AlベースBGAはんだボール接合部の疲労寿命評価

石川 浩嗣*, 于 強**, 白鳥 正樹**

Fatigue Life Evaluation of Al-Base BGA Solder Ball Joints

Kouji ISHIKAWA*, Qiang YU** and Masaki SHIRATORI**

* 日本発条株式会社研究開発本部（〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦3-10）

** 横浜国立大学工学部（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

* Research & Development Department, NHK Spring Co., Ltd. (3-10 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 236-0004)

** Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Yokohama National University (79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

Abstract

Al-Base BGA shows large bending behavior under thermal cycling. Therefore, it is important to evaluate the fatigue life of Al-Base BGA solder ball joints. The thermal cycle tests were carried out to confirm the fatigue life of solder ball joints. In addition, the mechanical fatigue tests using three-point bending method were carried out and compared with the thermal fatigue tests. On the other hand, equivalent inelastic strain range was estimated by stress-strain analysis of finite element method. The equation of fatigue life evaluation of Al-Base BGA solder ball joints was determined using Coffin-Manson's law.

Key Words: Ball Grid Array Package, Al, Bending, Solder Joint, Reliability, Fatigue

1. はじめに

電子機器の小型軽量化、高性能化に伴い、半導体パッケージの多ピン化が進み、BGA(Ball Grid Array)の使用が増えつつある。また、LSIチップの消費電力は増大する傾向にあり、その放熱性も重要視されている。

この流れから、金属をベースプレートとして利用したメタルベースBGAが注目されている。特に金属にAl（アルミニウム）を採用したAlベースBGAは、Al板とサブストレータ（プリント配線板；ガラスエポキシ基材FR4）を貼り合わせた単純構造のBGAであり、高放熱で軽量という特徴を有している（Fig.1）。

Alは非常に軽量で熱伝導性に優れ、安価な材料だが、SiやFR4と比較して熱膨張率が大きい（Table 1）。そのため、Alをメタルベースに採用した本構造では、熱負荷が加わった場合に、Alベースとサブストレータの接着部に熱的

不整合が発生するとともに、それに起因する反り変形がBGA自体に生じる。よって疲労強度、応力緩和性などに関して十分な信頼性評価を実施する必要がある。

さらにマザーボードに実装された後に温度サイクルのような繰り返し熱負荷を受けると、上記反り変形によりBGAとマザーボード間のはんだボール接合部、特に変形量の大きいBGA外周の接合部に応力が集中する。その結果、はんだボールのクラック、さらにはボール破断による導通不良が発生する。よって、AlベースBGAの挙動を把握し、はんだ接合部の疲労寿命評価方法を確立することは重要な課題である。

そこで、著者らはまずマザーボードへ実装したAlベースBGAに関して熱疲労試験を実施し、はんだボール接合部の疲労寿命を確認した。次に、疲労試験時間の短縮化と

Fig.1 Structure of Al-Base BGA

Table 1. Material Properties

Material	Thermal Coef. (ppm/K)	Thermal Conduct. (W/m·K)	Density (g/cm ³)
Al	21~23	240	2.7
Cu	16	390	8.9
Kovar	4.4	17	8.3
Al ₂ O ₃	7	20	3.8
FR4	14~16	0.2	1.6
Si	3.5	150	2.3

して機械的疲労試験を3点曲げ方式にて実施し、熱疲労試験との整合性を調査した。さらに、設計段階においてはんだボール接合部の疲労寿命予測を可能にするために、疲労試験によって得られる疲労寿命と、FEM(Finite Element Method)による応力ひずみ解析によって得られるひずみ振幅の関係を調べ、AlベースBGAの疲労寿命評価則を導いた。

2. 熱疲労試験

試験片はFig. 1に示した構造のAlベースBGAで、外形サイズ25, 27, 30, 35, 38mm角を用意した。はんだボール接合部数は外形サイズ27mm角の場合で256ピン、38mm角の場合で552ピンになる。パッケージ厚さはすべてAlベースが0.5mm、サブストレート0.5mmである。また、はんだボールランド径は $\phi 0.55\text{mm}$ で、 $\phi 0.70\text{mm}$ のSn63Pb37共晶はんだボールによりリフローによってバンプを形成した。実装したマザーボードは70mm角、厚さ1.5mmのFR4であり、パッケージの実装高さは1.5mm程度になる。なお、ワイヤボンディングパッド部ですべてのはんだボール接合部を短絡させている。

