機械構造部品の安全性設計・予防保全における信頼性工学適用

4. 電子部品実装における保証試験と信頼性評価†

于 強* 白鳥正樹**

Application of Reliability Engineering for Safety Design and Maintenance against Mechanical Structure and Components

IV : Reliability Assessment and Reliability Test for Electronics Packaging

by

Qiang Yu* and Masaki SHIRATORI**

Key words : Electronics package, Reliability assessment, Interface mechanics, Low-cycle fatigue, Micro-structure testing

1 はじめに

ノートパーソナルコンピュータや携帯電話をはじめとする各種モバイル情報端末電子機器の普及に伴い、半導体製品の開発の動向は高集積化、高密度化と超小型化であり、この相反する要求を満たすために半導体部品を基板に実装するプロセスにおいては様々な新技術が導入されるようになった。このような技術の進歩にともなって、実装構造がより過酷な仕様条件に強いられ、これまであまり問題となっていなかった強度上の諸問題が新たに取組むべき課題として浮かび上がってきた。

電子部品実装の強度信頼性に関する問題は (1) 半導体素子、(2) 半導体パッケージ、(3) 基板への実装、および (4) 機構部品の4つのレベルの問題に分けて議論することができる。これらのいずれのレベルにおいても強度信頼性の特徴および問題点は、

(1) 主要な負荷形態は熱負荷のほかに機械的負荷、衝撃負荷と振動などがある。

(2) 従来の大型の機械構造物では経験したことのない新しい材料が多く使用されており、これらの材料の異種材接合構造よりなる。

(3) 小型かつ大集積である。すなわち、極めて小さいにもかかわらずその構造は極めて複雑である。

(4) 部材の微細化に伴い、結晶粒度、不純物介在物、マイクロボイド、表面マイクロクラック、酸化膜、加工変質層などの材料強度に及ぼす影響はバルク材料に比べ大きいので、バルク材料の強度が微細部材の強度とは必ずしもならない。そのため、これらのはんだ接合部の強度信頼性評価試験は今までのように標準試験片を用いて行うことができなくなり、実構造の強度評価試験を行わなければならない。

(5) 異なる多種な材料でできた複合構造であるため、強度信頼性問題は母材より界面に集中している。

(6) 実構造を用いて強度評価を行うために、微細化された接合部の力学的特性の評価手法および破壊の検知手法（非破壊検査）の確立はより重要な課題となっている。

といった点が挙げられる。その強度評価対策と課題として次のような手法を挙げることができる。

(1) 実構造の電子デバイス部品を用いてその熱負荷（熱衝撃試験、熱サイクル試験など）の強度信頼性評価試験を行う。

(2) 熱負荷試験の代わりに機械的強度信頼性評価試験が考えられる。しかし数百ミクロンのマイクロ構造の強度信頼性評価を行うためには、最低0.1ミクロンの変位制御精度を有するマイクロ構造の強度評価試験機が必要とされている。この精度を満足するために従来の強度試験機の技術だけでは難しい。

(3) 接合構造を含めた衝撃強度などの特性を評価するマイクロ衝撃試験法などを確立する必要がある。

(4) 強度信頼性試験の条件に合わせて電子デバイス部品の接合部の応力・ひずみ解析を行い、マイクロ接合部の力学的挙動を正確に把握することによって、解析で得られた力学的パラメータ（応力、ひずみ振幅など）を用いて強度信頼性評価試験の結果を評価する。

(5) 強度信頼性評価を行う際、マイクロ接合部の破壊を正確に評価しなければならない。そのため、今までの破壊および非破壊検査などの手法はマイクロ接合部の破壊検査に適用できるかどうかを検討する必要がある。

その中から材料力学が解決しなければならない重要な問題の代表例として異種材界面はく離強度の評価法およびマイクロ接合部の疲労寿命信頼性評価法を挙げるこ

† 原稿受理 平成12年9月4日 Received Sep. 4, 2000

* 横浜国立大学工学部生産工学科 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台, Dept. of Mech. Eng., Yokohama National Univ., Yasutsujigatani-ku, Yokohama, 240-8501

