707 多ピン化 BGA パッケージ鉛フリーはんだ接合部の熱疲労寿命簡易評価

Approximate Estimation of Thermal Fatigue Life for Lead-Free Solder Joints in High Multi-Bumped BGA package

正 于 強 (横国大)
○学 坂 入 慎 (横国大院)

正 白鳥正樹 (横国大)

Qiang YU*, Masaki SHIRATORI*, Makoto SAKAIRI*
Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi Kanagawa 240-8501 *

Key Words: BGA Package, Total Equivalent Inelastic Strain Range, Fatigue Life, FEM, Relative Displacement

1. はじめに

エレクトロニクス機器の発展の動向は小型化、高集積化および高機能化であり、この要求を満たすためにエレクトロニクス実装に対して高度な技術開発が求められるようになってきた。それに伴い最近では、実装方式に BGA(Ball Grid Array)方式や CSP(Chip Size Package)方式を取り入れるようになってきており、多ピン化が進んできている。

既に、共晶はんだなどのはんだ接合部の熱疲労寿命 N_f は次式の Manson- Coffin 則によって評価できることが明らかになっている。

$$N_f = (\Delta \varepsilon_{in} / \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

ただし、 ε_0 と n ははんだの材料特性で、 $\Delta \varepsilon_{in}$ ははんだ接合部に生じる相当非線形ひずみ振幅である。

実装 BGA アセンブリのはんだ接合部の熱疲労寿命を評価するためには、まずそのはんだ接合部の非線形ひずみを正確に評価する必要がある。BGA パッケージは非常に複雑な構造を有するため、そのはんだ接合部に生じる非線形ひずみを求める際に、FEM による二段階解析の手法がよく使われている。

本研究では、Sn-3.5Ag-0.75Cu 鉛フリーはんだに注目し、FEM を用いて相当非線形ひずみ振幅を求める際に通常では弾塑性・クリープ解析を行うが、その代わりにより簡易的に解析時間を短縮するためにクリープ解析を省略した弾塑性解析を用いて相当非線形ひずみ振幅を求める手法について検討した。また、さらに解析時間を短縮するために共晶はんだにおいて行われている二段階解析手法における一段階の全体構造解析においては弾性解析のみを行い、その結果を用いて BGA 鉛フリーはんだ接合部の熱疲労寿命簡易評価法について検討した。

2. 弾塑性・クリープ解析と弾塑性解析の比較

2.1 簡易モデルにおける相当非線形ひずみ振幅

図 1 に用いた簡易モデルを示す。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、これらの中でもっとも簡単なものは式(2)に示す Norton 則で構成されている。

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

解析に用いた Sn-3.5Ag-0.75Cu の Norton 則によるクリープ定数 A とクリープ硬化指数 n を表 1 に示す。表 1 を見てもわかるように A と n の関係から、高温においてもクリープひずみがあまり発生しないことが予想できる。また、表 2 に解析で使用した温度依存性の降伏応力を示す。

まず最初に行った解析として、ひずみ速度の依存性を考慮した弾塑性・クリープ解析①、ひずみ速度依存性を簡易的に考慮するために降伏応力を下げ、保持のみクリープを考慮した解析②、そして、ひずみ速度を考慮せず降伏応力は高いものの(表 2)を使用し、保持のみクリープを考慮した解析③、を行った。その時のひずみ集中点の非線形ひずみ振幅の結果を表

3 示す。解析条件として、温度レンジが-55℃～125℃、温度変化時間 3 分、温度保持時間 60 分で行った。表 3 を見ると、①と②においてはクリープがほとんど発生していないことがわかる。そして③においてはクリープひずみの割合が大きくなっているが、これは降伏応力が高いものを使用しているためであると考えられる。これらの結果よりクリープひずみ振幅と塑性ひずみ振幅の割合は変わるが、相当非線形ひずみ振幅は誤差がほとんど無いことがわかる。

