はんだバンプ接続の熱衝撃試験寿命ワイブル分布傾きと破壊モードの関係

松崎 富夫*, 于 強**, 澁谷 忠弘**, 松本 翼**

The Relation between the Thermal Shock Test Lifetime Weibull Distribution Tendency and the Destruction Mode of the Solder Bump Connection

Tomio MATSUZAKI*, Qiang YU**, Tadahiro SHIBUTANI** and Tubasa MATSUMOTO**

*カシオ計算機株式会社APプロジェクト(〒198-0022 東京都青梅市藤橋3-3-2)

**横浜国立大学(〒240-9501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

*Advanced Packaging Project, CASIO COMPUTER CO., LTD. (3-3-2 Fujishashi, Ome-shi, Tokyo 198-0022)

**Yokohama National University (79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

概要 電子機器のさらなる小型化のニーズによって、CSP (Chip Scale Package) のはんだ実装信頼性の確保が重要となっている。実装寿命の平均値のみならず、寿命のパラッキも含めた設計技術が求められている。しかし、寿命のパラッキの起因は大変複雑で、その解析は大変な労力を必要とする。本研究では、熱衝撃疲労試験で得られるはんだバンプ接合部の寿命のワイブル分布に異なる傾きが存在することに注目し、それぞれの傾きに対応するサンプルのグループから異なる破壊モードを抽出する方法を提案した。さらに、傾きの変動とパラッキ要因の相関から、破壊モードに対して最も影響を与える要因を明らかにすることができた。本研究では、CSP はんだ接合部のソルダーレジスト開口径のパラッキが疲労破壊のモードの変動を引き起こし、大きな疲労寿命のパラッキをもたらすことを明らかにした。さらに、疲労き裂進展シミュレーション技術を用いてパラッキ要因と破壊モードの関係を検証した。

Abstract

With the need to further reduce the size of electronic devices, securing the solder joint reliability of CSPs (Chip Scale Packages) is becoming important. There is a demand for an improvement in design technology that includes not only the average of the mounting lifetime but also the dispersion of the lifetime. However, the cause of the dispersion of the lifetime is extremely complicated and the analysis requires serious and difficult study. In this study, we paid attention to that tendency which is different from the Weibull distribution of the lifetime of the solder bump connection under thermal shock fatigue testing. From this, we propose a way of extracting different destruction modes from the sample group to explain each tendency. Moreover, we could clarify the main influences on the destruction mode from the correlation between the change of the inclination and the dispersion factor. This correlation shows that the dispersion in the solder resist opening diameter of the CSP solder joint caused the change of the mode of the fatigue destruction in this research, and brought about the large dispersion begin the fatigue lifetime. Moreover, the relation between the organized dispersion factor and the destruction mode could be verified using a fatigue crack developing simulation technology.

Key Words: Solder Joint Reliability, CSP, Weibull Distribution, Solder Resist Opening Diameter, Crack Developing Simulation Technology

1. はじめに

近年、電気製品の軽薄短小の市場ニーズに対応して、ダウンサイジングが進む中、高いスペックの信頼性の要求が急増している¹⁾。しかしながら、信頼性の要求に対する従来の故障解析方法は、製品寿命のワイブル分布から、ワイブル分布の平均値と傾きを用いる方法が主流である。故障が単一破壊モードに起因する場合については、従来の方法でも十分に対応できた。しかし、実装構造が複雑な製品において複数の破壊モードが混在する場合は、その評価方法では対応できない場合がある。このようなケースにおいて

は、異なる破壊モードによってもたらされる寿命のパラッキが大変大きく、破壊モードおよびその原因を解明しパラッキを制御する技術が重要で、その確立が求められている。

従来のCSP はんだバンプの破壊モード解析では、はんだバンプの形状を設計パラメータとしてコントロールし破壊モードを制御する方法が提案されている^{2)~13)}。これは、設計者が破壊モードと設計パラメータの相関についてあらかじめ把握しているケースである。しかし、本研究のCSPのはんだバンプの熱衝撃寿命試験において、CSPの設計パラメータは、すべて同じ寸法（はんだバンプ高さ、樹脂厚、シリコン厚、銅ポスト径、ソルダーレジスト開口径）で設