** 正会員 横浜国立大学工学部生産工学科 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台, Dept. of Mech. Eng., Yokohama National Univ., Yasutsujigatani-ku, Yokohama, 240-8501

ができる。本稿では簡単に異種材界面はく離の評価技術について述べ、具体的な事例を用いてマイクロはんだ接合部の熱疲労信頼性の評価試験法および寿命評価法について紹介する。

2 樹脂パッケージ異種材界面はく離強度の評価法

半導体パッケージは半導体素子を物理的、化学的環境から保護すると共に、素子と実装基板の接続を仲介する役割を果たしている。チップ、リードフレーム、レジン（モールド樹脂）などは互いに線膨張係数が異なるため、はんだリフロー時の熱負荷（230℃前後）、信頼性評価のための温度サイクル試験（-50～125℃）などではパッケージ内部に熱応力が発生する。この熱応力が原因となって、チップやレジン、接着界面などに種々の損傷が発生する。これらの損傷モードの多くは界面のはく離が関与しており、この界面はく離を防止する必要がある。

接合界面の強度評価で最も困難な点は、はく離発生の起点となる接合端が応力の特異場となっており、通常の応力解析により求めた応力値そのままでは、合理的な強度評価ができないことである。^{1)~4)} 服部らは応力特異場近傍のせん断応力分布が

$$\tau = K/r^{\lambda} \quad (1)$$

で示されることに注目し、この K （応力拡大係数）と λ （特異性の指数）によって接着界面の強度評価ができることを示している。¹⁾ ここに r は接着端からの距離である。実験と計算により接着部のはく離限界線が得られた。また、実パッケージ接着端の K と λ を計算により求めれば、接合端のはく離の評価を行うことができると報告されている。さらに日本機械学会の研究協力部会の研究分科会では、ICパッケージの封止樹脂と金属の接合強度について下記のような試験が検討された。

- (1) せん断試験法²⁾
- (2) 三点曲げ法³⁾
- (3) 界面き裂の混合モードはく離試験法⁴⁾

3 マイクロはんだ接合部の寿命信頼性評価法

プロセッサやメモリなどの高集積化に伴い、パッケージの大型化、多ピン化が進んでいる。その一例として、半導体パッケージの実装形態が周辺引出し型の QFP (Quad Flat Package) から図 1 に示すエリアアレイ型の BGA (Ball Grid Array) や CSP (Chip Size Package) へと進化しつつある。また、電子機器の廃棄物から溶出する Pb が環境汚染の原因として認識され、無鉛はんだの開発とその信頼性評価の研究が注目されつつある。

これらの新しい実装技術と実装材料の寿命信頼性評価手法の確立は主に次の課題の検討より解決される。

- (1) 実装材料（はんだ）の材料特性の評価
- (2) 実装はんだ接合部の応力ひずみ評価
- (3) はんだ接合部の疲労寿命試験法と寿命評価法

3・1 エレクトロニクス実装はんだ接合部の材料と構造

ICパッケージをプリント基板に実装する場合、図 1 に示すようにはんだ継手を介して接合される。はんだ接合部は IC パッケージと基板を機械的および電氣的に接続する手段として用いられる。はんだ継手の特色は、はん

図1 BGAパッケージの構造例

だの融点が低いことにある。例えば 63%Sn～37%Pb の共晶はんだの融点は $T_m = 183^\circ\text{C}$ である。このためはんだ付け（リフロー）工程においてパッケージおよび基板等の母材に大きな損傷を与えることなく接続が可能となり、安価な樹脂系材料を用いたパッケージの使用が可能となる。

高密度化の要求に対応するため、IC パッケージは小形化かつ表面実装タイプに移行しつつある。これははんだ接合部の面積を小さくし、接合部に過酷な負担を強いる。このような点から材料、構造、プロセスの三つの観点からはんだ接合部の信頼性向上をはかる必要がある。この中で特に重要なのは基板とパッケージの熱膨張係数の差に起因する熱応力、低サイクル熱疲労およびクリープ等に対する対策である。はんだ接合部の熱疲労信頼性を評価するために、図 2 に示す熱衝撃試験を行われる場合が多い。この試験を用いてはんだ接合部に繰返し熱応力を与えることによってはんだ接合部の熱疲労寿命を評価する。

