2000 ピン級 FC-BGA の実装信頼性評価

呉 強*, 馬場 伸治*, 松嶋 弘倫*, 原田 耕三*, 林 英二*, 木村 通孝*

Reliability Study for 2000 Pin Class Flip-Chip BGA

Qiang WU*, Shinji BABA*, Hironori MATSUSHIMA*, Kozo HARADA*, Eiji HAYASHI* and Michitaka KIMURA*

*三菱電機株式会社半導体生産・技術統括部アセンブリ技術部（〒664-0005 兵庫県伊丹市瑞原4-1）

* Assembly Engineering Dept., Manufacturing Technology & Production Management Div., Mitsubishi Electric Corp. (4-1 Mizuhara, Itami-shi, Hyogo 664-0005)

Abstract

This study has investigated the solder joint reliability for 2000 pin class Flip-chip BGA (FC-BGA) mounted on PCB (printed circuit board), through the thermal cycle evaluation and FEM (Finite Element Method) analysis. Owing to the stress of Z-axis direction, the fracture occurred at the solder ball under the chip area of FC-BGA. It is assumed that one key factor determining solder joint life is the initial deformation of FC-BGA after mounting on the PCB. Increasing the stiffness of FC-BGA enable to decrease the initial deformation, so that it improves the solder joint reliability. In addition, in the case of high-density mounting, the solder joint reliability mounted on the reworked PCB shows negative result, caused by the reworking temperature.

Key Words: FC-BGA, Reliability, Z-axis Stress, Warpage, Deformation, Rework

1. はじめに

電子機器の高性能化・高機能化の進展に伴い、多ピン化、高放熱、高速動作に優れた半導体パッケージとして Flip-Chip BGA (FC-BGA) が注目されている。この多ピン化に伴い、パッケージサイズも大型化してきており、パッケージ外部端子（はんだボール）の実装ボードとの接続部信頼性の確保は、重要な技術的課題の1つとなっている。大型サイズのFC-BGAでは、半導体チップとBGA基板が接合するバンプ（1st接合部）は、アンダーフィル樹脂で補強することによって、接続信頼性が十分に確保されている反面、実装ボードと接続するはんだボール（2nd接合部）は、チップとFC-BGA基板との熱膨張係数の差や、アンダーフィル樹脂の収縮などによるパッケージ反りの影響で、はんだボール部分の歪みが大きくなるため、破断に至る寿命を確保する技術的な改善が必要である^{1),2)}。この破断原因の解明は、FC-BGAの高信頼性を達成する上で、重要なポイントである。

本稿では、このFC-BGAにおけるパッケージ反りによる

2nd 接合部の応力挙動を明確化するために、2000pin 級FC-BGA の実装信頼性の評価・解析および3次元FEM (Finite Element Analysis Method)解析を行い、2nd 接合部の不良発生箇所および発生原因について評価した結果を報告する。さらに、実装プロセスで行われるリワーク作業を想定したサンプルを作成し、実装信頼性への影響についても評価を行った。

2. 評価方法

2.1 評価仕様

Fig. 1 に、FC-BGA の写真と断面構造図を示す。また、Table 1 に、今回の評価で用いた 1848 ピン FC-BGA と実装ボードの仕様を示す。

Fig. 1 Cross-sectional structure of FC-BGA

Table 1. Shape and size of FC-BGA

FC-BGA PKG Spec.						Board Spec.		
Pin Numbers	PKG Size (mm□)	Chip Size (mm□)	Ball Pitch (mm)	Ball Layout	Ball Layout under Die	Size (mm)	Thickness (mm)	Pad Type
1848	45.0	16.5	1.0	43×43	17×17	250×250	2.8	φ 0.45 mm, N-SMD