計されていたにもかかわらず、複数のはんだバンプの破壊モードが存在し、大きな寿命バラツキをもたらしている。このような大きな寿命バラツキについて、破壊モードとその原因をあらかじめ知ることが難しく、その原因究明は非常に複雑である。本研究では、このようなあらかじめ想定できていない複数の破壊モードの発生問題に対して、破壊モードの抽出および原因究明の方法を設計技術者、プロセス技術者に対して、提案することができた。

2. 評価サンプルと評価方法

2.1 評価サンプル

Fig. 1に、本研究で使用したCSP (Chip Scale Package)^{(14),(15)}の構造を示す。このCSPの構造の特徴は、CSPの電極が約100 μm の高さの銅ポストで構成されているところである。基板にCSPを実装したときにこの銅ポストと樹脂で、はんだにかかる応力を緩和することができる。Fig. 2に示すようにCSPは、組成比Sn-3.0Ag-0.5Cuのはんだボールを使用して、基板(PCB)に実装した。この実装構造はSMD (Solder Mask Definition) と呼ばれ、基板ランドがソルダーレジストでマスクされている。CSPのすべての端子をディジーチェーンで接続できるようにした。使用したCSPのサイズは、6 mm $\times$ 6 mm, 7 mm $\times$ 7 mm, 8 mm $\times$ 8 mm, 10 mm $\times$

Fig. 1 Partial cross section view of CSP (Chip Scale Package)

Fig. 2 Packaging structure of SMD (Solder Mask Definition)

10 mmの4種類であり、すべての端子ピッチは0.5 mmである。6 mm $\times$ 6 mmサイズのCSPの概観をFig. 3に示す。Table 1にCSPのサイズと端子数を、Table 2にCSPの仕様と実装基板の仕様を示す。

2.2 実験方法と条件

Fig. 4に、各サイズのCSPの熱衝撃試験の条件を示す。試験開始時をのぞき、 -25°C から 125°C へ、 125°C から -25°C へ、それぞれ1分間で変化させ、 -25°C と 125°C において、9分間その温度を保持した。各サンプルのディジーチェーンTEG (Test Group Element) の抵抗値を常時測定し、試験開始時の抵抗値より20%増加した時点でのサイクル数を不良サイクル数とした。なお、CSPの各サイズの試験サンプル数はそれぞれ20個 ($n=20$) とした。

Fig. 3 View of CSP with 6 mm $\times$ 6 mm size

Table 1. CSP size and number of the terminals

CSP size	Number of the terminals
6 mm $\times$ 6 mm	12 $\times$ 12
7 mm $\times$ 7 mm	14 $\times$ 14
8 mm $\times$ 8 mm	16 $\times$ 16
10 mm $\times$ 10 mm	20 $\times$ 20

Table 2. Specification of CSP and PCB

Specification of CSP	
Silicon thickness (μm)	460
Resin thickness (μm)	90
Copper post height (μm)	90
Copper post diameter (μm)	250
Solder ball height (μm)	250
Solder ball diameter (μm)	300
Specification of PCB	
Solder resist diameter (μm)	250
Solder resist thickness (μm)	40
PCB thickness (μm)	800
PCB size (mm $\times$ mm)	40 $\times$ 110

Fig. 4 Thermal shock test condition of CSP

Fig. 5 Weibull life time for CSP with each size

3. 実験結果とモード分析

3.1 実験結果

各サイズのCSPの熱衝撃試験結果から得られる寿命のワイブル分布を、Fig. 5に示す。一般的に、CSPのサイズが大きくなるとコーナーに位置するはんだバンプにかかる応力が増大し、その寿命が低下するとされている^{16)~18)}。しかし、寿命バラツキとその要因に関する報告は少ない。Fig. 5に示すように、今回得られた疲労寿命の結果の平均値は、これまでに報告された傾向と一致している。しかし、その寿命バラツキの分布は、複雑でCSPのサイズのみで説明できるとは言えない。さらに、同じCSPサイズのワイブル分布を見ても、必ずしも1つの傾きを示しているとも言えない。また信頼性を検討するとき、寿命バラツキを見過ごすわけにはいかない。したがって、この寿命バラツキの発生メカニズムとその要因の解析方法の確立が重要である。

3.2 ワイブル分布の傾きと破壊モード解析

本研究では、Fig. 5に示す各サイズのCSPのワイブル分布に複数の傾きが存在していることに注目した。Fig. 6に、6mm×6mmのCSPのワイブル分布の結果を示す。同じ破