3・2 はんだの材料特性

一般に、金属材料の使用温度と融点 T_m の比（絶対温度表示）が 0.5 以上になるとクリープが発生しやすくなり、疲労信頼性に対する繰返しクリープひずみの影響を無視できなくなるとされている。はんだ材料の場合はこの比は 0.5 を大きく超えている。例えば共晶はんだの場合、この比は常温において 0.65 以上であり、極めて過酷な条件であるといえる。

はんだ材のクリープ特性については様々な構成式が提案されているが、これらの中で最も簡単なものは式 (2) に示す Norton 則である。

$$\dot{\epsilon}_c = A(\sigma)^n \quad (2)$$

ただし、 σ は Mises の相当応力で、 $\dot{\epsilon}_c$ は相当クリープひずみ速度である。共晶はんだのクリープ定数 A とクリー

図2 温度サイクルの温度履歴

ブ硬化指数 n に関する実験結果⁵⁾より、クリープ定数 A の他にクリープ硬化指数 n の温度依存性が確認できる。また、機械的特性の中でクリープ特性と同様に強い温度依存性を示す材料定数として、降伏応力が挙げられる。

3・3 はんだ接合部の非線形ひずみ評価解析

ここでは、図1に示す代表的な実装部品のはんだ接合部に生じる非線形ひずみの有限要素法解析の結果について説明する。解析の温度条件には図2に示す過負荷熱サイクル試験 (TCT) の温度履歴を用いた。

図3にはんだ接合部の非線形ひずみ集中点に生じるせん断応力とせん断非線形ひずみのヒステリシスループを示す。この解析条件でははんだ接合部に生じる非線形ひずみはほとんど温度変化時間において生じ、温度保持時間に生じるクリープひずみは小さい。熱サイクル試験においてははんだ接合部に与えられる負荷は温度変化によって生じるパッケージと基板間の線膨張ミスマッチであって、一種の強制変位モードである。はんだ材料の非常に強いクリープ挙動によって発生するはんだ接合部の非線形変形は、ほぼ温度変化と同時にパッケージと基板間の線膨張ミスマッチに追従することができ、温度変化が終了した時点でクリープ飽和に近い状態に達したため、応力緩和時間 (温度保持時間) において発生するクリープ変形は比較的小さいものであった。

しかし、以上の解析結果は加速試験 (高温は 100°C 以上、低温は -30°C 以下) に対して成り立つものであって、すべての熱サイクル問題に対して適用できるものではない。また、近年その使用が広がりつつある鉛フリーはんだに関しても同様な現象が発生していると考えている。

このように算出された非線形ひずみの履歴からはんだ接合部に生じるひずみの振幅 $\Delta\epsilon_{in}$ を求め、接合部の疲労寿命を評価するのによく用いられる。しかしながら、BGA パッケージは複雑な構造を有するため、 $\Delta\epsilon_{in}$ の算出コストが大きくなる場合も多く、設計者が簡易に信頼性を評価することが困難である。

これを解決する方法として、有限要素法を用いた2段階解析がある。構造全体のモデル (以下、全体モデル) を用いて評価する接合部分付近の変位を求め、次にその対象の接合部分付近の詳細なモデル (以下、局所モデル)

にその変位条件を境界条件として与えて、構造解析を実施する方法である。この方法では、全体解析のモデルを簡略化できる場合、特に $\Delta\epsilon_{in}$ の算出コストを小さくできるという特徴がある。

解析モデルの例として図4に示す。全体解析では、チップ端直角部のはんだパンプの上下面の相対変位 $\Delta\delta_{xy}$, $\Delta\delta_z$ を算出した。図1に示す構造に温度変化を与えると、はんだパンプに生じる相対回転 $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, $\Delta\theta_z$ は非常に小さいため、本解析ではこれらを無視した。また局所解析では、これらの相対変位などと時間の履歴を境界条件としてパンプ上下面に負荷し、相当非線形ひずみ振幅を算出した。ここでは、はんだパンプとPWB等の間に生じるローカルな線膨張係数のミスマッチを考慮するために、相対変位履歴とともに、図2に示す温度履歴を与えた。非線形ひずみははんだ接合部のコーナー点と $100\mu\text{m}$ 部の節点を省いた界面近傍節点 ($0 \sim 100\mu\text{m}$) の非線形ひずみ振幅の平均値である。