FC-BGAは、実装信頼性を向上させるため、実装ボードと同等材料であるエポキシ樹脂をベースとする有機ビルドアップ基板を採用し、実装ボードとの接合には63Sn-37Pbの共晶はんだボールを使用している。また、はんだ接合パッドの表面処理は、Cuパッド上にNi/Auの2層無電解めっきを採用し、はんだとの接合を最適とする処理によって初期接合信頼性を確保している^{3),4)}。

実装ボードは、2.8mm厚の高TgのFR4基板を使用した、Cuパッド部はプリフラックスの表面処理を行っている。

FC-BGAの実装はN2リフロー炉を用いmax. 225℃の温度条件で行い、実装後に、X線観察および断面観察より初期接合性が問題ないことを確認した上で温度サイクル試験に投入した。

Fig. 2に、ボード実装したFC-BGAの配置図、Table 2に、評価仕様を示す。

FC-BGAの構造については、反りを低減し、実装信頼性を高めるため、ヒートスプレッドを厚く高剛性(Hタイプ)にしているが、その信頼性への影響を確認するため、ヒートスプレッドを薄くした低剛性(Lタイプ)でも評価を行った。

ボードについては、実装ボード1枚に1848ピンFC-BGAを8個、5mm間隔で実装した。リワークの影響を確認するため、リワークなしのAボードとリワークありのBボードを評価した。

以上より、評価仕様としては、AH仕様(リワークなし、高剛性ヒートスプレッド、FC-BGA8個実装)、AL仕様(リワークなし、低剛性ヒートスプレッド、FC-BGA8個実装)、BL仕様(AL仕様と同一のFC-BGA仕様、No. 5~No. 8のFC-BGAをリワーク実施し、リワークをしていないNo. 1~No. 4のFC-BGAを計20個評価)の3通りについて評価した。リワーク中の最高温度はN2リフローのプロセスと同様に約225℃に調整した。

2.2 実装信頼性試験方法

評価条件は、0℃~100℃、38 min/cycleで行った、昇

Fig. 2 Location of FC-BGA mounted on the test board

Table 2. Evaluating sample type of 1848 pin FC-BGA

Sample	FC-BGA Numbers	Board	FC-BGA Type	FC-BGA Status
AH	8×1 Board	A (Non-Rework)	H (High Stiffness)	Non Rework
AL	8×1 Board		L (Low Stiffness)	
BL	4×5 Board	B (With Rework)

Fig. 3 Temperature profile of thermal cycle test

温・降温プロファイルをFig. 3に示す。試験中、評価ボード上の試験温度および各試験FC-BGAのはんだボール部分の抵抗値を常時モニタし、初期抵抗値から2倍以上変化したものを不良と判定した。

2.3 はんだ破断部の解析方法

試験後に、断面観察による破断詳細箇所の分析および浸透液処理によるクラック発生形状のチェックを実施した。さらに、実評価結果に対し、3次元FEM分析にて弾塑性体としてのはんだ応力検証を行った。その結果は3.4節にて記述する。

3. FC-BGA構造の影響

3.1 実装信頼性結果

Fig. 4に、AH, AL, BL 3仕様の温度サイクル試験結果のワイブル図を示す。一般的に信頼性評価は、ワイブル故障分布関数 $F(x)=1-\exp[-(x/\alpha)^\beta]$ で表される。ここで、 α は故障状態を表す形状係数、 β は不良発生率が62.3%での特性寿命を示す。Fig. 4にワイブル分布関数より求めた、初期寿命(0.1%不良のサイクル数)と特性寿命(63.2%不良のサイクル数)を示した。

Fig. 4より、FC-BGA剛性の実装信頼性への影響について、特性寿命は、剛性を高めたFC-BGAを実装したAH仕様で4151サイクルであるが、剛性の低いFC-BGAを実装したAL仕様では、2759サイクルに劣化することがわかる。剛性が高い方は信頼性が高い。文献⁵⁾にて報告されているように、ヒートスプレッド厚さの調整によるFC-BGA剛性の変化は、実装サイクル信頼性への影響が大きいことが確認された。

