

F 鉛フリーはんだ接合部の疲労信頼性評価



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
CAE・実験解析技術部
構造プロセス解析技術室

中本 久志

実装電子部品のはんだ接合部は多様な部材で構成されている。そのため、機器の起動や停止などによって加熱冷却サイクルが繰り返されると構成部材の線膨張係数の差により繰り返しの熱応力が発生し、疲労破壊が生じる。とくに、はんだ材は降伏応力が低いため一般的に高ひずみ部位となり低サイクル疲労破壊が生じやすく、低融点材料であるため実働の温度域においてもクリープ現象を示すことから、疲労とクリープを考慮した数値解析による寿命予測が必要とされている。

数値解析を応用した寿命予測はこれまでに数多く発表されている^{*1)*2)}。それらの文献では、数値解析によってはんだ部に発生するひずみを推定し、はんだ材の低サイクル疲労データを用いて機器の疲労寿命を評価している。ただ、低サイクル疲労から予測している寿命は主にき裂発生であることから、本稿では、電子部品のはんだ材として多く使用されている鉛フリーはんだについて、はんだ接合部を対象として加熱冷却サイクル作用時のき裂発生寿命を推定し、加熱冷却サイクルの耐久試験より得られたき裂発生時期を検証した事例を紹介する。

参考文献

- *1) 井上ほか：こべるにくす, Vol.17 (2008), No.33, p.4
- *2) 神田ほか：第88回マイクロ接合研究委員会資料 (2008), p.67
- *3) 王樹波ほか：日本機械学会論文集 (A編), 62巻 (1996), 594号, p.229
- *4) 高橋ほか：エレクトロニクス実装学会誌, Vol.7 (2004), No.4, p.308
- *5) F.C. Monkman and N.J. Grant, Proc. ASTM, Vol.56, p.595

F-1 鉛フリーはんだの力学モデル

はんだ接合部に生じるひずみを数値解析で求めるためには、温度やひずみ速度依存性を考慮した非弾性挙動をあらわす力学モデルが必要となる。ここでは、はんだの非弾性挙動を、式(1)に示す塑性およびクリープ特性に分離したモデルを用いた^{*3)*4)}。

$$\epsilon_{in} = \epsilon_{pl} + \epsilon_{cr} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{in} は非弾性ひずみ、 ϵ_{pl} は塑性ひずみ、 ϵ_{cr} はクリープひずみである。

塑性変形領域の硬化挙動は σ を発生応力として、(2)式に示す線形関係にて表現した。

$$\sigma = \sigma_{0.2} + A \cdot \epsilon_{pl} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{0.2}$ は0.2%耐力、 A は材料パラメータであり、 $\sigma_{0.2}$ および A に関しては引張試験により求めた。その結果を第1表に示す。また、加熱冷却サイクルによってはんだは引張圧縮の応力ひずみ状態が繰り返されるため、構成則は移動硬化則を用いた。

クリープ変形は、定常クリープ域を対象とした(3)式のべき乗クリープ則(Norton則)により表現

した。

$$\frac{d\epsilon_{cr}}{dt} = B \cdot \sigma^n \quad (3)$$

ここで、 B と n は温度に依存する材料定数である。本クリープ則を構築するのに必要となる各温度でのパラメータ B と n は、クリープ破断強度の外挿の際によく用いられる(4)式のLarson-Millerパラメータ(LMP)をもとに算定した。

$$LMP = T \cdot (C + \log t_r) \quad (4)$$

ここで、 T は絶対温度、 C は定数、 t_r は破断時間である。ここでは、一般的に破断時間が最小クリープひずみ速度 $d\epsilon_{cr}/dt$ に反比例する関係：Monkman-Grant則^{*5)}から、クリーププレート試験結果を用いてLMPを求めた。

