リフロー・フロー混載実装における鉛フリーはんだ接合部の はく離強度評価

高橋 浩之*, 廣畑 賢治*, 久野 勝美*, 川上 崇*, 小澤 直行**, 笹原 邦彦**

Evaluation of Peel Strength of Lead-Free Solder Joints for Reflow-Flow Soldering

Hiroyuki TAKAHASHI*, Kenji HIROHATA*, Katsumi HISANO*, Takashi KAWAKAMI*, Naoyuki OZAWA**
and Kunihiro SASAHARA**

*株式会社東芝研究開発センター (〒212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1)

**東芝テック株式会社部品事業推進部 (〒410-2321 静岡県田方郡大仁町三福80-2)

*Corporate Research & Development Center, TOSHIBA Corporation (1 Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 212-8582)

**Components Business Group, TOSHIBA TEC Corporation (80-2 Mifuku, Ohito-cho, Tagata-gun, Shizuoka 410-2321)

概要 リフロー・フロー混載実装における鉛フリーはんだ接合部の再溶融によるはく離防止を目的として、QFPはんだ接合部の高温におけるはく離強度試験を実施するとともに、熱解析と応力解析に基づきはんだ接合部のはく離発生条件の検討を行った。高温強度試験の結果、提案した試験方法により再溶融現象を再現することができた。また、試験で得られたせん断破壊断荷重から、はんだ接合部におけるはく離強度の温度依存性を明らかにした。さらに、熱解析と応力解析に基づき基板の温度分布と反り分布を評価し、解析結果から算出したはんだ接合部に生じるせん断荷重と、試験で得られたはく離強度を比較した。その結果、実際のプロセスにおける再溶融によるはく離発生条件とよい対応を示した。

Abstract

In order to understand how to prevent lead-free solder joints from failure caused by re-melting during reflow-flow soldering, peel strength tests for QFP solder joints were carried out at elevated temperatures and the failure conditions were investigated based on thermal and stress analysis. The proposed testing method produced the re-melting phenomenon in lead-free solder. The temperature dependence of peel strength for solder joints was clarified from the maximum shear oriented testing force. The temperature distribution and the deformation of PCBs were estimated on the basis of the thermal and stress analysis. Shear oriented forces at solder joints calculated from numerical analysis results were compared with the peeling strength obtained from the proposed tests. In the present study, the estimated failure conditions showed a good agreement with the occurrence of re-melting failure of QFP solder joints in actual soldering processes.

Key Words: Lead-Free Solder, Sn-Ag-Cu, QFP, Reflow-Flow Soldering, Peel Strength, Finite Element Analysis

1. 緒言

近年、地球環境保護の観点から鉛フリーはんだへの移行が急務となっており、Sn-Ag-Cu系鉛フリーはんだの製品適用が進みつつある。このような状況の中、表面実装部品のリフローはんだ付け後に、挿入部品のフローはんだ付けを行うリフロー・フロー混載実装において、先にリフローはんだ付けしたQFPリード接合部がフローはんだ付け時にはく離してしまう不具合が、混載実装基板の量産化の過程で問題となった¹⁾。これまでの研究より、リードがSn-Pbめっきされていると、PbがSn-Ag-Cu鉛フリーはんだ中に混入し、低融点のSn-Ag-Pb三元合金を生成し、フローはんだ付け時の再加熱でこの低融点相が部分溶融することが主要因であることが明らかとなっている²⁾。また、リード材質による影響も検討されており、42 alloyリードのQFPは、Cuリードと比較してはんだ接合部の温度が上昇するため、はく離が発生しやすいことが明らかとなっている^{2),3)}。

一方、はく離の発生が部品サイズに依存し、はんだ接合部が再溶融温度を超えてもQFPサイズが小さい場合には、はく離が発生しないことが知られており²⁾、はんだ接合部の温度的な要因のみならず、基板の反りの影響といった力学的な要因も関与していることは明らかである。したがって、リフロー・フロー混載実装における鉛フリーはんだ接合部のはく離発生を防止するためには、はんだ接合部のはく離発生条件の力学的な定量化が必要と考えられる。

そこで本研究では、はんだ接合部のはく離発生条件の力学的な定量化が可能な高温強度試験を実施し、再溶融温度を挟んだ温度域におけるQFPはんだ接合部のはく離強度を取得するとともに、熱解析と応力解析に基づき基板の温度分布と反り分布を評価することにより、はんだ接合部のはく離発生条件の検討を行った。