解析の結果、相当非線形ひずみ振幅値は 1.10×10^{-2} であった。一方、全体モデルから直接算出する通常解析では、相当非線形ひずみ振幅は 1.03×10^{-2} であり、2段階解析との相対誤差は 6.7% 程度であった。以上から、BGA はんだ接合部の相当非線形ひずみ振幅の算出において、2段階解析は妥当であると思われる。

3・4 はんだ接合部の疲労信頼性試験

上記したように、低融点であるはんだ材料は常温においても顕著な非線形性 (塑性あるいはクリープひずみの発生) を示しているため、熱サイクル負荷を受けるはんだ接合部に発生する力学的挙動は繰返し非線形ひずみ (塑性あるいはクリープひずみ) である。そして、この繰返しひずみは線膨張のミスマッチ (変位制御モードに近い) によって支配している。このような材料の疲労信頼性問題に関しては、バルク試験片の変位制御型疲労試験法および低サイクル疲労問題の Manson-Coffin 則に代表される評価則等が確立されている。しかし、はんだ接合部のような微小構造の低サイクル疲労信頼性に関しては、従来のバルク試験片での評価は難しい。そのため、はんだ接合部を用いて熱サイクル試験で直接に評価する方法がよく用いられている。しかし、このような評価試験の試験時間は長く (30分～1時間)、効率的な評価試験方法として、はんだ接合部を用いた機械的疲労試験方法が提案されている。^{6)～9)}

熱サイクルを受ける BGA パッケージのはんだ接合部の熱疲労破壊の最もメインなモードは変位制御でのせん

図3 せん断応力-せん断非線形ひずみの関係

図4 有限要素法解析モデル

断モードである。そのため、熱疲労寿命を評価するためにせん断型機械的疲労試験法が提案されている。

マイクロはんだ接合部のような微小構造のための信頼性評価試験機の開発は最近になって盛んになっている。そのひとつの試みは図5に示すピエゾ素子技術を利用したマイクロ構造用試験機の開発である。この試験機における変位はマインピエゾ素子によって制御されている。

さらに、この試験機の大きな特徴としては無変形ロードセルの導入である。従来の荷重計測に使用されているひずみ計測型ロードセル自体の変形は避けられない。この変形はしばしば数十 μm を超えることがあるため、マイクロ構造の試験の変位制御に対して大変厄介な存在である。図に示すピエゾ素子型試験機では荷重計測のためのロードセルたわみをなくすために、非変形荷重計測装置を取り入れた。この装置には全く同じピエゾ素子をペアで使用することによって、荷重計測用ピエゾが変形せずに、荷重の計測と出力を可能にしたものである。その結果、マイクロ構造に直接与える変位を非常に高い精度で制御できるとともに、高い負荷能力も実現できた。この試験機は約1年半の信頼性評価を経過して、ピエゾの故障、疲労などが確認されていないことから、その信頼性も検証できたといえる。この試験機の主な仕様は理論変位制御精度：0.05 μm 、最大荷重：2250Nである。

マイクロはんだ接合部のようなマイクロ構造の信頼性評価試験のもう一つの技術的な課題は破壊モードの観察である。これまでのように荷重ドロップから破壊を計測し、判断することもできるが、先に述べたように、マイクロ構造の一つの特徴として破壊の発生場所は接合界面に集中しやすいことである。そのため、疲労破壊などの発生場所あるいは破壊モードの確認はより重要な実験結果として観察する必要があると思われる。このようなマイクロ構造の破壊形態を観察しながら、疲労試験などを行う装置としてSEMと疲労試験機を組合せたものがあるが、簡単に取り扱いえないことから、汎用性が欠けている。マイクロ構造試験機とマイクロスコープと組合せた方法もよく使われている。また、最近では高倍率マイクロスコープも開発され、ますますこの方法の用途が広がりつつある。現在、マイクロはんだ接合部の疲労試