Fig. 6 Weibull life time for CSP with 6 mm×6 mm size

Fig. 7 Cross section observation of CSP sample

壊モードを有するサンプルのバラツキが同一傾きを形成すると思われる。すなわち、異なるワイブル分布の傾きが、異なる破壊モードに起因することを示唆している。ここでは、Fig. 6に示すワイブル分布の傾きが4つのグループに分けられるために、4種類の破壊モードが存在することを示唆している。4つのグループのそれぞれの平均寿命を示しているサンプル(a), (b), (c), (d)を選び、Fig. 7に示すように、CSPを対角上で切り出し、コーナーに位置するはんだバンプの断面を観察した。Fig. 8に、6mm×6mmのCSPの断面と寿命サイクル数を示す。(a), (b), (c), (d)各サンプルのコーナーに位置するはんだバンプの断面を詳細に分析し、以下の結果を得た。サンプル(a)は、実装基板側から破断している。そして、CSP側に破断には至っていないき裂進展が見られる。サンプル(b)は、CSP側から破断して

Sample name (Group name)	Lifetime of each sample	Actual crack developing	Chart of crack developing
Sample (a) (Group I)	1006cycles
Sample (b) (Group II)	1310cycles
Sample (c) (Group III)	1568cycles
Sample (d) (Group IV)	1788cycles

Fig. 8 Destruction mode analysis of the corner solder with 6 mm×6 mm size

いる。そして、実装基板側に破断には至っていないき裂進展が見られる。サンプル(c)とサンプル(d)は、CSP側と実装基板側にき裂の進展は見られるが、破断までは至っていない。サンプル(c)とサンプル(d)の破壊モードが同じであることがわかる。そして、Fig. 6に示す同一傾きを有するグループは、サンプルの断面分析から、同じ破壊モードであることが確認できた。したがって、ワイブル分布の傾きからそれぞれの破壊モードが抽出できたといえる。

同様に、Fig. 9に示す7 mm×7 mmのCSPのワイブル分布も傾きの違いから、4つのグループに分けられる。そして、各グループのそれぞれの平均寿命を示しているサンプル(a), (b), (c), (d)のコーナーに位置するはんだバンプの断面を詳細に分析し、以下の結果を得た。Fig. 10からサンプル(a)は、CSP側から破断している。サンプル(b)もサンプル(a)と同様にCSP側から破断している。そして、サンプル(a)とサンプル(b)ともに、実装基板側に破断には至っていないき裂進展が見られる。サンプル(a)とサンプル(b)の破壊

Fig. 9 Weibull life time for CSP with 7 mm×7 mm size

Sample name (Group name)	Lifetime of each sample	Actual crack developing	Chart of crack developing
Sample (a) (Group I)	942cycles
Sample (b) (Group II)	1228cycles
Sample (c) (Group III)	1394cycles
Sample (d) (Group IV)	1461cycles

Fig. 10 Destruction mode analysis of the corner solder with 7 mm×7 mm size

モードが同じであることがわかる。サンプル (c) とサンプル (d) は、CSP 側と実装基板側にき裂の進展は見られるが、破断までは至ってない。サンプル (c) とサンプル (d) の破壊モードが同じであることがわかる。同様に、Fig. 11 に示す 8 mm×8 mm の CSP のワイブル分布の異なる傾きの 4 つのグループから、それぞれ各グループの平均寿命を示しているサンプル (a), (b), (c), (d) のコーナーに位置するはんだバンプの破壊モードを詳細に分析すると、Fig. 12 に示す断面観察から 6 mm×6 mm の CSP の場合と同様の破壊モードが確認できた。すなわち、サンプル (a) は実装基板側から破断し、サンプル (b) は CSP 側から破断していることがわかった。そして、サンプル (a) では、CSP 側に破断には至っていないき裂進展が見られ、サンプル (b) では、実装基板側に破断には至っていないき裂進展が見られる。サンプル (c) とサンプル (d) についても同じく、CSP 側と実装基板側にき裂の進展は見られるが、破断までは至ってない。同様に、