試験条件をTable 2に示す。3条件の温度レンジを設定し、保持時間、昇降温時間は一定とした。不良判定は、はんだ接合部が破断し導通がオープンになった場合、および配線パターンを含めたはんだボール接合部間の抵抗値変化率が10%以上になった時点とし、不良が確認されなかった最終サイクルをBGAの寿命とした。また、目標とした疲労寿命サイクル数は、BGAの搭載機器や使用環境によっても異なるが、ここでは500cycleとして寿命評価を行った。

Fig. 2に外形サイズ27mm角と38mm角のAlベースBGAの熱疲労試験結果をワイブルプロットしたものを示す。27mm角BGAでは、最も厳しい試験条件Aでも断線開始が1000cycle、一般的に寿命の評価基準として多用されている0.1%不良時で700cycle程度であり、実用レベルの信頼性があることを確認できた。また、断線は全試験片が外周コーナ部(四隅)のはんだボール破断であり、他の接合部で断線不良が生じることはなかった。

また、38mm角BGAは最も厳しい試験条件Aで500cycleから断線が発生し、0.1%不良時寿命は約350cycleである。目標サイクルを達成するには構造の再検討、部材の変更などが必要であることがわかった。これに関しては5章で詳述する。

Table 2. Thermal Fatigue Test Conditions

	Max./Min. Temp.(°C)	Range of Temp.(°C)	Holding Time (min)	Rise/Fall Time(min)
A	125/-40	165	15	3
B	100/-40	140		
C	90/-25	115

Fig.2 Results of Thermal Fatigue Test

3. 機械的疲労試験

熱疲労試験は500cycleでも約300Hrもの長時間を必要とすることから、試験時間の短縮を図るため機械的疲労試験を実施した。これまでの研究により、はんだ材の材料特性および温度依存性、ひずみ速度の影響などを考慮してはんだ接合部の非線形ひずみ振幅を評価することができれば、BGAのはんだボール接合部やリード型はんだ接合部などの熱疲労試験による疲労寿命評価は、機械的疲労試験で代用可能であるとの結論が得られている^{1),2)}。ただし、剪断変形と併せて反り変形を含めた方法での機械的疲労試験については確立されたデータ報告がなされていない。そこで著者らはAlベースBGAの反り変形を考慮するために3点曲げ方式で機械的疲労試験を行い、熱疲労試験との整合性を確認することにした。

著者らが実施した3点曲げ方式の機械的疲労試験の利点のひとつは剪断変位を与える試験と比較して、振幅を大きくとれることである。剪断変位入力の場合、与える強制変位振幅は数 μm ～数十 μm だが、3点曲げ方式では100 μm 以上の大きな変位を与えることが可能である。このため、クラック発生を観察が容易になり、試験機の変位制御にも余裕ができるため試験データの信頼性が向上する。

また、入力荷重も小さく抑えられるので(約1/3)、パッケージを小さく切り出したり、はんだボール接合部数を減らすなどの加工をBGAに施すことなくパッケージ全体で評価することができる。よって試験が単純化され、試験準備時間を短縮することが可能になり、試験データの信頼性も向上させることができる。

3点曲げ方式の機械的疲労試験方法の概略をFig. 3に示す。マザーボード両端部を固定し、パッケージ中心裏面から0.2Hzの三角波で一定の強制変位を与えた。固定両端間の距離は27mm角BGAの場合で40mmである。試験片は熱疲労試験の場合と同様であるが、実装するマザーボードの側面2辺は、はんだ接合部を観察を容易にするためにBGAと同じサイズまで切断した。不良判定はマイクロス