次にAH, AL仕様のはんだボールの破断箇所をFig. 5に示す。Fig. 5(a)に示すようにFC-BGAのボール配置はフルアレイタイプでX, Y軸方向に対称性がある。また、破断箇所はチップ直下ボールのみである。そこで、Fig. 5(b), (c)にチップ直下の1/8エリアにまとめて表示した。高剛性FC-BGA(AH)は、3~6列目に分散してボール破断が発生しているが、中心より4~6列目が比較的に多く、また、低剛性FC-BGA

Fig. 4 Solder joint reliability

Fig. 5 First failed ball distribution under 1/8 chip area

(AL)も5~6列目に集中している。一般に、パッケージサイズが大きいほど、パッケージコーナ部のボールにかかるせん断応力が大きくなるが⁶⁾、FC-BGAでは、チップとFC-BGA基板との熱膨張の差およびアンダーフィル樹脂の収縮などによる反りの影響で、チップ外周領域の直下面にあるはんだボールが破断しやすい。

3.2 はんだボール破断部の解析

Fig. 6に温度サイクル試験後のはんだボール破断箇所の断面写真を示す。Fig. 7は試験後に浸透液処理したFC-BGAをボードからはがした後のFC-BGA基板パッド部のクラック発生状態を示している。破断箇所はFC-BGAパッケージ側のはんだ内に集中している。これは今回実装ボード側のパッド構造がN-SMDであり、SMD構造としたFC-BGA側に

比べて接合強度が大きいと考えられる。破断クラック状態については、Fig. 6およびFig. 7より、はんだボールのチップ中心側から発生し、チップエッジ側方向へ偏心円状に進展することが判明した。

Fig. 6 Cross-section SEM of solder fatigue at the first failure point

Fig. 7 Crack growth on FC-BGA pad

3.3 破断原因の分析

さらに、破断原因を明確にするために、実装する前後のFC-BGAの反り状態について調べた。

Fig. 8に、3次元測定機によるLタイプの対角線方向のボールパッド面の反り実測結果、およびH, Lタイプの各温度点での反り最大量を示している。H, Lタイプの反り挙動は、同一傾向で、常温状態でチップ側凸の方向であるが、温度上昇に伴い減少している。反り最大量はHタイプの方が小さい。25℃から115℃間の反り変化量はH, Lタイプの差がなく、共に105 μm 程度減少している。

Fig. 9は、実装直後と温度サイクル(TCY)完了後のFC-BGAおよびボードのパッド位置の高さ分布を示す。なお、温度サイクル完了後のサンプルは最初の破断発生後、さらに約600サイクルを付加し、チップ直下のボール全部を破断させている。Fig. 9より、ボードパッド位置の高さ分布については、温度サイクル試験による影響がほとんどなく、共にわずかな凸状となっている。一方、FC-BGA基板パッド位置の高さ分布については、FC-BGAの反りがFig. 8に示すように温度上昇に伴い減少するため、実装直後のFC-BGAは、はんだ固相温度183℃で、凝固したはんだボールの拘束によって183℃のほぼフラット形状に固定されてい

Fig. 8 FC-BGA warpage on ball pad side for H and L type samples

Fig. 9 Pad position of board and FC-BGA

Fig. 10 Mounted gap height distribution

る。次にチップ直下のボールを全部破断させた温度サイクル完了後は、FC-BGAの中央部が開放され、FC-BGA単体の25℃での反り形状に戻り凸状となった。以上より、FC-BGA実装においては、実装直後ののはんだボールにZ軸方向の引張残留応力が存在していると考えられる。

