604 き裂進展モデルに基づくはんだ疲労寿命予測方法

A method based on a crack propagation model for predicting solder fatigue life

○ 正 寺崎 健 (日立・機械研) 正 谷江尚史 (日立・機械研)

Takeshi TERASAKI and Hisashi TANIE, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
832-2, Horiguchi, Hitachinaka, Ibaraki 312-0034, Japan

We previously developed a crack propagation model that can be used to calculate crack paths in micro-solder joints in semiconductor structures. We have now developed a method based on this model that can be used to predict solder fatigue life. Correcting for the effect of element size is difficult when fatigue life is calculated using a finite element method, so we investigated the dependence of the calculated life on the element size and developed a formula for approximating this dependence using Hutchinson-Rice-Rosengren singularity theory. This formula enables us to estimate fatigue life regardless of element size. We tested this formula by analyzing the effect of element size on the fatigue life of a center-cracked plate (CCP) made of tin-lead eutectic solder. The results agreed well with the experimental results, indicating that our method can effectively predict solder fatigue life.

Key Words: Life Prediction, Crack Propagation, Finite Element Method, Accumulated Damage, Solder

1. 緒言

電子部品と配線基板の接続には従来からはんだが広く用いられている。はんだ接合部は、電子部品と配線基板の線膨張係数差に起因して、熱疲労破壊する場合がある。はんだ接合部の熱疲労寿命は疲労き裂（以下、き裂と略す。）進展の寄与が大きいため、き裂進展挙動の把握が重要となる。

筆者らははんだ各位置に累積される損傷に基づいてき裂の発生や進展を評価することで、はんだ接続部のき裂経路を解析的に再現できるき裂進展モデル（以下、累積損傷モデルと記す。）を考案し⁽¹⁾、各種はんだ接合部に適用した⁽²⁾。

本手法の課題は、算出されるき裂進展寿命に要素寸法依存性があることである。そこで、本報では、CCP (Center-Cracked Plate) 試験片を対象に、HRR (Hutchinson-Rice-Rosengren) 特異場理論⁽³⁾を用いたき裂進展寿命の要素寸法依存性の補正方法を導出した。

2. 累積損傷モデル

2.1 アルゴリズム

提案したき裂進展モデル⁽¹⁾は次の手順で解析を行う。き裂を評価する領域を同一寸法の要素に分割し、式(1)、(2)を用いて各要素の相塑性ひずみ範囲から損傷増分 Δf_i 、各要素が寿命に至るために必要なサイクル数 ΔN_i を計算する。

$$\Delta f_i = \left(\frac{\varepsilon_{peq}^i}{C_p} \right)^{1/\alpha_p} \quad (1)$$

$$\Delta N_i = \frac{1-f_i}{\Delta f_i} \quad (2)$$

ここで、 C_p 、 α_p はCoffin-Manson則の係数である。次に、 ΔN_i の最小値を1回の応力解析で増加させるサイクル数 ΔN とし、累積損傷 f_i を式(3)で更新するとともに、破壊に至った要素を削除する。この手順を繰返して、き裂進展を解析する。

$$f_i \rightarrow f_i + \Delta N \cdot \Delta f_i \quad (3)$$

2.2 HRR 特異場理論の適用

本節では、二次元き裂先端近傍の非線形特異場をHRR特異場で仮定し、累積損傷モデルで算出されるき裂進展寿命の要素寸法依存性を導出する。

まず、無限領域にある2次元き裂を仮定し、相当塑性ひず

み ε_{peq} と相当応力 σ_{eq} の非線形関係を式(4)で近似する。

$$\frac{\varepsilon_{peq}}{\varepsilon_0} = \alpha \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^n \quad (4)$$

α 、 σ_0 、 ε_0 、 n は材料定数である。式(4)に非圧縮性条件と全ひずみ理論の比例負荷条件を適用し、平面応力状態を仮定すると、き裂先端の相当塑性ひずみ ε_{peq} は J 積分を用いて次式に示す r と θ の関数で表される。

$$\varepsilon_{peq}(r, \theta) = (J)^{\frac{n}{n+1}} \cdot r^{-\frac{n}{n+1}} \cdot E_{peq}(\theta) \quad (5)$$

ここで、損傷が累積されていない($f_i = 0$)き裂先端の要素について考える。累積損傷モデルでは、損傷の算出に相当塑性ひずみの要素平均値（以下、要素平均値と略す）を用いている。き裂先端から積分点までの距離 r を、要素寸法 L^{EL} と定数 R_k の積で表わすと、要素平均値 ε_{peq}^{EL} の要素寸法依存性が次式で表される。

$$\varepsilon_{peq}^{EL} = (J)^{\frac{n}{n+1}} \cdot \tilde{E}_{peq} \cdot (L^{EL})^{\frac{n}{n+1}} \quad (6)$$

$$\tilde{E}_{peq} = \frac{\sum_k R_k^{\frac{n}{n+1}} \cdot E_{peq}(\theta_k)}{s}$$

k は積分点番号、 s は要素内の積分点の数である。 $\tilde{E}_{peq}$ は L^{EL} に依存しない定数となる。 $f_i = 0$ であるき裂先端の要素における疲労寿命 ΔN_1 の要素寸法依存性は、式(1)、(2)、(6)から次式のように求められる。

$$\Delta N_1 = \left(\frac{(J)^{\frac{n}{n+1}} \cdot \tilde{E}_{peq}}{C_p} \right)^{\frac{1}{\alpha_p}} \cdot (L^{EL})^{\left(\frac{n}{(n+1)\alpha_p} \right)} \quad (7)$$