Fig.3 Three-Point Bending Mechanical Fatigue Test

コープではんだ接合部を観察し、発生したクラックの長さが起点から50μmに達した時点とした。

試験では与える強制変位を変化させて、100cycle程度の短寿命から10000cycle程度の長寿命まで幅広くデータを求めた。27mm角BGAの疲労試験結果として、与えた強制変位（全振幅）とそのときの疲労破壊サイクル数をTable 3に、はんだボール接合部および発生したクラックの拡大写真をFig. 4に示す。クラックがボール接合部端部から発生し、はんだ内部へ成長しているのがわかる。

Table 3. Results of Mechanical Fatigue Test

2δ (μm)	Nf
100	9000
110	3400
115	2400
118	1300
120	850
130	700
150	270
200	230

4. FEM解析

熱疲労試験および機械的疲労試験に対応する形でFEMによる応力ひずみ解析を行った。Fig. 5に解析モデル概略を示す。FEM解析コードABAQUSおよびMARCを用いて2次元平面ひずみ要素を使用し、弾塑性クリープ解析を実施した（なお機械的疲労試験に関しては弾塑性挙動のみを考慮している）。入力した物性をTable 4に示す。はんだ材は融点が高いため、クリープの影響を無視できない。ここでははんだの材料特性としてクリープ特性を次式のNorton則の形で考慮した。

$$\dot{\epsilon}_c = A \cdot \sigma^n \quad (1)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}_c$ は相当クリープひずみ速度、 σ はMisesの相当応力である。クリープ定数Aとクリープ硬化指数nに関しては、向井らの報告³⁾により温度依存性があることがわかっている。また、降伏応力の温度依存性に関して、次式のような結果が報告されており⁴⁾、クリープ特性と同様に考慮した。

$$\sigma_y(T) = 101.6 - 0.227 \times T \text{ [K] MPa} \quad (2)$$

Fig.5 FEM Model of Al-Base BGA

Table 4. Material Properties

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Coef. (ppm/K)
Al	73.5	0.345	23.0
Sn63Pb37	20.0	0.388	24.7
FR4	11.0	0.150	15.0

Fig.4 Cross Section Views of Solder Ball Joint after Mechanical Fatigue Test

Fig.6 Result of FEM Analysis of Solder Ball Joint

解析は5 cycle程度行い、1 cycleあたりに生じるはんだボール接合部の相当非線形ひずみ振幅を求めた。最も応力集中のあったはんだボール接合部の相当非線形ひずみの分布をFig.6に示す。機械的疲労試験において観察されたクラック発生位置と応力集中位置は一致していることから、ひずみ評価を応力集中部からはんだ内部50 μ mの位置で行うことにした。

次に、熱疲労試験および機械的疲労試験の相当非線形ひずみの履歴の比較をFig.7, Fig.8に示す。熱疲労試験の履歴は27mm角BGAで試験条件A ($-40^{\circ}\text{C}/15\text{min} \leftrightarrow 125^{\circ}\text{C}/15\text{min}$)の熱負荷を加えた場合、機械的疲労試験の履歴は強制変位200 μ m与えた場合のものである。両試験とも剪断(xy)方向成分に加えて、反り(yy)方向成分のひずみも生じており、反り変形の影響が大きいことがうかがえる。3点曲げ方式の機械的疲労試験では、剪断変形のみを

Fig.9 Relation between $\Delta\epsilon_m$ and N_f

与える場合では発生しないyy方向成分のひずみを発生させることが可能であり、AlベースBGAのように反り変形の挙動を示す場合には有効であることがわかった。

5. 疲労寿命評価

Fig.9に、熱疲労試験と機械的疲労試験から得られた疲労寿命結果 N_f とFEMによる応力ひずみ解析によって得られた相当非線形ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_m$ の関係を示す。両者は直線関係にあり、図で示すように最小二乗法で直線近似することができる(ただし直線は熱疲労試験データのみで作成)。

すなわち、繰り返し反り変形を受けるAlベースBGAのはんだボール接合部の疲労強度は、相当非線形ひずみ振幅に基づいて整理することでCoffin-Manson則⁹⁾によって評価することが可能であるといえる。よってAlベースBGAのはんだボール接合部の疲労寿命評価則は次式によって表すことができる。

a) Total Strain

b) Components of Strain

Fig.7 Hysteresis of Equivalent Inelastic Strain in Thermal Fatigue Test

a) Total Strain

b) Components of Strain

Fig.8 Hysteresis of Equivalent Inelastic Strain in Mechanical Fatigue Test

$$Nf=0.173\Delta\epsilon_m^{-1.687} \quad (3)$$

パッケージの材料物性を正確に把握し、応力ひずみ解析を行って相当非線形ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_m$ を求めることができれば、上式によりAlベースBGAの疲労寿命 Nf を設計段階で予測することが可能になる。