2. 再溶融によるはく離発生

リフロー・フロー混載実装基板で発生したQFPリード接

Fig. 1 Cross-section SEM images. (a) Entire image of solder joint, (b) Enlarged image of (a)

合部のはく離発生部の断面写真とその高倍率写真をFig. 1に示す。Sn-Ag-Cu鉛フリーはんだに、Sn-Pbめっきされた42 alloy リードというはく離が発生しやすい組み合わせである。パッド側のはんだ接合部界面にはく離が発生していると同時に、リードに沿って、部分的にはんだ内部にも再溶融した痕跡が認められる。

Fig. 2に元素マッピング像を示す。Pbの偏析がリード側接合界面に見られるとともに、はんだ内部の空洞部の縁に沿ってもPbの偏析が見られており、Pbの混入による低融点相の部分溶融が再溶融の主要因であることを裏付けている。一方、パッド側のはく離は、はんだバルクとCu-Sn金属間化合物層の界面で生じていることがわかる。再溶融が引き金となって、界面はく離が生じたのかどうかは判断できないが、基板の反りによる力学的な要因がこのはく離発生の要因であることは明らかと考えられる。

3. はく離強度試験

3.1 試験方法

ガルウィング型のリード接合部の強度試験として通常45°方向リードプル強度試験が行われる。これは、QFPのリード1本にフックやワイヤを引掛け、45°方向に負荷を与えることにより、破断時の最大接合荷重を測定するものである⁴⁾。この試験方法は、例えば温度サイクル試験後の強度を初期強度と比較することにより、はんだ接合部の損傷状態を把握するためには有効な試験方法であるが、はんだ接合部の破壊のクライテリアとして破断荷重を直接用いることには以下の課題が考えられる。

- (1) 最大荷重に及ぼすリードの変形の影響が不明確である。

Fig. 2 Cross-section EPMA elemental mappings of solder joints

Fig. 3 Schematic illustration of strength test method at elevated temperature

- (2) フック（ワイヤ）をリードに引掛ける位置が定まらず、力学的な条件が曖昧である。
- (3) フック（ワイヤ）に熱を引かれてしまうため、はんだ接合部の温度が不明確となる。

そこで、上記の欠点を補うために、Fig. 3に示すような高温強度試験を実施した。まずQFPの3辺にあるリードを切断し、1辺のリードのみを残す。パッケージ上面にあらかじめ取り付け付けた負荷用のジグを介して、ホットプレート上で均熱に加熱された基板上のQFPを45°方向等に負荷を与え、最大破断荷重を測定する。なお、ジグの高さは、Fig. 3に示すように荷重線がリード接合部の付け根を通るように製作してある。

この方法を用いると、負荷方向の設定により、はんだ接合部に引張荷重とせん断荷重を所定の割合で精度良く負荷することができる。パッケージ上に負荷点があるため、リード近傍の温度分布が乱されないため、リード近傍の基板温度測定点の値を、おおむねはんだ接合部温度と見なすことができる。

Fig. 4に試験の実施状況写真を示す。試験実施時には、全体を断熱材で覆った状態で升温させ、リード近傍の温度測定点が設定温度に到達した後、引張試験機により負荷を

Fig. 4 View of strength test for QFP solder joints

Fig. 5 SEM images of fracture surface (182°C). (a) Entire image of solder joint, (b) Enlarged image of (a)

Fig. 6 SEM images of fracture surface (167°C). (a) Entire image of solder joint, (b) Enlarged image of (a)

Fig. 7 Relationship between maximum load and temperature

加え、はんだ接合部を破断させる。

3.2 試験結果

提案した高温強度試験を、Sn-Pb リードめっきが施された 208 ピン QFP の実装基板を用いて、Sn-Ag-Pb 三元合金の融点である 178°C を挟んで行った。

低融点相の融点を越えた 182°C におけるはく離強度試験後ののはんだ接合部破面を Fig. 5 に示す。破面上の色濃い部分に滑らかに丸みを帯びた部分が認められ、低融点相の再溶融の痕跡と考えられる。

一方、Fig. 6 に示す低融点相の融点より低い 167°C における試験後の破面には、再溶融の痕跡が認められなかった。

以上の破面観察結果より、本試験方法により再溶融現象を実験的に再現することができたものと考えられる。

そこで本試験方法により、はんだ接合部破断荷重の温度依存性データを取得した。負荷方向は 45° (引張荷重/せん断荷重=1) と 30° (引張荷重/せん断荷重=0.58) の 2

