部には拡散型半導体ゲージ¹⁸⁾が形成されており、このゲージで測定した応力値と同部位の計算値を比較することにより、解析の妥当性を検証した。ここで用いた拡散型半導体ゲージでは、Siのピエゾ抵抗効果を利用して微小部の応力測定ができるようになっている。

この接合体では構成材料間の熱膨張差により、はんだ付けの過程ですでにSiチップには応力が発

Table 1 Elastic and creep parameters of 63Sn-37Pb and 95Pb-5Sn solders.

T (K)	63Sn-37Pb			95Pb-5Sn		
	E (GPa)	A (MPa/s)	n	E (GPa)	A (MPa/s)	n
233	31.1	1.42×10^{-22}	10.0	20.8	2.23×10^{-22}	11.1
298	19.6	8.22×10^{-14}	6.1	15.9	6.19×10^{-16}	8.3
353	11.3	7.64×10^{-10}	4.3	12.9	1.08×10^{-11}	5.9
398	9.0	5.65×10^{-7}	2.1	11.0	6.35×10^{-10}	4.9

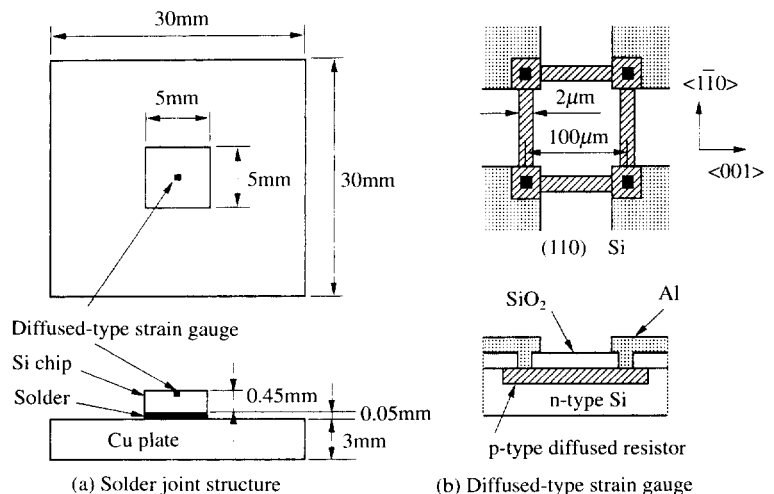


Fig. 4 Schematic diagrams of solder joint structure and diffused-type strain gauge.

生ずる。この応力を緩和するため、接合後室温で約1ヶ月放置した後温度サイクル試験にかけた。温度サイクル試験はエンジンルーム搭載用電子機器の信頼性試験に用いられる温度範囲233～398K¹⁷⁾と同じにし、周期1サイクル1時間の条件で3サイクルまで行った。Fig. 5には接合体のCu板表面で測定した温度プロファイルを実線で示す。なお、図中の点線は実験データを直線で近似し、解析に用いた温度プロファイルを示している。試験には気槽式の冷熱サイクル試験機を用いた。

Fig. 6には解析に用いたFEMモデルの一部を示す。接合体の形状対称性を考慮して、2次元の1/2分割（中心から半分だけを要素分割した）モデルとした。用いた要素は平面ひずみ要素である。境界条件は対称面のX方向変位を拘束するように与えた。Table 2には解析に用いた材料物性値を示す。

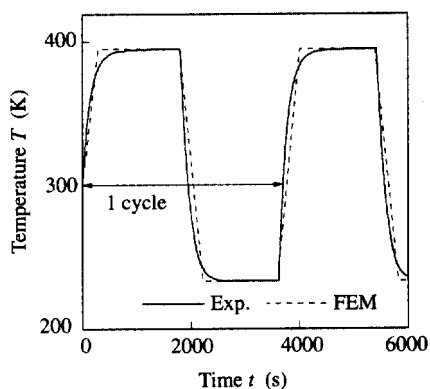


Fig. 5 Temperature profile of thermal cycling test.