験に使用されているマイクロスコープの最大倍率（モニター上）が3000倍まで向上されている。その結果、ミクロンあるいはサブミクロンの初期き裂と欠陥が観察できるようになってきた。

3・5 疲労寿命評価則

すでに述べたように、マイクロはんだ接合部の疲労寿命の評価則を確立するために、はんだ接合部に生じる応力・ひずみを求める必要がある。機械的疲労試験を受けるBGAはんだ接合部に生じる非線形ひずみの有限要素法解析の結果から非線形ひずみ $\Delta\epsilon_{50av}$ を求め、この振幅とはんだ接合部の疲労き裂発生寿命の関係図6に示すと、低サイクル疲労の寿命評価則であるManson-Coffin則（次式）によって $\Delta\epsilon_{50av}$ と疲労寿命 N_f の関係を評価できることが分かる。

Manson-Coffin 則：

$$N_f = (\Delta\epsilon_{in}/\Delta\epsilon_0)^n$$

そして、同じ図上に熱サイクル疲労試験の結果とその試験条件で解析したはんだ接合部に生じる非線形ひずみ振幅の関係を示している。両方の結果からせん断型機械的疲労試験と熱疲労試験の結果の整合性を確認することができた。すなわち、機械的疲労試験で得られたBGAはんだ接合部の疲労寿命の評価則を用いて熱疲労寿命を評価できる可能性を示唆されている。

しかし、ここで考慮しなければならないのは、熱サイクル疲労試験結果の方が長寿命側に位置しているということである。これは、せん断型機械的疲労試験と熱サイクル疲労試験における疲労寿命として扱うサイクル数判定の仕方の違い、機械的疲労試験においてははんだバンブコーナーに約50 μm のき裂が発生したとき、熱サイクル疲労試験においてははんだ接合部が完全破断したときのサイクル数を疲労寿命としていることによるものと考えられる。したがって、このようなマイクロ接合部でもその疲労信頼性を評価するとき、疲労き裂の発生と進展を同時に取り扱う必要があると考えられる。

さらに、鉛フリーはんだ材料を用いたはんだ接合部ではしばしば接合部のはんだ側ではなく、はんだとCuランド間に生じる金属間化合物層に疲労き裂が発生してしまうケースが増えている。

図5 せん断型マイクロ構造用疲労試験機

図6 非線形ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_{in}$ と破壊サイクル N_f の関係

3・6 金属間化合物の疲労強度

ここでは Sn-Ag-Cu(Bi) 系 Pb フリーはんだ接合部のはんだと Cu パッド間に熱サイクルによって生じる金属間化合物に注目し、金属間化合物層と疲労強度の関連性を確認し、これらの相関関係を明確にした。¹⁰⁾ 使用したはんだ接合部は銅基板上に Pb フリーはんだ (95.75Sn- 3.5Ag-0.75Cu; 91.5Sn-3.5Ag-5Bi) で実装した BGA はんだ接合構造の試験片を用いた。またこれらの試験片を 120℃で 360 時間熱処理施して金属間化合物を生成させた試験片を用意した。それぞれの試験片の名称を表 1 に示す。

上記試験片の機械的疲労試験を行い、その結果を図 7 に示す。95.75Sn-3.5Ag-0.75Cu はんだの場合は熱処理を行った試験片と行っていない試験片がほぼ同一の疲労強度を持つことが分かる。また、91.5Sn-3.5Ag-5Bi はんだの場合は熱処理を行った試験片の方が疲労強度は低下した。これらのことについて検証するためにき裂の観察を行った。

