表面実装部品はんだ接合部の 応力解析技術

Stress Analysis for Solder Joints in SMT Devices

向井 稔^{*1} 川上 崇^{*1} 高橋 邦明^{*2}

1. はじめに

高集積化・高密度化が一層進行するエレクトロニクス製品の設計においては、応力に起因する問題が数多く指摘されている。シリコンウェハ素子内部における転位発生、パッケージのリフロークラック、そして、はんだ接合部の疲労破壊などが代表例としてあげられるが、全てに共通しているのは、数 μm ～数百 μm という微小領域における応力問題であるという点である。応力・歪を実際に測定して評価することが極めて困難であるために、有限要素法による応力シミュレーションをはじめとする計算力学的手法が問題解決のために適用されることが多い。中でも、はんだ接合部の信頼性は広範かつ重要な問題であるために、その解析は最も多く試みられている。本報では、はんだ接合部の熱疲労破壊問題について簡単に述べた後、応力解析技術を用いた疲労寿命予測法について、著者らが行った解析例の紹介とともに概説する。

プリント基板に組み込まれるのが一般的になってきている。従来のスルーホール実装法では、プリント基板に設けられた穴にリードを差し込み裏面から強固に接合する。これに対し、表面実装法はプリント基板上に設けられたパッドにリードを接合するため、基板の多層配線化とも相まって実装密度を向上できる一方、接合部の強度を十分検討する必要がある。

Fig.1に示すように、電子機器に温度変動（デバイスの発熱および周囲温度の変動）が負荷されると、線膨張率や温度上昇の差異に伴い、デバイスとプリント基板との間に膨張差が生じる。このように生じた熱応力場においては、構造強度上最も弱いはんだ部材に歪が集中する傾向にあり、熱疲労破損に起因する断線を防止することが重要課題となっている。

従来は、はんだ材料の強い非線形特性や接合界面の評価の難しさから、経験と試行錯誤に基づいて対処されることが多かった。しかしながら、先進的な表面実装型デバイスを用いる場合には、はんだ接合部で生じる熱疲労

2. はんだ接合部の熱疲労破壊と 応力解析技術

電子機器の高集積化に伴い、半導体デバイスやチップ部品が表面実装の形態で

Fig.1 Thermal fatigue of solder joints.

*1 Minoru Mukai, Takashi Kawakami
（株）東芝研究開発センター／Toshiba Corporation, Research and Development Center.

*2 Kuniaki Takahashi
（株）東芝青梅工場／Toshiba Corporation, Ome Works

問題の解決が機器開発の成否を握るケースもあり、従前の手法は必ずしも効率的とは言えなくなっている。このため、計算機性能の急激な向上を背景に、応力解析技術を活用した、はんだ接合部の信頼性評価が数多く試みられるようになってきた。

応力解析技術とは、応力シミュレーション結果と材料試験結果とを併せて評価することにより物が壊れる壊れないを予測する技術といえる。はんだ接合部では熱疲労信頼性が特に問題となるために、寿命サイクル数の予測が解析の目的となる。はんだ接合部の疲労寿命を考察した文献は枚挙に暇がなく¹⁾、数多くの寿命予測法が提案されているが、各手法を特徴づけている重要な技術的ポイントは以下の二点であるといえる。

第一のポイントは、はんだ材料特性のシミュレーション上のモデル化である。はんだ (Sn63-Pb37) は低融点金属であるために、その変形挙動は、弾性、塑性 (力に依存した非弾性変形)、クリープ (力と時間に依存した非弾性変形) の重ね合わせに依存している。この複雑な挙動が材料特性のモデル化を困難にしており、弾性モデル、弾塑性モデル、さらには、クリープまで考慮したモデルなど、多様なモデル化がなされている。

第二のポイントは、シミュレーション結果の評価に関する問題である。シミュレーションより得られる接合部の歪値等をパラメータに、別途、材料疲労試験から求めた寿命予測式を用いて評価するということは各手法に概

ね共通している。しかし、疲労試験方法一つとっても、バルク材の試験や、接合継手形状を用いた試験など様々であり、基準となる方法は確立されていないのが現状である。

次節においては、著者らが提案している弾クリープ解析法を一例としてあげ、はんだ接合部の疲労寿命予測法を具体的に説明する。

3. 弾クリープ解析と解析事例

3.1 弾クリープ解析²⁾

はんだは室温においても顕著なクリープ特性を示すことが知られている。電子機器のON/OFFなどに起因して、はんだ接合部に加わる熱負荷は、保持時間が長いために、温度変動中に加えて保持時間中に生じる非弾性歪の算定は重要なポイントである。したがって、はんだ接合部の応力解析にあたっては、保持時間の影響を何らかの形で表現することは不可欠と考えられる。

著者らの提案している弾クリープ解析は、Fig.2に示すように、はんだの材料特性を弾性とクリープ特性で表現することに特徴がある。材料定数をTab.1に示す。全ての非弾性歪をクリープ歪として取り扱うために、相当クリープ歪の振幅値 ($\Delta \epsilon_c$) を寿命予測する際のパラメータとして用いる。有限要素法に基づく応力シミュレーションより得られる歪振幅 ($\Delta \epsilon_c$) の等高線図から、

Tab.1 Material properties of 63Sn-37Pb solder.

Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient (/°C)
20.0	0.39	2.47×10^{-5}

Creep parameter $\dot{\epsilon}_c = A \sigma^n$		
Temperature (°C)	A (MPa /hr)	n
-65	6.545×10^{-17}	9.2
0	3.570×10^{-10}	5.6
25	1.975×10^{-8}	4.7
50	6.417×10^{-7}	3.9
100	7.044×10^{-5}	3.0
150	2.089×10^{-3}	2.4

Fig.2 Elastic-creep model of solder material.

Fig.3 Equivalent creep strain range distribution in solder joint of TSOP.

Fig.4 Low cycle fatigue life defined by a 25% load drop at room temperature.

クラックが発生すると予想される歪集中部と、その位置での歪の大きさが読み取れる。Fig.3はTSOP (Thin Small Outline Package) の解析結果の一例であるが、このケースでは、図中の矢印部が歪集中部であり、この部分よりクラックが発生することが予想される。歪の大きさを寿命サイクル数へと変換する際に必要とされるのが疲労試験の結果である。薄肉円筒試験片を用いた低サイクル疲労試験結果をFig.4に示す。はんだの疲労特性も、他の一般的な金属材料同様、Coffin-Manson型の式によって整理できることが過去に行われた多くの研究により明らかにされている。

$$N_f = \beta (\Delta \epsilon_{in})^{-m}$$

ここで、 N_f は寿命サイクル数、 $\Delta \epsilon_{in}$ は、非弾性歪振幅、 β 、 m は材料定数を示す。応力シミュレーションで得られた歪振幅値を上式に当てはめることにより、はんだ接

(a) Schematic cross-sectional view.

(b) External appearance of the solder joints.

Fig.5 820 pin SMT-PGA package.

合部に大規模なクラックが発生するサイクル数が予測できる。

3.2 解析事例1：PGAパッケージ^{3),4)}

Fig.5に820ピンの表面実装型PGA (Pin Grid Array) パッケージの外観を示す。温度サイクル試験や実際の機器のON/OFFが作用した場合の負荷は、はんだ接合部の微細化やパッケージの大型化に伴い、一層

(a) Under thermal cycle test conditions.

(b) Under field conditions.

Fig.6 Equivalent creep strain range distributions in solder joints of PGA.

Fig. 7
Deformation analysis of BGA.

厳しくなっている。このため、開発にあたっては、詳細なシミュレーションを含む、合理的な設計が不可欠なものとなった。

温度サイクル試験条件と使用環境条件 (ON/OFF) を設定したシミュレーション結果を Fig. 6 に示す。温度サイクル試験は信頼性を保証する加速試験として最も一般的に行われている。したがって、温度サイクル試験の使用環境に対する加速値は極めて重要な知見となる。上述の Coffin-Manson 式に基づくと、加速値 a は次式のように表現できる。

$$a = \frac{N_{TF}}{N_{TT}} = \frac{\beta (\Delta\epsilon_F)^{-m}}{\beta (\Delta\epsilon_T)^{-m}} = (\Delta\epsilon_F / \Delta\epsilon_T)^{-m}$$

ここで、 N_{TF} は使用環境での寿命、 N_{TT} は温度サイクル試験での寿命、 $\Delta\epsilon_F$ 、 $\Delta\epsilon_T$ は、各々、使用環境条件、温度サイクル試験条件における歪パラメータである。本事例の場合、 $a=190$ ($m=2$ を仮定)、すなわち、温度サイクル試験結果のおよそ 190 倍が使用環境での予測寿命であるとの知見が得られ、使用頻度も考慮に入れること

で耐用年数が推定できた。温度サイクル試験と使用環境の定量的な相関付けは、応力シミュレーションが最も威力を発揮するところである。

3.3 解析事例 2：BGA パッケージ⁵⁾

近年、はんだパンプ接合を用いて実装される BGA (Ball Grid Array) パッケージが注目されている。BGA パッケージはプリント基板に直接接合する形態をとるために、リード付きの従来パッケージと比較して、はんだ接合部の熱疲労破損に対する信頼性問題は一層顕在化する。

プラスチック BGA の場合、パッケージ本体を構成する樹脂材料とプリント基板の線膨張率が近いために ($15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 前後)、はんだパンプの応力状態は、むしろパッケージ内部の Si チップの線膨張率と剛性に強く依存することが知られている⁵⁾。Fig. 7 は簡易的な変形

Fig. 8 Solder bump model.