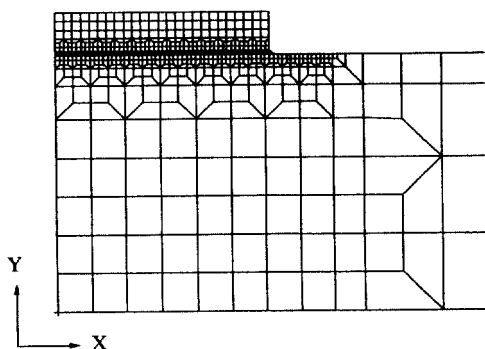


Fig. 6 Finite element model of solder joint structure.

はんだ以外の材料は線形弾性材料とし、はんだは非弾性材料として2.3節の力学モデルを用いた。

解析の温度条件はFig. 5の点線で示したプロファイルで与えた。温度変化はモデル全体に一樣に与え、解析は3サイクル目まで行った。解析には汎用非線形有限要素解析コードMARCを用いた。

3. 2 解析結果と実験結果の比較

温度サイクル下でSiチップに発生する応力について解析結果と実験結果を比較した。Fig. 7は63Sn-37Pbの場合、Fig. 8は95Pb-5Snの場合の比較である。いずれのはんだの場合もチップに発生する応力は高温側で引張り、低温側で圧縮となるループを描き、そのループは温度サイクルの2サイクル目で定常状態に達する。そこで、これらの図には2サイクル目までの結果が示してある。解析結果は実験結果に比べて応力が若干高めとなる

Table 2 Material properties of solder joint structure.

Material	E (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/K$)
Si	165	0.34	3.0
Cu	123	0.34	17.0
63Sn-37Pb	Table 1	0.35	26.6
95Pb-5Sn			29.2

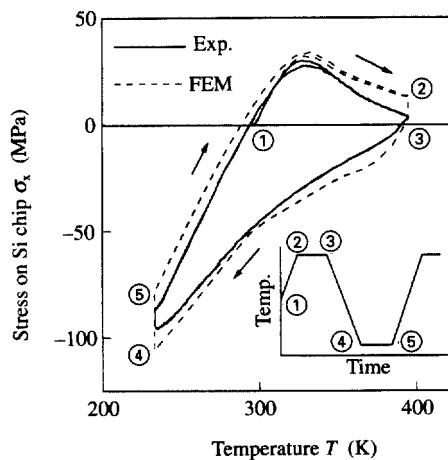


Fig. 7 Comparison between finite element analysis results and experimental data of stress on silicon chip for 63Sn-37Pb solder.

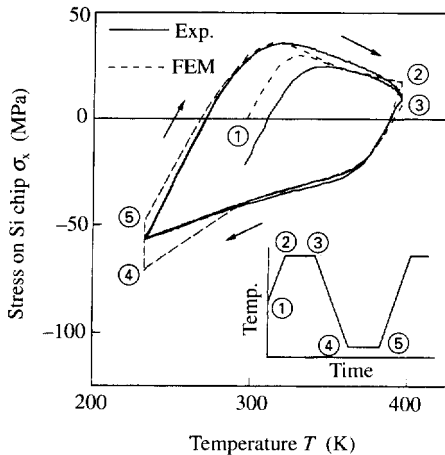


Fig. 8 Comparison between finite element analysis results and experimental data of stress on silicon chip for 95Pb-5Sn solder.