次に、実装直後のFC-BGA反りの矯正量と実装信頼性寿命との関連性を検証するため、実装直後および温度サイクル完了後（ボール破断後）に、サンプルの実装高さ変化を解析した。その結果をFig. 10に示す。実装高さはFC-BGA基板パッドと実装ボードパッド間との距離を指す。実装直後の実装高さは、Hタイプの方がLタイプより、特にチップ直下の領域が高くなっている。このため、ボール破断後のFC-BGA中心部の実装高さ変化量はLタイプの62.1 μm に比べ、Hタイプが38.8 μm と小さくなっている。この変化量が実装直後のFC-BGA反りの矯正量に相当し、Hタイプでは、反り矯正によるZ方向の応力残留がLタイプと比較して小さいため、Fig. 4に示したように信頼性寿命が長くなったと考えられる。

3.4 破断箇所と歪み分布のシミュレーション解析

試験および解析結果を検証するために、有限要素法(FEM)を用いた応力シミュレーション解析を行った。材料モデルは、はんだ部の応力および応力の最大箇所を比較する目的で、はんだを弾塑性材料とし、その他材料を弾性材料として扱った。解析に用いた材料物性値をTable 3に示す。Sn-Pbはんだの非線形性については、100℃（試験最高温度）、2400 sec/cycle（試験周波数）の応力—歪み曲線を利用した。熱応力解析は、はんだ歪みの振る舞いが2サイクル目から安定しているため、2サイクル目に対して

Table 3. Material properties

	Elastic modulus (Kg/mm ²)	TCE (ppm/°C)	Poisson ratio
Chip	19000	3.6	0.3
Underfill resin	810	27	0.35
PKG substrate	2950	19	0.3
PWB board	1800	16.7	0.18
Sn-Pb solder	2176	24.5	0.36
Ring	13000	17	0.3
Heat spreader (H/S)	12300	17.7	0.3

行った⁷⁾。

温度サイクル評価においては、PKG/実装ボード間の熱膨張係数差によるX-Y面のせん断応力と、反りの温度変化によるZ方向の応力が同時に存在している。X-Y面のせん断応力は、傾向的に、 $\Delta\gamma \approx \{(A \times L)^2 + B^2\}^{1/2}$ と表示できる⁶⁾。Lは、はんだボールをパッケージ中心との距離、AとBは熱膨張係数差および評価温度範囲を示す定数である。このため、X-Y面のせん断応力が支配的に働いた場合に、パッケージコーナ部のボールは、Lが最大のポイントで最初に破壊する。これは、ベアチップ実装やWLCSP実装の場合に一般的である^{8),9)}。

しかし、FC-BGAの場合では、Fig. 5に示すように、パッケージ中央部のボールが最初に破壊した。支配的な破壊応力は、X-Y面のせん断応力ではなく、反り変化(Fig. 8)で発生するZ方向の応力と考えられる。そこで、この反り変化のはんだボール部への影響を確認する目的として、Z方向のみの応力解析を行った。

まずは、FC-BGA反り変化の影響を明白化するため、実装ボードのZ方向変化がなしと仮定した。Fig. 11に(a) FEMモデルの側面図、および $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ の(b)昇温状態と(c)降温状態の解析結果を示す。チップ直下以外のボール変化については、昇温状態と降温状態は共に均一で差がなく、Z方向の応力差がほぼない。一方、チップ直下のボールについては、昇温状態はボールが圧縮され、降温状態はボールが引っ張られ、大きなZ方向の応力が存在していることが判明した。本解析モデルでFC-BGA単体の初期反りを $0\mu\text{m}$ と仮定したことで、Fig. 8に示した温度変化に伴いFC-BGA反

Fig. 11 Z-axis stress for low-pin-count FC-BGA

り量の減少および増加がFig. 11に示したはんだボールへの圧縮および引張りに相当することより、Z方向の応力がFC-BGA反りの温度変化量に対応することを見出した。