Fig. 11 Weibull life time for CSP with 8 mm×8 mm size

Sample name (Group name)	Lifetime of each sample	Actual crack developing	Chart of crack developing
Sample (a) (Group I)	606cycles
Sample (b) (Group II)	979cycles
Sample (c) (Group III)	1186cycles
Sample (d) (Group IV)	1407cycles

Fig. 12 Destruction mode analysis of the corner solder with 8 mm×8 mm size

Fig. 13に示す10 mm×10 mmのCSPのワイブル分布の傾きの各グループのサンプル(a), (b), (c), (d)についても, Fig. 14に示す断面観察から6 mm×6 mmのCSPの場合と同様の破壊モードが確認できた。

各サイズのCSPのコーナーに位置するはんだパンプの破壊モードを整理すると, Fig. 15にまとめることができる。すなわち, はんだパンプのCSP側または実装基板側から完全に破断するモードが2種類(モード①とモード②)。はんだパンプのき裂進展がはんだパンプのCSP側と実装基板側からバランスよく発生するモードが1種類(モード③)。合計3種類のモードに分類することができた。そして, 寿命のサイクル数の短さの順番は, モード①, モード②, モード③であることも明らかになった。

3.3 破断モードとバラツキ要因の相関

各サイズのCSPのワイブル分布の傾きから, それぞれの破壊モードが抽出できた。各破壊モードの原因を調べるためにCSPの断面の寸法を詳細に調べた。その結果, 各寸法

Fig. 13 Weibull life time for CSP with 10 mm×10 mm size.

Sample name (Group name)	Lifetime of each sample	Actual crack developing	Chart of crack developing
Sample (a) (Group I)	497cycles		
Sample (b) (Group II)	965cycles		
Sample (c) (Group III)	1208cycles		
Sample (d) (Group IV)	1414cycles		

Fig. 14 Destruction mode analysis of the corner solder with 10 mm×10 mm size

Fig. 15 Complete break mode (mode ① and mode ②). and crack developing mode (mode ③)

の設計値からバラツキは、はんだバンプ高さ $\pm 2.0\mu\text{m}$ 、樹脂厚 $\pm 1.6\mu\text{m}$ 、シリコン厚 $\pm 2.2\mu\text{m}$ 、銅ポスト径 $\pm 1.5\mu\text{m}$ に比べ、ソルダーレジスト開口径 $-22\mu\text{m}$ が大きい結果となった。以上より、ソルダーレジスト開口径のバラツキが他に比べて大きいことが明らかとなった。

Fig. 16に、6mm×6mmのCSPの実装基板のソルダーレジスト開口径のバラツキ分布例を示す。レジスト開口径のバラツキが大きいことがわかった。分布は、以下の3グループに分類できる。

Fig. 16 Solder resist opening diameter of corner solder for CSP with 6 mm×6 mm size

に分類できる。

- グループ I: $R < 230\mu\text{m}$
 - グループ II: $R > 240\mu\text{m}$
 - グループ III: $230 \leq R \leq 240\mu\text{m}$
- R : ソルダーレジスト開口径

ワイブル分布の各傾きのグループとの相関を調べるために Fig. 8 のサンプル (a), (b), (c), (d) の断面のレジスト開口径を実測した。その結果、サンプル (a) のレジスト開口径が $227\text{ }\mu\text{m}$ ($R < 230\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ I とレジスト開口径の分布のグループ I が対応することがわかった。サンプル (b) のレジスト開口径が $243\text{ }\mu\text{m}$ ($R > 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ II とレジスト開口径の分布のグループ II が対応することがわかった。サンプル (c) のレジスト開口径が $237\text{ }\mu\text{m}$ ($230 \leq R \leq 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ III とレジスト開口径の分布のグループ III が対応することがわかった。サンプル (d) のレジスト開口径が $234\text{ }\mu\text{m}$ ($230 \leq R \leq 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ IV とレジスト開口径の分布のグループ III が対応することがわかった。