が、全体的なループの形状はよく一致しており、ここで行った解析の妥当性が確認できる。

ループの形状は用いるはんだによって異なり、95Pb-5Snでは63Sn-37Pbに比べて低温側で発生する圧縮応力が小さくなる。この理由は、Fig. 2で示したように低温域では95Pb-5Snの方が変形抵抗が小さく、SiチップとCu板の熱膨張差をはんだの変形で吸収しやすくなるためと考えられる。なお、Fig. 8では実験開始時点()で実験と解析に応力の差が見られるが、これは実験でははんだ付けの過程で発生した応力が残留しているのに対し、解析ではこの初期応力が考慮されていないためである。しかし、この差は温度上昇の過程でほとんどなくなることがわかる。一方、Fig. 7では初期応力に差が見られないが、これは63Sn-37Pbの場合は、はんだ付けの過程で発生した応力がその後の室温放置でほぼ完全に緩和されたためである。

4. はんだの疲労特性

4. 1 実験方法

疲労試験に用いた材料は63Sn-37Pbである。2.1節と同じ方法で角棒試料を作り、そこから機械加工により中空円筒試験片を作製した。試験片平行部の寸法は外形6mm、内径3mm、長さ16mmである。試験片は加工の影響除去と組織安定化のため

室温で1ヶ月以上放置した後試験に供した。この試験片の組織はFig. 1(a)の引張およびクリープ試験片と同じである。

試験には恒温槽付きのモーター駆動式試験機(トルク容量: $\pm 5\text{Nm}$)を用いた。試験は軸荷重を0に制御しながら、一定のねじり角を完全両振りで負荷する方式で行った。温度の影響は繰り返し速度を0.5Hzと一定にして、雰囲気温度を233, 298, 393Kの3段階に変化させて調べた。また、繰り返し速度の影響は温度を393Kと一定にして、試験周波数を0.5, 0.05, 0.005Hzの3段階に変えて調べた。これらの試験はいずれもひずみ保持のない条件(三角波)で行った。一方、ひずみ保持の影響は温度を393Kと一定にして、ひずみ変化時間 t_c とひずみ保持時間 t_h を数種類変化させて調べた。試験片に作用するせん断ひずみは、ひずみゲージを貼付した試験片により求めたひずみとねじり角の関係を使って、試験中のねじり角から算出した。試験片の疲労寿命は、せん断応力振幅が繰り返し初期の値から30%低下したときのサイクル数で定義した。

4. 2 実験結果

Fig. 9には温度、繰り返し速度を変化させたときの疲労試験結果を示す。縦軸には、弾性域を超える大変形が繰り返し負荷される場合の疲労寿命整理によく用いられる非弾性ひずみ範囲を採っている。この非弾性ひずみ範囲は、試験初期に測定した応力-ひずみのヒステリシスループの幅から求めた。試験を行った範囲では、63Sn-37Pbの疲労寿命は温度、繰り返し速度の影響をほとんど受けて、非弾性ひずみ範囲で決まることがわかる。

Fig. 10は温度393K、繰り返し速度0.005Hzで疲労試験した後の試験片を切断し、組織とき裂進展経路を観察した結果である。Fig. 1(a)の初期組織と比較すると、試験後はPb-rich相(白い部分)とSn-rich相(灰色部分)が粗大化していることがわかる。また、き裂は両相の界面に沿って進展している。組織の粗大化や相界面でのき裂進展は実部品の熱疲労で特徴的に見られる現象¹⁾であるが、本研究で行った一定温度での機械的疲労試験においても同じ現象が観察された。ただし、今回の試験では、組織の粗大化や相界面でのき裂進展現象は、試験温度が高く、かつ繰り返し速度が遅いほ

ど顕著になる傾向が見られたが、このようなミクロ的な変化は非弾性ひずみ範囲で整理した疲労寿命にはほとんど影響しないことになる。

Fig. 11にはひずみ保持を与えたときの疲労試験結果をせん断非弾性ひずみ範囲と疲労寿命の関係で整理して示す。図中の実線はひずみ保持がない場合の結果 (Fig. 9の実線と同じ) である。ひずみ変化時間 t_r が1sと短い場合は、ひずみ保持を与えることにより疲労寿命は低下するが、保持時間 t_h の影響は認められない。ひずみ保持を与えることにより疲労寿命が低下する現象は他のはんだでも報告されている^{1,2)}。しかし、 t_r が50sと長い場合はひずみ保持による寿命低下はなく、ひずみ保持がない場合と同じ寿命を示している。このようにひずみ保持の影響は、ひずみ変化時間に依存することがわかる。これは、ひずみ保持中に起こる応力緩和と拳動に関連しており、応力緩和が急激な場合ほど疲労寿命が低下する傾向が認められている^{1,6)}。ただし、電子部品の実使用環境あるいは信頼性試験では、温度変化時間は数分以上のオーダーであり、Fig. 11で言えば t_r が長い場合に相当する。その点からすると、はんだの疲労寿命はひずみ保持の影響も受けず非弾性ひずみ範囲で決まることになる。

