BGAパッケージはんだ接合部の疲労強度評価

海老原 理徳*, 小俣 宣行**, 茂木 正徳***, 中村 直樹***, 酒井 秀久***

Fatigue Strength Evaluation of BGA Package Solder Joints

Yoshinori EBIHARA*, Nobuyuki OMATA**, Masanori MOTEGI***, Naoki NAKAMURA*** and Hidehisa SAKAI***

*東京学芸大学第4部（〒184-0015 東京都小金井市貫井北町4-1-1）

**東京学芸大学大学院（〒184-0015 東京都小金井市貫井北町4-1-1）

***富士通株式会社テクノロジー本部（〒211-0053 神奈川県川崎市中原区上小田中1015）

*4th Division, Tokyo Gakugei Univ. (4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-0015)

**Graduate School, Tokyo Gakugei Univ. (4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-0015)

***Technology Group, Fujitsu Ltd. (1015 Kamiodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-0053)

概要 携帯電子機器の普及に伴い、実装基板の繰り返しそり変形に起因するBGAはんだ接合部の強度信頼性評価が重要な課題となっている。本研究では、実装基板に繰り返しそり変形を与えてBGAはんだ接合部の機械的疲労試験を行うとともに、有限要素法を用いて応力・ひずみ解析を行い、BGAはんだ接合部の疲労強度評価則を検討した。その結果、基板が繰り返しそり変形を受けるBGAはんだ接合部の疲労強度は、ひずみが集中するはんだ部の相当塑性ひずみ範囲をパラメータとするManson-Coffin則を用いて良好に評価できることを示し、その疲労強度評価式を決定した。

Abstract

Fatigue strength evaluation of BGA solder joints under cyclic bending of printed circuit boards was studied. Mechanical fatigue tests of BGA solder joints by cyclic bending of printed circuit boards were done. In addition, stress-strain analysis of BGA solder joints using finite element method was made and fatigue strength evaluation law was studied. As a result, it was shown that fatigue strength of BGA solder joints under cyclic bending of printed circuit boards, was evaluated well by Manson-Coffin's law using equivalent plastic strain range as fatigue parameters. Finally the fatigue strength evaluation equation was determined.

Key Words: Ball Grid Array Package, Solder Joint, Fatigue, Printed Circuit Board, Bending

1. 緒言

ICパッケージの高密度化の流れの中でBall Grid Arrayパッケージ（以下BGA）が注目されている。BGAは格子状に並んだ微小なはんだバンプによってプリント回路板に接合されることから、QFPに比べてピッチを微細化せずに多ピン化が容易であり、高実装精度を必要としないなどの利点を有する。ところがBGAはんだ接合部では、周期的な温度環境下において、パッケージ基板、Siチップ、プリント配線板の線膨張係数の違いに基づく変位のミスマッチにより周期的な熱応力がはんだ接合部に加わり、疲労破壊が生じる。したがってBGAパッケージの設計では、はんだ接合部の熱疲労強度評価が重要な検討課題の1つであり、この問題に関して多くの研究が行われている¹⁾²⁾。

一方、携帯電話やノートパソコンなどの携帯電子機器の普及に伴い、その携帯移動時の曲げなどによる繰り返し変形に起因する各部の疲労破壊に関する問題が注目されている。BGAはんだ接合部においても、他の電子部品はんだ接合部と同様に、実装基板の繰り返しそり変形に起因する

疲労破壊が生じ、その強度信頼性評価が重要な課題となっている。ところが実装基板の繰り返しそり変形に起因するBGAはんだ接合部の疲労強度評価に関する研究は非常に少ないのが現状である。

そこで本研究では、実装基板に繰り返しそり変形を与えてBGAはんだ接合部の機械的疲労試験を行い、破断までの寿命を測定するとともに、疲労試験に対応した有限要素法による応力・ひずみ解析を行い、BGAはんだ接合部の疲労強度評価則を検討し、疲労強度評価式を求めた。