同様に、Fig. 17 に $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ の CSP の実装基板のソルダーレジスト開口径のバラツキ分布を示す。レジスト開口径の分布は、大きく 2 種類の範囲に分けられる。すなわち、 $R > 240\text{ }\mu\text{m}$ のグループ II、 $230 \leq R \leq 240\text{ }\mu\text{m}$ のグループ III に分けられる。特に注目すべき点は、Fig. 16 に示す $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ の CSP のレジスト開口のバラツキ分布に存在していた $R < 230\text{ }\mu\text{m}$ のグループ I が存在しないことである。この結果は、 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ の CSP のはんだバンプの破壊モードに、実装基板側から破断する破壊モード①が存在しないことに対応している。ワイブル分布の各傾きのグループとの相関を調べるために Fig. 10 のサンプル (a), (b), (c), (d) の断面のレジスト開口径を実測した。その結果、サンプル (a) のレジスト開口径が $247\text{ }\mu\text{m}$ ($R > 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ I とレジスト開口径の分布のグループ II が対応することがわかった。サンプル (b) のレジスト開口径が $246\text{ }\mu\text{m}$ ($R > 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ II とレジスト開口径の分布のグループ II が対応することがわかった。サンプル (c) のレジスト開口径が $234\text{ }\mu\text{m}$ ($230 \leq R \leq 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ III とレジスト開口径の分布のグループ III が対応することがわかった。サンプル (d) のレジスト開口径が $232\text{ }\mu\text{m}$ ($230 \leq R \leq 240\text{ }\mu\text{m}$) であることより、傾きのグループ IV とレジスト開口径の分布のグループ III が対応することがわかった。

Fig. 18 と Fig. 19 に $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の CSP の実装基板のソルダーレジスト開口径のバラツキ分布を示す。 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ の CSP の場合と同様に、レジスト開口径の分布は大きく 3 種類のグループに分けられる。Fig. 12, Fig. 14 のサンプル (a), (b), (c), (d) の断面のレジスト開口径を実測した。その結果、 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ の CSP の場合と同様に、ワイブル分布の各傾きのグループとの相関は、傾きのグループ I とレジスト開口径の分布のグループ I が対応し、傾きのグループ II とレジスト開口径の分布のグループ II が対応し、傾きのグループ III・IV とレジスト開口径の分布のグループ III が対応することがわかった。各サイズの CSP のワイブル

Fig. 17 Solder resist opening diameter of corner solder for CSP with $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ size

Fig. 18 Solder resist opening diameter of corner solder for CSP with $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ size

Fig. 19 Solder resist opening diameter of corner solder for CSP with $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ size

分布の傾きのグループとソルダーレジスト開口径 (R) のバラツキ分布のグループと破壊モードの関係を Table 3 に示す。すなわち、ソルダーレジスト開口径のバラツキに起因して、各破壊モードが発生しワイブル分布の異なる傾きとなって現れたということが明らかとなった。

Table 3. Relation of destruction mode and group of solder resist opening diameter of corner solder and group of tendency in Weibull distribution of the lifetime of the solder joint

Destruction Mode	Mode ①	Mode ②	Mode ③
Histogram Group (Solder resist opening diameter of corner solder)	Group I ($R < 230 \mu\text{m}$)	Group II ($R > 240 \mu\text{m}$)	Group III ($230 \leq R \leq 240 \mu\text{m}$)
Group of tendency in Weibull distribution of the lifetime of the solder joint with $6\text{mm} \times 6\text{mm}$, $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ and $10\text{mm} \times 10\text{mm}$	Group I	Group II	Group III・IV
Group of tendency in Weibull distribution of the lifetime of the solder joint with $7\text{mm} \times 7\text{mm}$	None	Group I・II	Group III・IV

4. SMD構造のはんだバンプのき裂進展シミュレーションによるメカニズムの検証

各CSPのはんだバンプの熱衝撃寿命試験のワイブル分布の異なる傾きから、はんだバンプの破壊モードとソルダーレジスト開口径 (R) の相関を明らかにした。さらに、ソルダーレジスト開口径とはんだバンプの破壊モードの相関を調べるために、はんだバンプのき裂進展シミュレーションを用いて、レジスト開口径をパラメータとして、き裂の進展の違いを具体的に調べた。これまで、はんだバンプの接合部に発生する非線形ひずみ範囲とその寿命の関係がManson-Coffin 則¹⁹⁾に従うことが報告されている。さらに、線形被害則^{20)~22)} (マイナー則)²³⁾とManson-Coffin 則を用いることによって、はんだバンプのき裂進展シミュレーション^{24)~29)}ができることが報告されている。