さらに、要素寸法 L^{EL} の x 倍で規定される任意のき裂長さ a の区間において、 ΔN_1 が一定と仮定すると、き裂長さ a を進展するのに必要なサイクル数 N_{nd} は、式(8)で表される。

$$N_{nd} = a \cdot \left(\frac{(J)^{\frac{n}{n+1}} \cdot \tilde{E}_{peq}}{C_p} \right)^{\frac{1}{\alpha_p}} \cdot (L^{EL})^{\left(\frac{n}{(n+1)\alpha_p} - 1 \right)} \quad (8)$$

すなわち、累積損傷の影響を考慮しない場合、き裂長さ a を

Fig. 1 Procedure for fatigue life correction

進展するのに必要なサイクル数 N_{nd} は、要素寸法 L^{EL} の $(n/((n+1) \cdot \alpha_p) - 1)$ 乗に比例することになる。

累積損傷モデルにおけるき裂は、1要素寸法の高さをもつ長方形で近似しており、理想的なき裂形状ではない。本報では説明を省略するが、このき裂形状の要素寸法依存性と累積損傷 f_i の要素寸法依存性も別途検討した。

3. 算出寿命の要素寸法依存性

3.1 補正方法

本報で提案する補正方法を図1に示す。まず、Coffin-Manson 則の適用限界と考えられる寿命 N_{UL} を決め、そのときの塑性ひずみ範囲を、き裂先端要素の相当塑性ひずみ範囲の適正值 ε_{prop}^{EL} とする(図1(a))。続いて、定量的な寿命算出に適正な要素寸法 L_{prop}^{EL} を図1(b)に示す手順で求める。寿命とするき裂長さを決定し、そのき裂長さにおけるき裂先端の相当塑性ひずみ範囲の要素平均値 ε_{calc}^{EL} を求める。

同じ解析モデルであれば、 J と $\tilde{E}_{peq}$ は L^{EL} に依存しないため、 L_{prop}^{EL} と L_{calc}^{EL} の比は、式(6)より次式で表わされる。

$$\frac{L_{prop}^{EL}}{L_{calc}^{EL}} = \left(\frac{\varepsilon_{prop}^{EL}}{\varepsilon_{calc}^{EL}} \right)^{\left(\frac{n+1}{n} \right)} \quad (9)$$

L_{prop}^{EL} は、 L_{calc}^{EL} 、 ε_{calc}^{EL} は既知なので、式(9)と図1(a)で求めた ε_{prop}^{EL} を用いて算出することができる。補正後の寿命 N_{prop} は、式(9)で求めた L_{prop}^{EL} を用いて、次式で算出する(図1(c))。

$$N_{prop} = N_{calc} \cdot \left(\frac{L_{prop}^{EL}}{L_{calc}^{EL}} \right)^{\mu} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{n}{n+1} \cdot \frac{1}{\alpha_p} - 1 + \mu_{CS} + \mu_{AD}$$

Fig. 2 Comparison of calculations and experimental results of crack propagation behavior

Fig. 3 Correction of calculated crack propagation life

μ_{CS} はき裂形状の、 μ_{AD} は累積損傷の影響である。

3.2 CCP 試験片による検証

前節の補正方法を Sn-40Pb はんだの CCP 試験片による引張-圧縮負荷の疲労き裂進展試験の計算⁽²⁾を対象に検証した。要素寸法は 10, 25, 50, 100 μm 、材料定数は $n=5.9$ 、 $C_p=0.237$ 、 $\alpha_p=0.5$ である。図2に、補正前のき裂進展寿命の計算結果を実験結果と併せて示す。測定値は、25 μm と 50 μm の解析結果のほぼ中間にあり、き裂進展挙動を大体再現できているが、寿命の計算値は要素寸法に大きく依存していることがわかる。

図3に前節で述べた方法で計算寿命を補正した結果を示す。本事例の場合、 N_{UL} は 25 としたところ、き裂進展寿命が実験結果に良く一致した。この値が絶対的なものか、それとも各種条件に依存するのかは、今後詳細に検討する必要がある。また、式(10)の μ_{CS} は 0.05、 μ_{AD} は 0.1 を用いた。

4種類の要素寸法の計算結果はいずれも、補正により実験結果にほぼ一致しており、本補正方法の妥当性が検証できた。

4. 結言

先に提案した累積損傷に基づく疲労き裂進展評価手法(累積損傷モデル)の実用上の課題であった算出寿命の要素依存性について、HRR 特異場理論に基づく簡便な補正方法を提案した。まず、低サイクル疲労寿命曲線から、き裂先端要素の相当塑性ひずみの上限値を決定し、寿命となるき裂長さにおけるひずみ値から適正な要素寸法を求める。その後、計算に用いた要素寸法と適正な要素寸法との関係から、寿命を補正する。この方法により、CCP 試験片の疲労き裂進展寿命の計算値を補正できることを確認した。

参考文献

- (1) 谷江, 寺崎, 機論 A, 72-717, (2006), pp. 638-645
- (2) Terasaki, T. and Tanie, H., JSMME, Vol. 1, No. 2, (2007)
- (3) Hutchinson, J. W., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 16, (1968), pp. 13-31.