2. 機械的疲労試験

実装基板に繰り返しそり変形を与えてBGAはんだ接合部の機械的疲労試験を行った。疲労試験に用いた試験片の形状と寸法を図1に、BGAパッケージの形状と寸法を図2に、はんだバンプ部の拡大図を図3にそれぞれ示す。試験片はBGAパッケージを15行15列225個の格子状のはんだバンプを用いてプリント回路板の片面中央にはんだ付けしたものである。実装に用いたはんだ材は共晶はんだ(63Sn-37Pb)である。プリント回路板はFR-4製で、板厚が0.5mm

図1. 試験片の形状と寸法

図2. BGAパッケージの形状と寸法

のものと1.6mmのものの2種類を用いた。パッケージ基板材料はBTレジンである。

次に、機械的疲労試験の概略を図4に示す。疲労試験は図4で、プリント回路板の長手方向の両端をスパン100mmで支持し、プリント回路板の中心をBGAが実装された面の裏側から引張試験機に取り付けた治具を用いて周期的に押すことにより行った。基板中心におけるたわみと経過時間の関係を図5に示す。図5で治具の上下速度は2 mm/sec一定とし、最大たわみを変えた5つの負荷条件を用いて疲労試験を行った。引張試験機はINSTRON製5567を用いた。

はんだ接合部における破断の発生は電気的な導通チェックにより調べた。疲労試験後のはんだバンプ断面の例を図6に示す。図6からき裂は図の右下、はんだバンプとプリント回路板の界面端近傍のはんだ側から発生していること

図3. はんだバンプ部の拡大図

図4. 機械的疲労試験

図5. 基板中心のたわみと時間の関係

図6. 疲労試験後のはんだバンプ断面の例

がわかる。疲労試験から得られた破断発生までの疲労寿命を表1に示す。

3. BGAはんだ接合部の応力・ひずみ解析

解析は全体解析と詳細解析の2段階に分けて行った。まず全体解析として、試験片全体を解析対象として機械的疲労試験に対応した3次元弾性解析を行い、基板各部の変位とはんだバンプに生じるひずみを求めた。次に、全体解析で相当ひずみが最大になったのはんだバンプ1個分とその周

表1. 疲労試験結果

試験	プリント回路板の厚さ [mm]	最大たわみ [mm]	疲労寿命 [サイクル]
case1	0.5	5	2013
case2	0.5	8	358
case3	0.5	10	71
case4	1.6	4	168
case5	1.6	6	58

辺の基板を解析対象として詳細解析モデルを作成し、全体解析で求めた基板の変位を強制変位として与え、はんだのみ塑性を考慮して3次元弾塑性解析を行った。これらの解析からはんだバンプに生じる相当塑性ひずみ範囲を求めた。解析には汎用有限要素法解析コードMARCを用いた。

3.1 全体解析

試験片全体を解析対象とし、すべての材料を弾性体と仮定して3次元弾性解析を行った。本解析は、ひずみが集中するはんだバンプ周辺の基板の変位を求めることが目的であるため、使用計算機的能力を考慮し、はんだを弾性体と仮定して解析を行った。また同様の理由でSiチップを省略してモデル化した。解析に使用した材料定数を表2に示す。

解析は対称性を考慮して全体の4分の1について行った。プリント回路板、パッケージ基板およびモールド樹脂は4節点線形シェル要素、はんだバンプは2節点3次元弾性はり要素を用いてモデル化した。全体解析の要素分割図を図7に、はんだバンプ周辺の要素分割拡大図を図8にそれぞれ示す。図7で、点Oがプリント回路板の中心、辺OA、OCが対象軸、O'DEFはパッケージ基板である。辺OA上の節点についてはy軸方向変位とx軸およびz軸回りの回転角を、辺OC上の節点についてはx軸方向変位とy軸およびz軸回りの回転角をそれぞれ拘束した。辺ABはz軸方向変位を拘束した。解析では点O近傍の節点に時間の経過に合わせて強制変位を与え、疲労試験をモデル化した。

シェル要素によるモデル化では、厳密には解析対象の板厚の中立面がシェル要素の存在する面となるようにモデル化すべきところである。しかし今回の解析ではシェルの理論に忠実にモデル化しようとする、解析対象の形状から基板の板厚の分だけのはんだバンプの高さが増えてしまう。本解析においては基板よりも疲労破壊が発生するはんだを重視してモデル化すべきだと考えた。そこで基板をシェル要素でモデル化するにあたっては、パッケージ基板、プリ