Fig. 9 Equivalent creep strain range distribution in solder bump of BGA.

Fig. 10 Solder bump after the TCT.

解析結果の一例であるが、Si チップ端部付近のバンプ（図中、丸で囲った位置）で最も厳しい応力条件となることが明らかにされている⁵⁾。この結果は、実際の試験結果とも良く符合している。

変形解析に引き続き、バンプ一個を対象とした詳細な弾クリープ解析を実施した。対象性を考慮した解析モデルを Fig.8 のように設定した。荷重条件としては、前述と同様の温度サイクル試験条件を与えている。解析で得られた相当クリープ歪の等高線図を Fig.9 に、解析条件に対応した温度サイクル試験結果を Fig.10 に各々示す。パッケージ側の界面近傍で疲労クラックが生じており、解析結果の歪集中部と極めて良く一致している。材料力学的視点でみると、はんだバンプにおいてクラックが発生する位置は異種材料との接合界面であるといえる。接合界面近傍における応力分布は特異性を示すのが一般的であり、その応力・歪評価は必ずしも容易ではない。はんだ表面の歪値に基づく評価は好ましくないと考え、結晶粒径を考慮した評価位置をはんだ内部に設定し（表面から50~100 μm 深さ）、評価を試みた。該当領域の相当クリープ歪は1.5~1.8%の値が算出されている。疲労試験結果によれば、形状・材料不確定性を無視しても、300~500サイクルでクラック発生が予想される。温度サイクル試験結果では、500サイクル終了時に数十 μm レベルのクラックが多数観察されており、解析手法の妥当性が明らかである。

4. ま と め

応力解析技術を用いた、はんだ接合部の熱疲労寿命予測法について概説した。従来、はんだ接合部の信頼性評価は経験と試行錯誤に頼っていた部分が多かった。しかしながら、応力解析に基づく信頼性評価法も、ようやく機械工学の土俵に乗るレベルに達し、設計の場に少しずつ顔を出してきた。今後の課題としては、界面近傍における評価、クラック進展挙動の解析、加えて、近い将来予想される Pb レスはんだへの対応などがあげられる。

これらの課題をクリアにしていくことができるか否かが、本技術の今後の発展を左右していると考えられる。

はんだ接合部の問題に限らず、エレクトロニクス分野の要求する応力解析技術のレベルは非常に高い。製品開発に対して、より具体的に貢献していくためには、高度な技術的内容を含んでいると同時に、使いやすい設計法・設計ツールの開発を模索していく必要があろう。

参 考 文 献

- 1) たとえば次の文献（他多数）
J.H.Lau, D.W.Rice and P.A.Avery: Elasto-plastic Analysis of Surface-Mount Solder Joints, IEEE Trans.CHMT-10, No3 (1987) 346.
- 2) 向井 稔, 川上 崇, 遠藤徹也, 高橋邦明: IC パッケージ半田接合部の弾クリープ解析と疲労寿命, 機構論, No.910-79, (1991), 223.
- 3) 向井 稔, 川上 崇, 遠藤徹也, 戎谷 隆, 高橋邦明: 表面実装型 PGA パッケージはんだ接合部の弾クリープ熱応力解析, 機構論, No.930-9 (1993), 508.
- 4) Minoru MUKAI, Takashi KAWAKAMI, Tetuya ENDO, Yoichi HIRUTA and Kuniaki TAKAHASHI: Elastic-Creep Thermal Stress Analysis for the SMT-PGA Package's Solder Joint, Proceedings of the ASMEWAM, AMD-Vol. 187, (1994), 197.
- 5) 向井 稔, 川上 崇, 高橋邦明: はんだバンプ接合部の界面近傍における熱疲労寿命予測, 機構論, No.95-1, (1995), 504.

〔執筆者紹介〕

向井 稔（むかい みのる）

1990年、慶応義塾大学 大学院理工学研究科修士課程修了。同年、東芝入社。以来、はんだ接合部の信頼性の研究に従事。現在、研究開発センター。日本機械学会会員。

川上 崇（かわかみ たかし）

1981年、東京工業大学 大学院理工学研究科博士課程修了。同年、東芝入社。以来、エネルギー機器、半導体の強度信頼性の研究に従事。現在、研究開発センター主任研究員。日本機械学会会員。

高橋邦明（たかはし くにあき）

1979年、東海大学 工学部精密機械工学科卒業。現在、東芝青梅工場実装技術部主務。SMT プリント板の実装技術・設計技術開発に従事。日本機械学会、電子情報通信学会会員。