算定した応力-LMPの関係を第1図に示す。本近似式からNorton則に変換し、必要なパラメータ(定数 B 、クリープ指数 n)を算出した(第2表参照)。

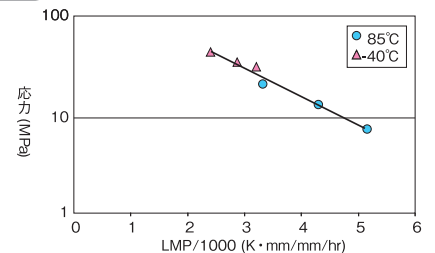
第1表 鉛フリーはんだの弾塑性特性

温度 (°C)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	A (MPa)
-40	49.6	4080.0
85	28	1642.5

第2表 鉛フリーはんだの定常クリープ特性

温度 (°C)	B	n
-40	1.27×10^{-27}	15.44
85	4.18×10^{-15}	10.05

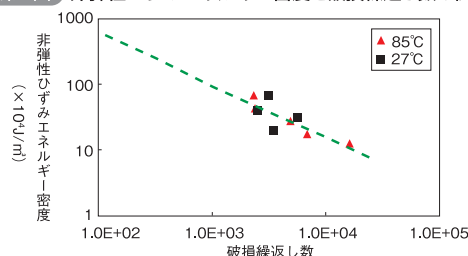
第1図 Larson-Millerパラメータと応力の関係



F-2 鉛フリーはんだの低サイクル疲労特性

はんだの疲労寿命評価に用いる代表温度下での低サイクル疲労試験結果を第2図に示す。ここでは、寿命評価用のパラメータとしてひずみエネルギー密度(疲労試験で得られる応力ひずみ履歴のヒステリシス面積より算出)を用い、各温度での疲労試験結果から第2図に示すようなひずみ-寿命線図を定めた。

第2図 非弾性ひずみエネルギー密度と破損繰返し数の関係

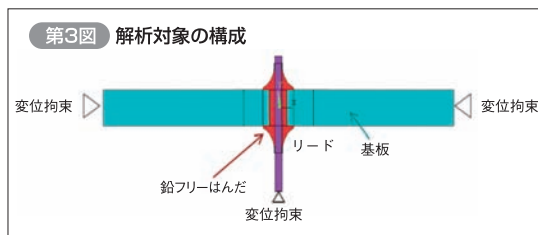


F-3 はんだ接合部の弾塑性クリープ解析

はんだ材を弾塑性クリープ材料、その他の部材を弾性材料とした加熱冷却サイクル負荷の弾塑性クリープ解析を実施した。計算対象はスルーホール基板の一部分とし、はんだ接合部を含む1本のリードおよび基板を2次元断面であらわした(第3図)。

熱負荷条件は、85℃での温度保持60分、-40℃への降温5分、-40℃での温度保持60分、85℃への升温5分を1サイクルとして、計5サイクル与えた。拘束条件は、基板境界の全節点およびリード境界の全節点について面内方向の変位を拘束した。計算に使用した材料定数を第3表に示す。なお、はんだのヤング率は温度依存性を考慮した。

計算により得られた、加熱冷却5サイクル目の累

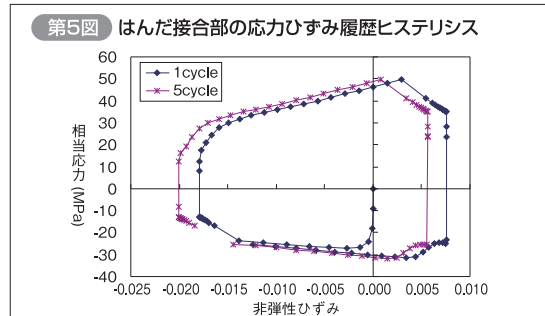
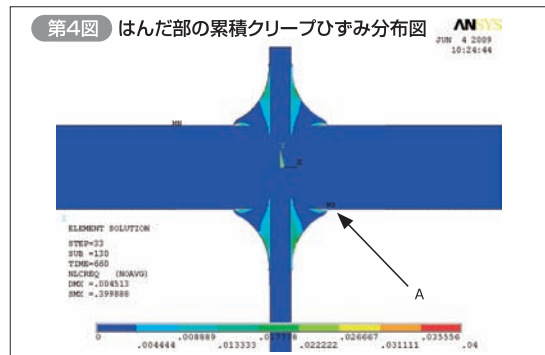