このシミュレーション手法を用いて、 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ のSMD構造のCSPについてソルダーレジスト開口径 (R) を $225 \mu\text{m}$, $235 \mu\text{m}$, $245 \mu\text{m}$ の3種類に変えて熱衝撃試験時の破壊メカニズムについて検証した。Fig. 20にき裂進展シミュレーション用のモデル (1/4モデル) を示す。コーナーに位置するはんだバンプを評価対象として、最小メッシュサイズを $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$ とした。全体の要素数は10万要素であり、その内コーナーに位置するはんだバンプの要素数は4万要素である。解析条件に用いられた熱衝撃シミュレーションの履歴を、Fig. 21に示す。各ステップの終了時にはんだ接合部に発生する非線形ひずみ範囲を算出しManson-Coffin 則と線形被害則に基づいて、各要素に発生する累積損傷度^{30), 31)}を計算した。

き裂進展シミュレーションで使用したManson-Coffin 則を式 (1)、累積損傷率を式 (2) に示す

$$N_f = 1,000 \times \left(\frac{\Delta \epsilon_{\text{in}}}{0.01} \right)^{-2} \quad (1)$$

N_f : き裂発生サイクル数

$\Delta \epsilon_{\text{in}}$: 非線形ひずみ範囲

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (2)$$

Fig. 20 Crack developing simulation 1/4 model

Fig. 21 Heat history of crack developing simulation

η : 累積損傷率

N_i : ひずみの繰返し数

N_{fi} : 単独負荷の場合の疲労寿命

累積損傷率が1.0になったとき、はんだバンプが疲労寿命に達し、き裂が進展し破断となる。

そして、上記式 (2) より計算される累積損傷率の上位にランキングされた500個の要素を削除してから、次のステップの解析を継続して行い、各ステップの終了時に同様な処理を施し11ステップまでシミュレーションを継続して行った。はんだバンプの破断経路を確認するために、シミュレーションは、破断まで10ステップを目安として行い、破断ステップから逆算して、1ステップ当たり削除する要素数を決定している。本研究の場合、削除要素数を500個とした。Fig. 22に、き裂進展シミュレーションの経路を示す。き裂進展長さは、き裂進展経路の水平成分の長さとして定義した。Fig. 23に、き裂進展長さ100%の定義について示す。すなわち、CSP側は、き裂進展長さが100% (銅ポスト径) に達したときに破断し、実装基板側は、き裂進展長さが100% (レジスト開口径) に達したときに破断する。

Fig. 22 Definition of crack developing length at corner solder bump

Fig. 23 Definition of 100% crack developing length at corner solder bump

Fig. 24 Crack developing of $R=225\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

次に、レジスト開口径が $225\ \mu\text{m}$ のき裂進展シミュレーション結果をFig. 24に示す。なお、はんだバンプのコンター図は、非線形ひずみの大きさの分布を表している。Fig. 25に、レジスト開口径 $225\ \mu\text{m}$ の場合の、き裂進展寿命（シミュレーションステップ数）と、き裂進展長さ（破断時の長さ100%）の関係を示す。横軸は、き裂進展シミュレーションのステップ数を示し、縦軸は、はんだバンプのき裂が進展し破断したときの長さを100%とした。シミュレーションの初期の段階から、実装基板側のき裂がCSP側のき裂より早く進展し、9ステップ目で破断している。すなわち、はんだバンプのひずみが実装基板側に集中し、き裂進展を促進させるために実装基板側のはんだバンプの破断が早くなるということが確認できた。レジスト開口径が $235\ \mu\text{m}$ のシミュレーション結果を、Fig. 26に示す。Fig. 27に、シミュレーションのステップ数と、き裂進展長さの関係を示す。はんだバンプのCSP側と実装基板側のき裂進展

Fig. 25 The crack developing length of $R=225\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

Fig. 26 Crack developing of $R=235\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

Fig. 27 The crack developing length of $R=235\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

がほぼ同時に進んでいる様子が示され、11ステップ目で同時に破断している。このケースにおいて、はんだバンプのひずみがCSP側と実装基板側に分散し、もっとも長い寿命が実現できる。レジスト開口径が $245\ \mu\text{m}$ のシミュレーション結果を、Fig. 28に示す。Fig. 29に、シミュレーションのステップ数と、き裂進展長さの関係を示す。はんだバンプのひずみがCSP側に集中し、結果的にCSP側のき裂の発生と進展が促進され、CSP側のはんだバンプのき裂が早く進展し10ステップ目で破断する。レジスト開口径が $235\ \mu\text{m}$