次に、クリープが最も発生しやすい高温保持におけるひずみ集中点のひずみ速度から式(2)の Norton 則より応力緩和した後の降伏応力を求めることができる。その応力緩和した後の応力を温度依存性の降伏応力のデータとして入れることによって保持の際に発生するクリープひずみを表すことができるのではないかと考えられる。そこで、温度レンジを同様に-55℃～125℃として求めた温度依存性の降伏応力を代入した弾塑性解析を行ったところ、相当非線形ひずみ振幅が 7.30E-03 となり、誤差がほとんど無いことがわかった。

疲労寿命を相当非線形ひずみ振幅を用いて評価する場合、クリープひずみ振幅と塑性ひずみ振幅の割合を無視してもいいならば弾塑性解析で疲労寿命を評価できると考えられる。

Fig.1 simple model

Table1 Data of Norton' low ($\dot{\varepsilon}_c = A \cdot \sigma^n$)

	A(at MPa/s)	n	Temp. T(℃)
1	1.37E-44	24.55	-50
2	1.25E-41	23.06	-25
3	1.15E-38	21.56	0
4	1.05E-35	20.07	25
5	8.80E-30	17.09	75
6	9.76E-21	12.53	125

Table2 Relation between yield stress and temp.

Temp. T (℃)	-55	-25	0	20	75	125
Yield Stress (MPa)	31.39	28.49	26.07	24.25	18.60	14.12

Table3 Strain range of each models

Analytical models	①	②	③
Creep strain range	1.54E-04	2.89E-04	1.40E-03
Plastic strain range	7.73E-03	7.52E-03	6.24E-03
Total equivalent inelastic strain range	7.88E-03	7.81E-03	7.64E-3

2.2 パッケージモデルにおける相当非線形ひずみ振幅

実際に用いられるようなパッケージモデルにおいても簡易モデルと同様な結果を得ることができるか確認するために図2のような1/4のパッケージモデルで、表4の材料定数を用いて解析を行った。このモデルは8×8のフルレイで要素数は約9800で節点数は約10200である。簡易モデルで得られた結果より、ひずみ速度を考慮せず高い降伏応力（表2）を使用し、保持のみクリープを考慮した解析④、保持時の応力緩和した後の応力をNorton則より求め、その降伏応力のデータを用いた弾塑性解析⑤、を簡易モデルと同様の条件で解析を行った。解析時間はCPU timeで④は約18000(s)、⑤は約3600(s)であった。解析結果を表5に示す。表5において⑤の解析においてクリープの割合が大きく発生しているがこれも簡易モデルと同様に降伏応力が高いものを使用したためであると考えられる。表5を見てわかるように相当非線形ひずみ振幅の誤差はほとんど無いことがわかる。このことから相当非線形ひずみ振幅を用いて疲労寿命を評価する時、弾塑性解析でも十分評価でき、かつCPU timeで約5倍の時間短縮になることがわかった。

Fig.2 BGA assembly model (mm)

Table4 Material property

	Encap	Chip	Substrate	Solder	PCB
Young's Modulus (GPa)	15.5	130	19.0	37.4	18.2
Poisson's Ratio	0.25	0.28	0.20	0.41	16.0
CTE (ppm/°C)	15	2.62	15	24.7	0.19

Table5 Relation between ④ and ⑤

Analytical models	④	⑤
Creep strain range	4.38E-03	0
Plastic strain range	1.44E-02	1.76E-02
Total equivalent inelastic strain range	1.88E-02	1.76E-02

3.弾性解析を用いた近似解析

はんだ接合部のような著しい非線形解析を行うのは非常に時間がかかるが、熱疲労寿命評価を正確に行うためにその非線形性を無視することはできない。さらに、はんだ材料に見られような非線形性はミスマッチのような外荷重に依存するとともに、温度と時間にも大きく依存しているため非線形性を考慮した解析評価を行う際に非常に解析時間を要する。そのため設計現場において非常に取り扱いにくい問題となっている。