第3表 構成部材の機械的特性

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	線膨張係数(×10 ⁻⁶ /℃)
基板	23.6	0.19	14
リード	206	0.3	11.6
鉛フリーはんだ	$4.11 \times 10^{-2} T$ [℃]	0.38	20.9
	+40.2		

積相当クリープひずみの分布を第4図に示す。基板と接するはんだの端部で高いひずみが生じている。

第5図に、第4図のA部における非弾性ひずみ相当応力のヒステリシスを示す。寿命評価には、本ヒステリシスの面積から算出される、非弾性ひずみエネルギー密度を用いた。ここでは、第4図のAが最大値発生部位であり、その値は 1.66×10^6 J/m³であった。



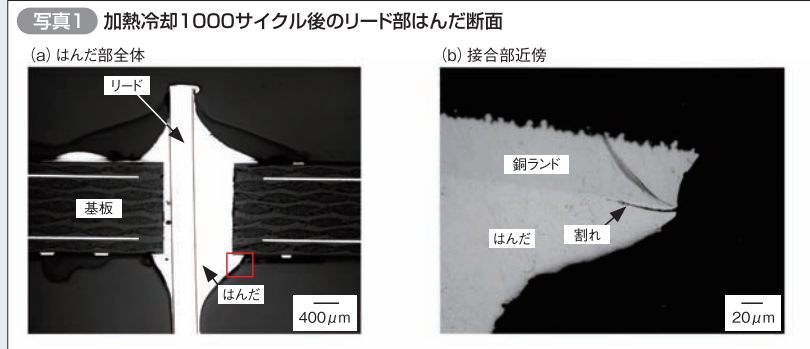
F-4 はんだ接合部の疲労寿命推定

前章の数値解析によって得られた非弾性ひずみエネルギー密度と、第2図に示した低サイクル疲労試験の結果、はんだ接合部のき裂発生寿命の推定値は456サイクルと求められた。ここで、数値解析により推定された寿命を実部品の加熱冷却サイクル試験結果と比較し

てその精度を検証した。

加熱冷却サイクル試験終了後のはんだ接合部断面観察結果の一例を写真1に示す。なお、はんだ接合部には厚さ約40μmの銅ランドが存在するが、はんだに発生するひずみの銅ランドによる影響は小さいと考え、本解析では銅ランドはモデル化しなかった。結果、はんだ接合部の界面にき裂が発生しており、第4図に示した解析結果で、ひずみエネルギー密度が大きくなる部位とよく一致した。

加熱冷却サイクル試験によりサイクル数とき裂進展量の関係を取得し、き裂が発生するサイクル数を寿命とすると、555サイクルとなった。これより、計算により推定された寿命はFactor of 2以内の範囲にあり、加熱冷却サイクルを受ける電子部品のき裂発生寿命を高い精度で推定できることが示された。



本稿では、塑性・クリープ分離モデルによって電子部品のはんだ接合部のき裂発生寿命を精度よく推定できることを示した。電子部品の用途はコンピュータ、携帯電話(スマートフォン)、デジタル家電、自動車部品とさまざまであり、それらの信頼性を比較的簡便かつ短時間に評価する技術として有

用なものと思われる。しかしながら、き裂発生がすなわち電子機器の寿命と判断すると、安全率が過度に見込んだ評価となる可能性がある。今後は、発生したき裂の進展を追跡するなど、電子機器が使用不能となる寿命を評価する技術が必要になると思われる。