と比較して、はんだバンプのひずみの分散ができなく、CSP側に集中しているために、寿命の低下を招いた結果を示している。レジスト開口径 $R=225\ \mu\text{m}$, $235\ \mu\text{m}$, $245\ \mu\text{m}$ について、実際のき裂が、き裂進展シミュレーションでよく再現することができた。

5. まとめ

熱衝撃疲労試験で得られるはんだバンプ接合部の寿命のワイブル分布に異なる傾きが存在することに注目し、それぞれの傾きに対応するサンプルのグループから異なる破壊モードを抽出する方法を提案した。その結果、それぞれのグループの平均寿命を示しているサンプルの破断面を解析することによって、各グループに特有な3種類の破壊モードを抽出することができた。さらに、各破壊モードを引き起こしている原因を解明するために、サンプルの破断面の寸法を詳細に調べた。その結果、溶剤レジスト開口径のバラツキが原因であることを明らかにした。さらに、実装基板の溶剤レジスト開口径のバラツキ分布を調べ、3つの分布グループが存在することを明らかにし、ワイブル分布の傾きのグループとの相関を取った。さらに、抽出した各破壊モードのメカニズムを検証するために、き裂進展シミュレーション技術を用いて、各破壊モードを引き起こす原因となっていた溶剤レジスト開口径をパラメー

Fig. 28 Crack developing of $R=245\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

Fig. 29 The crack developing length of $R=245\ \mu\text{m}$ with $6\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ size

タとしてシミュレーションし、各破壊モードのき裂進展を再現した。その結果、あらかじめ予想できない破壊モードが複数混在している場合、ワイブル分布の傾きを用いた破壊モードの抽出方法が非常に有効であることを示した。

(2008.9.1-受理)

文 献

- 長埜浩太, 矢口昭弘, 寺崎 健, 山田宗博: “携帯電子機器 BGA はんだ接続部の疲労強度”, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. **71**, No. 701, pp. 177–184, 2005-1
- L. S. Goldmann: “Geometric Optimization of Controlled Collapse Interconnections”, IBM Journal of Research and Development, pp. 251–265, 1969
- K. C. Norris and A. H. Landzberg: “Reliability of Controlled Collapse Interconnections”, IBM Journal of Research and Development, pp. 266–271, 1969
- 佐藤了平, 大島宗夫, 廣田和夫, 石 一郎: “IC・LSI の微細はんだ接続技術”, 日本金属学会会報, Vol. **23**, No. 12, pp. 1004–1013, 1984
- 佐藤了平, 大島宗夫: “フリップチップ実装技術”, 月刊 Semiconductor World, Vol. **4**, No. 11, pp. 135–141, 1985
- 野中裕司, 櫻井雅也, 小里貞二郎, 渋谷 仁: “フリップチップタイプ BGA の実装信頼性”, マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, pp. 137–140, 1998
- 福田圭基, 星野正行, 岩津 聡, 佐々木健二, 気賀智也: “CSP の実装形態とはんだ接合部の熱疲労寿命”, 信頼性・保全シンポジウム, pp. 31–34, 2000
- J. Brown and B. Bromley: “PBGA Solder Joint Reliability/Manufacturability as a Function of PCB Pad Size”, Proceeding. Technical Program of the Surface Mount International Conference, Vol. **1**, pp. 161–165, 1996
- A. Mawer, D. Cho and R. Darveaux: “The Effect of PBGA Solder Pad Geometry on Solder Joint Reliability”, Proc SMI, pp. 127–135, 1996
- 森 隆一郎: “採用進む CSP/BGA と回路・実装設計技術”, 電子技術, Vol. **40**, No. 11, pp. 30–34, 1998
- 濱田 繁, 上貝康己, 谷 周一, 松嶋弘倫, 松本知明: “BGA パッケージの熱疲労寿命に及ぼすはんだボールランド間接続形態の影響”, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, pp. 93–94, 1999
- L. Mercado: “Impact of Solder Pad Size on Solder Joint Reliability in Flip Chip PBGA Packages”, Proceeding. Electronic Components & Technology Conference 49th, pp. 255–259, 1999
- 根本知明, 福井太郎: “電子材料技術 半導体パッケージ材料の 2 次実装評価法”, 松下電工技法, Vol. **54**, No. 3, pp. 59–64, 2006
- T. Matsuzaki: “The Proposal WLP with Few Stress Damage to Low-k Dielectric Material”, The Seventh VLSI Packaging