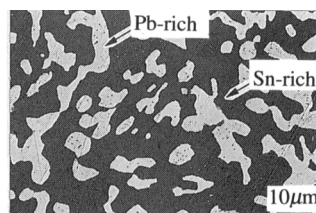
以上のように、63Sn-37Pbの疲労特性は、実部品で問題となるような条件下では、温度、繰り返

し速度、ひずみ保持の影響をほとんど受けず、その寿命線はFig. 9の実線で表せることがわかる。この関係線を表す式 (Coffin-Manson則) は以下のようになる。

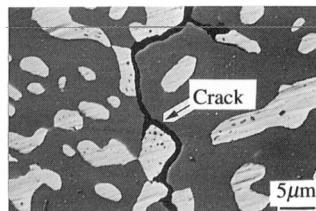
$$N_f = (73.8 / \Delta\gamma_i)^{2.09} \quad (3)$$

$\Delta\gamma_i$: せん断非弾性ひずみ範囲(%)

N_f : 疲労寿命 (サイクル)



(a) Microstructure



(b) Fatigue crack

Fig. 10 Scanning electron micrographs of cross section of 63Sn-37Pb solder specimen tested at 393K, 0.005Hz.

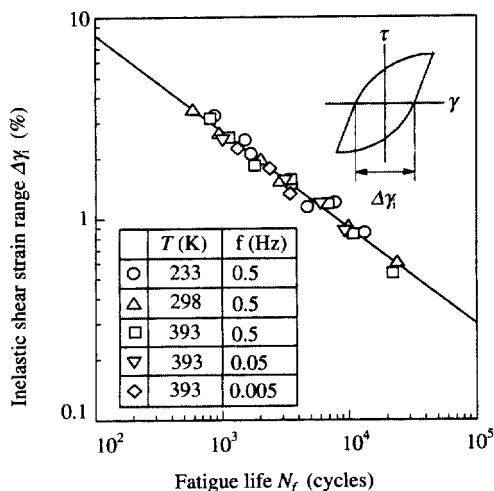


Fig. 9 Effects of temperature and frequency on fatigue life of 63Sn-37Pb solder.

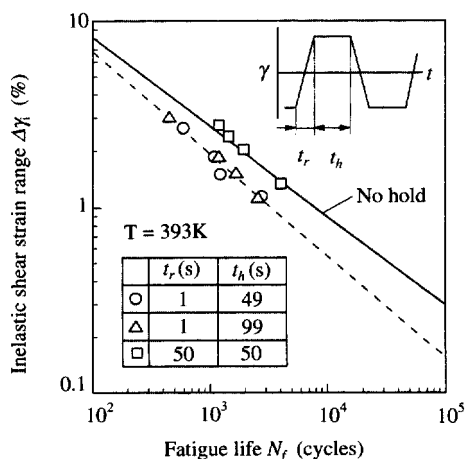


Fig. 11 Effect of strain hold on fatigue life of 63Sn-37Pb solder.