一方、パッケージ全体は非常に複雑な多層構造であり、その特性を簡単に整理できない。また、疲労強度を改善するための設計変更を行うとき、どのパラメータを修正すればよいかは簡単に予測できない。ここでは、多種多様な設計パラメータの影響も考慮した近似評価手法がある程度汎用的に利用できるようにするために、共晶はんだについて用いられている弾性解析の結果を利用した非線形近似評価手法をSn-3.5Ag-0.75Cu 鉛フリーはんだについても適用した。その際に行った解析として、先に述べたようにクリープ解析を含まない弾塑性解析を用いて非線形解析を行った。

ここで、表2のような形状をもつBGAパッケージのモデルを用いて三次元モデルでの例題を評価してみた。具体的な解析条件(変化させたパラメータ)は、Encapやchip、PCBの寸法を変化させたり、材料定数としては、ヤング率などを変化させたりして3つのTypeのモデルを作り解析を行った。

はんだバンプの非線形性に対して影響する要因は、単位温度あたりのはんだバンプ上下の相対変位、温度幅、平均温度などである。

弾性解析から得られる結果は、はんだバンプ上下のせん断方向、垂直方向の相対変位 $\Delta \delta_{xy-el}$ 、 $\Delta \delta_{z-el}$ とパッケージ全体の反り変形である。ここで弾性解析から得られるはんだバンプ上下の相対変位は温度幅の影響を定量的に評価できるパラメータとして考えることができる。また、パッケージ全体の反り変形を表すパラメータとして、 α ($= \Delta \delta_{z-el} / \Delta \delta_{xy-el}$)を用いることにした。ここで垂直方向の相対変位 $\Delta \delta_{z-el}$ ははんだバンプの自由膨張分を差し引いた値である。これらのパラメータを用いて非線形性を考慮した変位の境界条件 $\Delta \delta_{xy-in}$ 、 $\Delta \delta_{z-in}$ の近似評価式を作成した(式(3))。式中の T_m は平均温度を示す。解析条件として温度幅を110℃から180℃に設定した。

$$\Delta \delta_{xy-in} = (12800 \alpha^{0.00} \Delta \delta_{xy-el}^2 + 0.55 \alpha^{0.41} \Delta \delta_{xy-el} (T_m/20)^{0.64 \alpha^{0.13}})$$

$$\Delta \delta_{z-in} = (558.7 \alpha^{1.60} \Delta \delta_{z-el}^2 + 2.23 \alpha^{1.23} \Delta \delta_{z-el} (T_m/20)^{0.12 \alpha^{0.11}}) \quad (3)$$

この近似評価式の精度を確かめるために、近似式から算出した値と有限要素法解析から得られた値とを比較したが、非線形性を考慮した相対変位は弾性解析の結果を用いてある程度表現できることがわかった。ただし、式(3)はあくまで一つの例であって、適用できるのは表2のような形状をもつモデルである。他のモデルの適用に関しては式中の係数を修正する必要があると思われる。

4.まとめ

BGAパッケージ鉛フリーはんだ接合部の熱疲労寿命は、接合部の非線形ひずみ振幅を用いて評価することができるが、その非線形ひずみ振幅を評価する際、Norton則からひずみ集中部の応力とひずみ速度の関係より塑性のデータを変えることによってクリープ解析を行わなくても弾塑性解析で非線形ひずみ振幅を算出できることがわかった。そして、最も厳しいはんだバンプの詳細モデルの周囲に全体モデルから得られる変位境界条件を適切に与えるとともに、温度変化を設けて弾塑性解析を行えば、正確に評価できることがわかった。また、BGAパッケージの反り変形特性をあらわすことのできるパラメータ α に注目すれば、全体解析モデルによる弾性解析を利用して非線形性を考慮した非線形境界条件を近似評価できることが分かった。さらに、弾性解析の解析時間は非線形解析時間の約1/3(1105 s/3550s)で、弾塑性・クリープ解析と比較すると約1/16(1105s/17854s)と本手法は非常に多ピン化されたパッケージにおいて効率的な評価手法と言える。

参考文献 省略