- Workshop of Japan, pp. 79–82, 2004-12
- 15) T. Kosugi and T. Matsuzaki: “Development of Bending Strength Test Simulation of Printed Circuit Board, and Analysis of the Process When Defectiveness Occurs”, The Eighth VLSI Packaging Workshop in Japan, pp. 99–102, 2006-12
 - 16) Z. Wang, Y. Tan and K. Chua: “Board Level Reliability Assessment of Chip Packages”, *Microelectronics Reliability*, Vol. **39**, pp. 1351–1356, 1999
 - 17) R. Darveaux, J. Heckman, A. Syed and A. Mawer: “Solder Joint Fatigue Life of Fine Pitch Bgas-Impact of Design and Material Choices”, *Microelectronics Reliability*, Vol. **40**, pp. 1117–1127, 2000
 - 18) 渡辺雄介: “フリップチップ実装におけるバンブ形状の最適化”, *エレクトロニクス実装技術*, Vol. **16**, No. 10, pp. 46–49, 2000
 - 19) S. S. Manson: “Thermal Stress and Low Cycle”, McGraw-Hill, 1966
 - 20) 北野 誠, 熊沢鉄雄, 本田美智晴, 広田和夫: “電子機器のはんだ接合部の信頼性試験条件設定法の提案”, *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol. **62**, No. 598, pp. 1464–1471, 2006-5
 - 21) YU Q, 白鳥正樹, 坂入 慎: “BGA はんだ接合部の疲労き裂の発生と破断寿命評価”, *日本機械学会年次大会講演論文集*, Vol. **1**, pp. 3–4, 1999
 - 22) YU Q, 澁谷忠弘, J. J. Chul, 阿部浩和, 小山隆宏, 田中彬史: “自動き裂進展解析によるはんだ接合部の破断寿命評価”, *日本機械学会年次大会講演論文集*, Vol. **1**, pp. 1015–1016, 2006
 - 23) M. A. Miner: “Cumulative Damage in Fatigue”, *J. Applied Mechanics*, Trans. ASME, Vol. **67**, pp. A159–A164, 1945
 - 24) 谷江尚史, 寺崎 健: “半導体微細はんだ接続部き裂経路を再現するき裂進展モデル”, *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol. **72**, No. 717, pp. 638–645, 2006-5
 - 25) 寺崎 健, 谷江尚史: “分散ボイドを含む微細はんだ接合部の疲労き裂進展挙動の解析”, *Microjointing and Assembly Technology in Electronics*, Vol. **12**, pp. 247–252, 2006
 - 26) M. Mukai, K. Hirohata, H. Takahashi, T. Kawasaki and K. Takahashi: “Damage Path Simulation of Solder Joints in QFP”, *Proceedings of InterPACK '05 (IPACK2005-73297)*, pp. 1–6, 2005
 - 27) 于 強, 白鳥正樹, 南海 基, 日焼宏和, 五十嵐和弘, 中尾健司, 村山公正, 森山雄治: “車載用電子デバイスのはんだ接続部の熱疲労寿命評価”, *Microjointing and Assembly Technology in Electronics*, Vol. **10**, pp. 39–42, 2004
 - 28) 谷江尚史, 寺崎 健: “半導体微細はんだ接続部き裂経路を再現するき裂進展モデル”, *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol. **72**, No. 717, pp. 638–645, 2006-5
 - 29) 谷江尚史, 寺崎 健: “き裂進展解析による半導体はんだ接続部寿命評価手法”, *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol. **73**, No. 727, pp. 372–378, 2007-3
 - 30) 于 強, 白鳥正樹: “実装信頼性評価・設計におけるシミュレーション技術とその応用”, *電子情報通信学会論文誌C*, Vol. **J88-C**, No. 11, pp. 851–858, 2005
 - 31) 五十嵐和弘, 村山公正, 于 強, 中西 隆, 白鳥正樹: “車載用電子デバイスにおけるはんだ接続部の破断寿命解析”, *Toyota Technical Review*, Vol. **54-1**, pp. 142–147, 2005