この式はせん断モードのねじり疲労試験から求めたものであるが、実部品の接合部では引張・圧縮やせん断が複合したひずみ状態になることが多い。そこで、複合ひずみ状態下での疲労特性の整理によく用いられるMisesの相当ひずみを使って式(3)を書き換える。せん断ひずみから相当ひずみへの換算は次式のようになる。

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \gamma_i / \sqrt{3} \quad (4)$$

$\Delta \varepsilon_i$: 相当非弾性ひずみ範囲(%)

式(4)を式(3)に代入することにより、次式の相当非弾性ひずみ範囲と疲労寿命の関係が得られる。

$$N_f = (42.6 / \Delta \varepsilon_i)^{2.09} \quad (5)$$

次章ではこの式を使って寿命予測を行う。

5. 実部品はんだ接合部の熱ひずみ解析と寿命予測

5.1 チップ抵抗部品の熱ひずみ解析

解析の対象としたチップ抵抗部品の構造およびそのFEMモデルをFig. 12に示す。この部品は、 Al_2O_3 のチップ抵抗とガラス・エポキシ (FR-4) 基

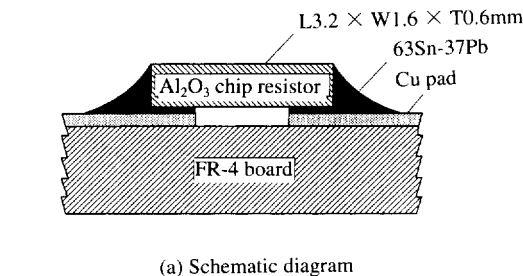


Fig. 12 Chip resistor component.

板を63Sn-37Pbはんだで接合した構造から成る。解析では部品の形状対称性を考慮して、2次元の1/2分割モデルを用いた。要素は平面ひずみ要素である。境界条件は対称面のX方向変位と基板底面のY方向変位を拘束するように与えた。解析に用いた材料物性値をTable 3に示す。はんだ以外の材料は線形弾性材料とし、はんだは非弾性材料として2.3節の力学モデルを用いた。解析の温度条件および解析に用いたコードは3.1節と同じである。

5.2 予測寿命と実寿命の比較

解析の結果得られたはんだ接合部のMisesの相当クリープひずみ範囲の分布をFig. 13に示す。この図は温度サイクルの2サイクル目の結果である。相当クリープひずみ範囲はチップ下で最大となり、その次にはんだフィレット上端付近で大きくなっている。そこで、チップ下角部のA部（最大クリープひずみ発生部位）およびチップ下中央のB部、さらにフィレット上端付近のC部に着目し、各部位でのMisesの相当応力と相当クリープ

Table 3 Material properties of chip resistor component.

Material	E (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/\text{K}$)
Al_2O_3	265	0.37	7.2
Cu	123	0.34	17.0
63Sn-37Pb	Table 1	0.35	26.6
FR-4	21.8	0.33	14.0 (x-direction)
			45.0 (y-direction)

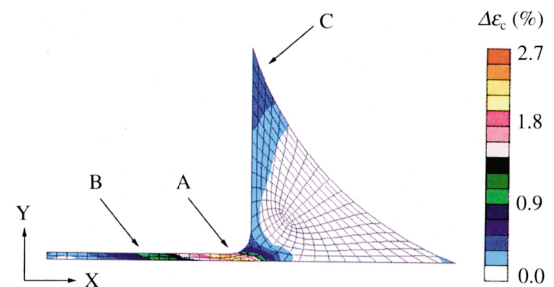


Fig. 13 Equivalent creep strain range distribution in solder joint at 2nd thermal cycle.

ひずみの関係をプロットしてFig. 14に示す。相当応力と相当クリープひずみは全て正の値であるが、この図ではわかりやすくするため、それぞれの値が0になるところで符号を反転させて示している。このようにして表した相当応力と相当クリープひずみの関係はヒステリシスループを描き、そのループは温度サイクルの2サイクル目でほぼ定常状態に達する。そこで、この図には2サイクル目の結果が示してある。このループの幅がFig. 13に示した相当クリープひずみ範囲になる。