次に、Z方向の応力が温度サイクル試験で発生した破断箇所(Fig. 5b, c)との相関を検証するために、HとLタイプFC-BGAに対し、Fig. 12に示した1/8モデルで、3D-FEM解析を行った。0~100°C/cycleの試験条件において、解析には初期温度を50°C、温度変化量 ΔT を50°C(昇温が50°C→100°C、降温が50°C→0°C)と設定した。3Dの1/8モデルはFC-BGA中心部のX, Y方向を固定し、実装直後のFC-BGA単体の反り矯正を無視し、50°Cでの初期反りを $0\mu\text{m}$ とした。メッシュ仕様に関しては、Fig. 12(a)に示すように、チップエリア+1列ボールの範囲に細かいメッシュで、それ以外のエリアは粗いメッシュでモデル化した。チップエリアおよびはんだボールのメッシュの詳細図はFig. 12(b), (c)に示している。破断がチップ直下のみに発生し、引張りと圧縮の応力も対称的であるため、FEM解析で得た応力分布図および応力データグラフは、引張応力が発生する降温状態、かつチップ直下1/8エリアのみを表示した。

Fig. 13はFC-BGAのはんだボールに関する、Z方向応力の(a)面分布および(b) Hタイプ、(c) Lタイプをデータ化したVon-Mises応力の分布図である。応力分布においては、H, Lタイプともに中心より4→6列目の応力値が高く、Fig. 5に示した評価での破断箇所とほぼ一致し、Z方向の応力が破壊の主因と考えられる。しかし、応力の値に関しては、両タイプとも同じである。したがって、H, Lタイプの実装サイクル寿命差(Fig. 4)の起因は、温度サイクル中で発生したZ方向応力(Fig. 13)よりも、パッケージ実装直後に発生した反り矯正量の差(Fig. 10)にあると推定できる。この反りの矯正ははんだボール凝固時の初期残留応力に相当でき、よって、FC-BGA信頼性予測のために相当歪み範囲の解析

(a): Model aspect

(b): Fine mesh under chip

(c): Ball mesh at PKG

Fig. 12 3D-FEM model for 1/8 area

Fig. 13 Stress distribution of Z-axis by 1/8 mode of 1848 pin FC-BGA

を行う際には、実装直後の反り矯正で発生した初期残留歪みをも考慮する必要がある¹⁰⁾。

4. リワークの実装信頼性への影響

4.1 実装信頼性結果

低剛性のLタイプFC-BGAを実装したリワークなしのAボードとリワークありのBボードを用い、リワークの実装信頼性への影響を評価した。評価仕様はFig. 2に示すAL (リワークなし) とBL (リワークあり) である。AL仕様は完全にリワークなしで、BL仕様はFig. 2の5mm間隔で搭載されているNo. 1~No. 8のうち、No. 5~No. 8のFC-BGAをリワークした後、リワークなしのNo. 1~No. 4の評価を行った。試験結果はFig. 4に示したように、特に、0.1% Failureの初期寿命について、AL仕様の1435サイクルに対し、BL仕様は528サイクルに劣化している。リワークありボードに搭載したFC-BGAは、リワークの影響で信頼性が劣化している。

4.2 リワークによる劣化の原因分析

リワークによる劣化原因を分析するため、リワーク中の温度分布測定を行った。Fig. 14はFig. 2に示すNo. 5位置のFC-BGAをリワークするときのボード温度面分布の測定結果である。加熱温度225℃でリワークしているNo. 5のFC-BGAに隣接するNo. 3のFC-BGA温度は、パッケージ全体がはんだ溶融温度の183℃以上に達しており、リワーク中にBL仕様のFC-BGA (No. 1~No. 4)の一部ははんだボールの再溶融が発生しているとわかった。これは、5mm間隔で高密度実装を行っていることより、リワーク時の熱の影響を受けているためと考えられる。

この再溶融によるFC-BGAへの影響を確認するため、AL仕様とBL仕様について、No. 3のFC-BGAのパッド位置での断面観察を行った。結果をFig. 15に示す。ボードパッド位置に関しては、ALとBL仕様とも差がない。一方、FC-BGAパッド位置に関しては、リワークなしのAL仕様は左右対称であるが、リワークありのBL仕様では、リワークされたNo. 5に近い端部の方が約90μm高くなっていること