図7. 全体解析の要素分割図

図8. はんだバンプ周辺の要素分割拡大図

ント回路板ともに、はんだ接合側の表面の位置でモデル化し、はんだバンプの高さを忠実に表現するようにした。また、パッケージ基板にモールド樹脂が重なっている部分は、シェル要素を複層に配置した。すなわち同一面上に節点を共有するシェル要素を二重定義することによりモデル化した。

はんだバンプはその形状を3次的にモデル化することが望ましいが、使用計算機的能力の点からはり要素でモデル化することを検討した。まず図2に示す225個のはんだバンプの代わりに、図9に示すように基板中心および最も外側のはんだバンプ計9個に数を減らした簡易解析モデルを考え、はんだバンプを8節点アイソパラメトリック立体要素、他は4節点線形シェル要素を用いてモデル化した。

図9. 簡易解析のはんだバンプ位置

表2. 解析に使用した材料定数（室温）

材料	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
FR-4	1.82×10^4	0.19
モールド樹脂	1.55×10^4	0.25
BTレジン	1.90×10^4	0.20
はんだ	3.86×10^3	0.37

図10. 立体要素を用いた簡易解析モデルのはんだバンプ周辺の要素分割図

簡易解析モデルのはんだバンプ周辺の要素分割図を図10に示す。この簡易解析モデルの基板中心部に図5に示す強制変位を与えて弾性解析を行った。解析の結果、はんだバンプ周辺の基板の変位は各節点のz軸方向変位が支配的で、x軸方向およびy軸方向変位はきわめて微小であることがわかった。次にはんだバンプを直径0.6mmの3次元弾性はり要素でモデル化した簡易解析モデルを用い、同様な解析を行った。この結果を立体要素を用いた解析結果と、詳細解析で強制変位を与えた基板節点のz軸方向変位と比較した。その結果、両者の差は5%未満であった。以上の点から全体解析でははんだバンプをはり要素でモデル化することが十分可能であると判断し、直径0.6mmの3次元弾性はり要素でモデル化した。

全体解析の結果から、BGAパッケージの最も外側の角部のはんだバンプにおいて相当ひずみが最大となることがわかった。

3.2 はんだバンプ部の詳細解析

全体解析で、相当ひずみが最大になったのはんだバンプ1個分とその周辺の基板を解析対象として詳細解析を行った。詳細解析の要素分割図を図11に示す。使用した要素は8節点アイソパラメトリック立体要素である。詳細解析モデルでは、ひずみが集中すると予想される領域を特に細かく要素分割した。

図11. 詳細解析の要素分割図

図12. はんだの応力-ひずみ関係

図13. はんだバンプ部の相当塑性ひずみの分布

材料物性値は全体解析と同じであるが、はんだについては塑性を考慮した。はんだの応力-ひずみ関係は、引張試験で求めた応力-ひずみ曲線を多直線近似して用いた。引張試験は温度20℃、ひずみ速度 2.08×10^{-4} (/sec)で行った。解析に用いたのはんだの応力-ひずみ関係を図12に示す。

解析は、図11でプリント回路板とパッケージ基板のそれぞれはんだが接合されている面上の最も外側の節点8個、計16個の節点に対し、全体解析で求めた変位のx, y, z方向成分を強制変位として与えて行った。

詳細解析で求めたのはんだバンプ部の相当塑性ひずみの分布を図13に示す。図13から相当塑性ひずみははんだバンプ右下のはんだ接合界面端近傍のはんだ側で最大になっている。この位置は疲労試験のき裂発生位置と一致する。