A～C部の相当クリープひずみ範囲とその値から予測される疲労寿命をTable 4に示す。ここで予測寿命は以下の方法で求めた。本研究で行った解析では、はんだを弾性クリープモデルで表しているため、非弾性ひずみは全てクリープひずみとして出力される。そこで、Table 4の相当クリープひずみ範囲を式(5)の相当非弾性ひずみ範囲に代入して疲労寿命を計算した。A部では大きな相当クリープひずみ範囲が作用し、予測寿命は300サイクル程度と短い。A部から離れたB部でも1%以上の相当クリープひずみ範囲が作用し、予測寿命は2000サイクル以下である。一方、C部は相当クリープひずみ範囲が1%以下であり、予測寿命は4000サイクル以上となる。

これらの予測結果を実部品の温度サイクル試験結果と比較する。Fig. 15には温度サイクル試験を

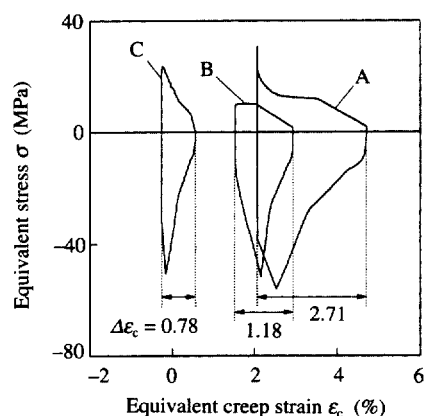


Fig. 14 Equivalent stress-creep strain hysteresis loops of solder joint at 2nd thermal cycle.

3000サイクル行った後のはんだ接合部の断面観察写真を示す。き裂はチップ下とフィレット上端付近に発生していることがわかる。これらのき裂発生部位は、Fig. 13の解析結果において相当クリープひずみ範囲が大きくなる部位とよく一致している。また、寿命に関してもチップ下についてはTable 4の予測結果と整合がとれている。しかし、フィレット上端付近については、予測寿命が4000サイクル以上であるのに対して、現実には3000サイクルの時点ですでにき裂が発生しており、予測より短い寿命になっている。この理由として変形モードの影響が考えられる。ここでの寿命予測は、せん断モードでのねじり疲労試験の結果を基に、それを複合的なひずみ状態に拡張した式(5)により行っている。一方、解析結果では、チップ下についてはせん断変形が支配的であるが、フィレット上端付近はせん断と引張りが複合した変形モードになっている。複合ひずみ状態下ではのはんだの疲労特性を調べた結果では、Misesの相当非弾性

Table 4 Equivalent creep strain range and predicted fatigue life of solder joint.

Location	Equivalent creep strain range $\Delta\epsilon_c$ (%)	Predicted fatigue life N_f (cycles)
A	2.71	317
B	1.18	1800
C	0.78	4276

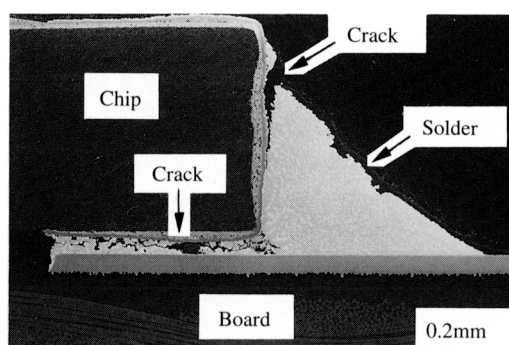


Fig. 15 Scanning electron micrograph of cross section of chip resistor solder joint after 3000 thermal cycles.