また、機械的疲労試験の結果もほぼ熱疲労試験結果と一致しており、加速試験として有効と判断できる。応力ひずみ解析結果では熱疲労試験と機械的疲労試験において、ひずみのxy成分とyy成分の比率は正確には一致していない。しかし、相当ひずみの考え方をを用いCoffin-Manson則を適用して評価可能であることが明らかになったため、ひずみ成分の比率を議論することなく、外周部に応力集中が生じるはんだ接合部の評価に、3点曲げ式の機械的疲労試験を適用できると考えられる。

さて前述したように、38mm角BGAの試験条件Aにおける熱疲労寿命 Nf は疲労寿命目標の500cycleに到達していなかった。そこで、応力ひずみ解析を行い、疲労寿命評価則を参考に構造の再検討を行った。パッケージ部材の材質、サブストレートの設計変更をしない条件でFEM解析を行ったところ、Alベースの外形サイズのみを38mm角から30mm角に縮小することで $\Delta\epsilon_m$ が0.006になり、疲労寿命評価則から Nf はおおよそ1000cycleと推定できた。

実際に試験片を作成して熱疲労試験を実施し疲労寿命の確認を行った。その結果のワイブルプロットをFig.10に示す。疲労寿命は大幅に向上し、0.1%不良時で約1100cycleの疲労寿命であった。疲労寿命評価則から推定される寿命とはほぼ一致する結果を得ることができ、設計段階での疲労寿命予測が可能であることを確認できた。

6. まとめ

AlベースBGAのはんだボール接合部について、熱疲労試験、機械的疲労試験および、FEMによる応力ひずみ解析を行って疲労寿命を評価した。

- 1) AlベースBGA のように熱変位が大きく、反り変形の挙動を示す構造でも十分な実装信頼性が得られることを確認できた。
- 2) 応力ひずみ解析から得られる相当非線形ひずみ振幅を用いて疲労強度を評価することで、AlベースBGAのはんだボール接合部はCoffin-Manson則に従い疲労寿命評価が可能である。
- 3) AlベースBGAのはんだボール接合部の疲労寿命評価則を求め、設計段階での疲労寿命予測が可能である

Fig.10 Results of Thermal Fatigue Test

ことを確認した。

- 4) AlベースBGAの3点曲げ式の機械的疲労試験の結果は、熱疲労試験の結果とはほぼ一致する。反り変形を有するパッケージのはんだボール接合部の疲労強度評価には有効である（試験時間は約1/100に短縮）。

本論文では、AlベースBGAのはんだボール接合部の疲労寿命への、外形サイズの影響を調べたが、はんだボール接合部形状やベース材や接着層の板厚・材質などを変更した場合の効果を捉えていない。今後は以上を考慮して試験片数を増やし、疲労寿命評価則の信頼性の向上に努めたい。

(1998.7.23-受理 1998.9.24-再受理)

文 献

- 1) 于 強, 白鳥正樹: “表面実装はんだ接合部の強度信頼性評価”, 回路実装学会誌, Vol.12, No.6, pp.384-390 (1997).
- 2) 于 強, 白鳥正樹: “マイクロエレクトロニクス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) 向井 稔, 他: “ICパッケージ半田接合部の弾クリープ解析と疲労寿命”, 日本機械学会 [No.910-79], 第4回計算力学講演論文集, pp.223-224 (1991).
- 4) T.Y.Pan: “Thermal Cycling Induced Plastic Deformation in Solder Joints-Part 1: Accumulated Deformation in Surface Mount Joints”, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol.113, pp.8-15 (1991).
- 5) S.S.Manson: “Interfaces between Fatigue, Creep, and Fracture”, International Journal of Fracture Mechanics, Vol.2, No.1, pp.327-363 (1966).