4. 疲労強度評価

はんだ接合部の疲労強度を相当塑性ひずみ範囲をパラメータとするManson-Coffin則で評価することを検討した^{3)~7)}。相当塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{pcq}$ は1負荷サイクルにおける最大相当塑性ひずみと最小相当塑性ひずみの差として定義される。また、相当塑性ひずみ ϵ_{pcq} は相当塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{pcq}$ をひずみ経路に沿って積分した値で、次式で評価される⁸⁾。

$$\epsilon_{pcq} = \int d\epsilon_{pcq} \quad (1)$$

$$d\epsilon_{pcq} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[d\epsilon_{px}^2 + d\epsilon_{py}^2 + d\epsilon_{pz}^2 + 2 \left(d\gamma_{pxy}^2 + d\gamma_{pyz}^2 + d\gamma_{pzx}^2 \right) \right]} \quad (2)$$

図14. 相当塑性ひずみ範囲と疲労寿命の関係

そこで相当塑性ひずみが最も集中するはんだ表面の点から内部にはんだの3結晶粒分、50 μ m入った点で相当塑性ひずみ範囲を求めた⁹⁾。はんだ表面から50 μ m内部に入った点を評価点としたのは、応力およびひずみの解析結果に対するはんだ接合界面端近傍の要素分割による影響を軽減するためである。

相当塑性ひずみ範囲と疲労寿命の関係を図14に示す。図14に示すように、相当塑性ひずみ範囲と疲労寿命の関係は一つの直線で比較的よく近似され、相当塑性ひずみ範囲をパラメータとするManson-Coffin則で良好に評価できることがわかった。図14の近似直線から、以下の疲労強度評価式が得られた。

$$N_f = 0.185 \times \Delta \varepsilon_{peq}^{-2.027} \quad (3)$$

5. 結 言

本研究では、実装基板に繰り返しそり変形を与えてBGAはんだ接合部の機械的疲労試験を行うとともに、有限要素法を用いて応力・ひずみ解析を行い、BGAはんだ接合部の疲労強度評価則を検討した。

その結果、基板が繰り返しそり変形を受けるBGAはんだ接合部の疲労強度は、ひずみが集中するはんだ部の相当塑性ひずみ範囲をパラメータとするManson-Coffin則を用いて良好に評価できることを示し、その疲労強度評価式を決定した。

(1997.7.22-受理 1997.11.10-再受理)

文 献

- 1) 海老原理徳：“BGAパッケージはんだ接合部の熱疲労強度評価”，回路実装学会誌，Vol.10，No.6，pp.394-400 (1995)。
- 2) 于強，白鳥正樹：“マイクロエレクトロニックパッケージはんだ接合部のクリープ／低サイクル疲労強度評価”，日本機械学会研究協力部会RC-128「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」報告書，pp.245-340 (1996)。
- 3) 北野誠，河合末男，清水一男：“面付実装形ICパッケージはんだ接合部の熱疲労強度評価”，日本機械学会論文集，56巻525号，A，pp.1140-1147 (1990)。
- 4) J.H.Lau, D.W.Rice and S.Erasmus：“Thermal Fatigue Life of 256-pin, 0.4mm Pitch Plastic Quad Flat Pack (QFP) Solder Joints”，Proceeding of the 1992 Joint ASME/JSME Conference on Electronic Packaging, Advances in Electronic Packaging, pp.855-863 (1992)。
- 5) M.Shiratori, Q.Yu and S.Wang：“A Computational and Experimental Hybrid Approach to Creep-Fatigue Behavior of Surface-Mounted Solder Joints”，Proceeding of the International Intersociety Electronic Packaging Conference, EEP-Vol.10-1, Advances in Electronic Packaging, pp.451-457 (1995)。
- 6) 熊沢鉄雄，河野竜治，北野誠，木本良輔：“はんだボール接合部の疲労寿命の検討”，第9回回路実装学術講演大会講演論文集，pp.103-104 (1995)。
- 7) Y.Ebihara, K.Nakane and S.Cai：“Fatigue Life Prediction of BGA Solder Joints under Thermal Cyclic Loads”，Proceeding of the 5th International Conference on Computational Engineering Science, Hawaii, pp.628-633 (1995)。
- 8) 益田森治，室田忠雄：“改訂工業塑性力学”，養賢堂，p.123 (1993)。
- 9) 海老原理徳，小俣宣行：“BGAパッケージはんだ接合部の熱疲労強度解析”，日本機械学会第9回計算力学講演会講演論文集，pp.509-510 (1996)。