ひずみ範囲で整理しても、純粹せん断に比べて複合ひずみ状態下では寿命が1/2から1/3程度になることが報告されている¹⁹⁾。この寿命低下率を本研究の結果にそのまま適用すると、フィレット上端付近の寿命は1400～2100サイクル程度となり、実際の寿命と整合がとれるようになる。複合ひずみ状態下での寿命予測については、今後さらに検討していく必要がある。

6. まとめ

はんだ接合部の熱ひずみ解析法および熱疲労寿命予測法の確立に向けて実験的および解析的検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 63Sn-37Pbと95Pb-5Snはんだの引張およびクリープ特性を把握した。引張特性は温度とひずみ速度に、またクリープ特性は温度と応力にそれぞれ大きく依存した。これらの特性から弾性とクリープによるはんだの力学モデルを構築した。

(2) SiチップとCu板をはんだで接合した構造体を対象に、温度サイクル試験と上記の力学モデルを用いた非弾性有限要素解析を行った。Siチップに発生する応力で比較して、解析結果と拡散型半導体ゲージによる測定結果はよく一致し、解析の妥当性が確認できた。

(3) 63Sn-37Pbはんだの疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼす温度、繰返し速度、ひずみ保持の影響を調べた結果、実部品で問題となるような条件下ではこれら因子の影響はほとんどなく、その疲労寿命は非弾性ひずみ範囲で決まることがわかった。

(4) チップ抵抗部品はんだ接合部の熱ひずみ解析を行い、解析から得られた非弾性ひずみ範囲とはんだの疲労特性から寿命予測を試みた。予測と温度サイクル試験結果は、き裂の発生位置およびチップ下にき裂が入る寿命についてよい一致を示した。ただし、フィレット上端付近では予測より短いサイクル数でき裂が発生しており、複合ひずみ状態下での寿命予測についてはさらに検討が必要である。

最後に、拡散型半導体ゲージの作製およびそれを用いた実験には当所デバイス部の八木雄二氏に多大なるご協力を頂きました。

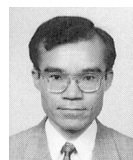
参 考 文 献

- 1) 村田公利, 松重誠一: 自動車技術, 44-11(1990), 6
- 2) Cole, M. and Caulfield, T.: Scripta Met. Mater., 27-7(1992), 903
- 3) Savage, E. I., et al.: ISHM'90 Proc., (1990), 669
- 4) Yamada, H., et al.: FATIGUE'96, (1996), 1117
- 5) Pan, T. Y.: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., 14-4(1991), 824
- 6) 向井稔, ほか3名: 日本機械学会第4回計算力学講演会講演論文集, 910-79(1991), 223
- 7) 上貝康己, ほか2名: 日本機械学会シンポジウム講演論文集, 910-94(1991), 15
- 8) Pao, Y. H., et al.: Trans. ASME J. Electron. Packaging, 115-1(1993), 1
- 9) Sarihan, V.: Trans. ASME J. Electron. Packaging, 115-1(1993), 16
- 10) 王樹波, ほか2名: 日本機械学会論文集, 62-594(1996), 229
- 11) 宮崎政行, ほか2名: 材料, 30-331(1981), 330
- 12) Vaynman, S., et al.: FATIGUE'87, (1987), 655
- 13) 北野誠, ほか2名: 日本機械学会論文集, 54-505(1988), 1709
- 14) Solomon, H. D.: Trans. ASME J. Electron. Packaging, 111-2(1989), 75
- 15) 種田元治, ほか2名: 日本機械学会論文集, 58-549(1992), 669
- 16) 山田春彦, ほか2名: 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 940-37(1994), 449
- 17) 田淵憲司, 中島三善: 自動車技術, 48-8(1994), 44
- 18) Yagi, Y., et al.: Proc. ASME/JSME Advances in Electronic Packaging, Vol.2(1992), 925
- 19) Cortez, R., et al.: Proc. Electron. Compon. Technol. Conf., 42(1992), 354

著 者 紹 介



山田春彦 Haruhiko Yamada
 生年: 1959年。
 所属: 強度評価研究室。
 分野: 金属材料の強度評価・解析に関する研究。
 学会等: 日本機械学会, 日本材料学会会員。



小川一義 Kazuyoshi Ogawa
 生年: 1947年。
 所属: 強度評価研究室。
 分野: 材料および機械要素の強度評価・解析に関する研究。
 学会等: 日本機械学会, 日本材料学会, 自動車技術会会員。
 1991年日本材料学会技術賞受賞。