95.75Sn-3.5Ag-0.75Cu の B1, B2 と 91.5Sn-3.5Ag-5Bi の C1 については、き裂がはんだと Cu パッドの界面に発生するものとはんだから発生するものがあつた。しかし、91.5Sn-3.5Ag-5Bi の C2 ははんだと金属間化合物の界面からき裂が発生し素早く進展していたことが分かった。このことから、Bi を含有するはんだ材は熱処理を行うことによって Cu パッドとはんだの間に金属間化合物層が生成され、その金属間化合物層とはんだの界面にき裂が発生しやすくなることが分かった。このことにより疲労強度の低下を招いたのではないかと考えられる。このようなき裂の発生モードが変化する場合のはんだ接合部の疲労寿命の評価則も新たに検討する必要があると思われる。

4 結 言

本稿では、電子部品の実装技術における信頼性問題について具体的な事例を用いて説明してきた。上記信頼性問題を評価し、適切な対策を取る必要がある。しかしながら、この分野での技術は日進月歩の速さで進んでいるため、これからの予測される新たな信頼性に関する技術的な問題を対処するために、未だに確立されていない次のような信頼性評価手法と技術について検討する必要がある。また、新材料および新規実装技術開発周期の短縮化によって、評価試験および解析手法の省力化あるいは標準化などを検討する必要がある。

(1) 微細構造 (50 μ m ~ 1mm) の材料特性 (温度依存性、非線形性) の標準計測手法

(2) マイクロ接合部の組成材料 (薄膜、メッキなど) の材料特性の標準計測技術

表 1 試験片のタイプ

	熱処理なし	熱処理あり
Sn-3.5Ag-0.75Cu	B1	B2
Sn-3.5Ag-5Bi	C1	C2

▲ Sn-3.5Ag-0.75Cu (B1) △ 熱処理 Sn-3.5Ag-0.75Cu (B2)
● Sn-3.5Ag-5Bi (C1) ○ 熱処理 Sn-3.5Ag-5Bi (C2)

図 7 非線形ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_{in}$ と破壊サイクル N_f の関係

(3) 複合構造である多層基板の材料特性の標準評価手法 (解析あるいは実験による評価)

(4) 材料の非線形性 (温度依存性、粘弾性、弾塑性、クリープなど) を考慮した界面はく離強度の評価法

(5) 材料の不均質 (結晶粒子の不均質など) を考慮した接合部の疲労強度評価法

(6) マイクロ金属接合部 (はんだ接合部) の金属間化合物の成分を考慮した界面の疲労寿命評価と強度評価法

(7) マイクロ接合部の衝撃強度の評価手法

(8) マイクロ接合部の振動特性とその強度信頼性評価手法

(9) 構造の複雑化および小型化による強度信頼性のばらつきの拡大に対する評価手法の確立 (確率的な信頼性評価手法の導入と確立)

参 考 文 献

- 1) 服部敏雄, 坂田莊司, 初田俊雄, 村上 元, 日本機械学会論文集, A-54, 499 (1988).
- 2) 川村法靖, 広畑賢治, 川上 崇, 澤田佳奈子, 三野利一, 黒須 篤, 高野英治, Y. H. Yeoul, 回路実装学会誌, 12, No.6, 429 (1997).
- 3) 西村朝雄, 広瀬 閔, 田中直敬, 日本機械学会論文集, A-59, 620 (1993).
- 4) 池田 徹, 宮崎則幸, 日本機械学会研究協力部会, RC128 電子デバイス/電子機器の強度・信頼性評価に関する研究分科会研究報告書, 187 (1996).
- 5) 向井 稔, 川上 崇, 遠藤徹也, 高橋浩之, 日本機械学会, 第 4 回計算力学講演論文集, No.910-79, 223 (1991).
- 6) 北野 誠, 河合末男, 清水一男, 日本機械学会論文集, A-56, 1140 (1990).
- 7) 于 強, 白鳥正樹, 王 樹波, 金子誠史, 石原達也, 日本機械学会論文集, A-64, 551 (1998).
- 8) 于 強, 白鳥正樹, 金子誠史, 石原達也, 王 樹波, 日本機械学会論文集, A-64, 558 (1998).
- 9) 于 強, 白鳥正樹, エレクトロニクス実装学会誌, 1, 278 (1998).
- 10) 于 強, 白鳥正樹, 金 道燮, 第 9 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, 345 (1999).