Fig. 14 Heat distribution at the reworking process for 1848 pin L type FC-BGA

Fig. 15 Pad position of board and FC-BGA for the No.3 of AL and BL sample

がわかった。

以上より、リワークありボードに搭載したFC-BGAでの信頼性の劣化は、リワーク熱の影響ではんだボールが再溶融され、実装高さの左右のバランスが崩れ、高さが低くなった方に高い応力が集中したためと推定している。

5. 結論

FC-BGAパッケージの高密度実装の温度サイクル信頼性に及ぼす影響について調査した。今回の結果より、以下の内容が検証された。

- (1) FC-BGA の温度サイクルでの最初破壊は、チップ外周領域の直下にあるはんだボールのFC-BGA 側のはんだ疲労破断である。破壊クラックはFC-BGA 中心向きの内側から発生し、外側向きへ偏心円状に進展していく。
 - (2) FC-BGA の温度サイクル信頼性での特性寿命は、高剛性タイプの方が低剛性タイプより長く、4151 サイクルである。パッケージ剛性を高めることで、はんだボール凝固時の拘束力によるFC-BGA 実装直後の反り矯正量が小さく、信頼性を向上することができる。
 - (3) FC-BGA 反りの変化に依存するZ方向の応力は、最大箇所が試験での破壊箇所と一致し、破壊の主因と考えられる。今後、FC-BGA 信頼性予測において、精度をよりよくするため、相当歪み範囲を解析する際には、実装直後の反り矯正で発生した初期残留歪みをも考慮する必要がある。
 - (4) 高密度で実装したFC-BGA に対して、リワークを行った場合、熱の影響で、隣接するリワークを行わないFC-BGA の実装高さに傾きが発生し、0.1% Failure の初期寿命が1435 サイクルから528 サイクルまで低下したところから、隣接するパッケージへの熱影響に配慮したリワーク作業の確立が実装信頼性の劣化防止の観点から重要である。
- (2002.11.6-受理)
-
- 文 献
- 1) E. C. Ahn and T. J. Cho, et al.: "Reliability of Flip Chip BGA Package on Organic Substrate", Proc 49th Electronic Components and Technology Conf., pp. 1215-1220, 2000
 - 2) 塚田 裕: "ビルドアップ配線板入門", 日刊工業新聞社, pp. 101-139, 1998.4
 - 3) 呉 強, 岡田真喜雄, 他: "FC-BGA 無電解 Ni/Au めっきパッドに対するはんだボール接合の技術開発", 溶接学会全国大会講演概要第65集, pp. 328-329, 1999.
 - 4) Y. Tomita and Q. Wu, et al.: "Advanced Surface Plating on the Organic FC-BGA Package", Proc 50th Electronic Components and Technology Conf., pp. 861-867, 2000
 - 5) Y. Li, J. Xie, T. Verma and V. Wang: "Reliability Study of High-pin-count Flip-Chip BGA", Proc 50th Electronic Components and Technology Conf., pp. 276-280, 2001
 - 6) 大塚寛治, 宇佐美 保: "半導体パッケージング工学", 日経BP 社, pp. 285-288, 1997.1
 - 7) X. Zhang and S.-W. R. Lee: "Critical Issues in Computational Modeling and Fatigue Life Analysis for PBGA Solder Joints", The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. **21**, No. 3, Third Quarter, pp. 253-261, 1998
 - 8) 塚田 裕: "フリップチップ技術", 日刊工業新聞社, pp. 25-68, 2000.5
 - 9) J. H. Lau: "Effects of Microvia Build-up Layers on the Solder Joint Reliability of a Wafer Level Chip Scale Package (WLCSP)", Proc 50th Electronic Components and Technology Conf., pp. 1207-1215, 2001
 - 10) 酒井秀久, 他: "BGA はんだ接合部の形状予測と残留応力評価", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **4**, No.7, pp. 581-589, 2001.11