条件を実施した。Fig. 7 に高温強度試験より得られた最大破断荷重と試験温度の関係を示す。なお、破断荷重はリード 1 本当たりの値に換算している。試験数が各 1 のためばらつきもあるが、破断荷重の温度依存性は明らかで、温度の上昇とともに破断荷重は減少していく。次にはんだ接合部の破断が引張荷重成分で生じているのか、せん断荷重成分で生じているのか明らかにするために、Fig. 7 の試験結果を各々の荷重成分で整理した。せん断荷重成分で整理した結果を Fig. 8 に、引張荷重成分で整理した結果を Fig. 9 に示す。その結果、Fig. 8 に示すようにせん断荷重成分で破断荷重を整理した場合、負荷方向によらずほぼ同一のはく離強度を示すことが明らかになった。したがって、QFP はんだ接合部のはく離強度は、本試験で実施した引張荷重とせん断荷重の比が 1 以下の範囲においては、おおむね接合

Fig. 8 Relationship between shear component of maximum load and temperature

Fig. 9 Relationship between tensile component of maximum load and temperature

部のせん断強度によって決まるものと考えることができる。また、図中の破線は、再溶融温度以下におけるせん断強度データを線形回帰したものである。はく離強度は再溶融温度(178°C)を超えた付近から回帰線を離れて低下していくが、再溶融が発生する温度で直ちに接合強度が失われるわけではないことがわかる。このことが、再溶融不良のパッケージ寸法依存性を引き起こす要因と考えられる。

4. シミュレーションによるはく離発生評価

4.1 温度解析

実装基板全体を対象として有限体積法による3次元非定常熱伝導解析を行った。フロー炉に基板をいれる前の全体が均一温度の状態から、予熱、1次、2次はんだフロー、冷却までのプロセスの温度変化を求めた。格子数は約96万(249×124×31)である。

基板に実装される部品は、208ピンQFPを始めとする主要なパッケージとコネクタをモデル化した。また、基板の反りを防止する目的で取り付けられたジグ、およびフロー時に208ピンQFPの温度上昇を防ぐためにパッケージ上面に取り付けられた金属製のブロックも数値モデルに含まれ

Fig. 10 Numerical model for thermal analysis

ている。

QFPの数値モデルはダイパッド、リードフレーム、封止樹脂による内部構造を持つ。リードはピンの太さと隙間がほぼ等しく、リードフレーム材料の50%の熱物性値をもつ板状のリード群として扱った。リード群、パッケージ本体、基板により囲まれた狭い空間では粘性が支配的と考えられるため、この空間を満たす空気はほとんど動かずに熱伝導のみで熱を伝え、熱伝達には関与しないと仮定した。

208ピンおよび144ピンQFPについては、通常のモデルよりも空間解像度の高い詳細モデルを作成した。これは数値モデルを熱伝導解析と変形解析で共用するためであり、一列に並んだリードの中央付近および端付近において個々のリード、はんだ接合部を模擬し、細かい計算格子を使用するなど変形解析に必要な形状とメッシュを加えている。

簡略化モデルによる予備検討から、はんだ接合部のはく離を評価するために必要と判断されたパッケージにのみ詳細モデルを適用することにより、計算負荷の増加を抑制した。予備検討から、基板移動方向の直線上に4個並ぶ208ピンQFPのはんだ接合部温度は時間差のあるほぼ同一の温度変化であると思なせることがわかり、4個のパッケージのうち、2個のみ詳細モデルとした。解析モデルをFig. 10に示す。

基板表面には炉内の空気に対する熱伝達率、および溶融したはんだ温度(250±5°C)による温度境界条件を与えた。境界条件は基板の移動に伴ってモデル表面に与えられる場所が変化する。予熱時は炉内に設けられた棒状のヒータにより熱放射および炉内空気を介する対流熱伝達により基板は加熱される。熱放射による加熱分は予熱用ヒータの温度ばかりではなくヒータや実装基板、炉内形状にも依存するため扱いが非常に難しい。そのため、予熱時の境界条件は実測値に近くなるように条件を調整した対流熱伝達として扱った。溶融したはんだが接触している面ははんだ温度の温度境界条件、その他の面には炉内雰囲気温度に対して一定の熱伝達率で熱交換をすると仮定した。本解析では溶け

Fig. 11 Temperature distribution

たはんだが接触する帯状の領域は、時間がたつにつれて移動する。基板を支えるレールと基板の接触による熱の授受は無視した。

熱解析結果の例をFig. 11に示す。ここで示した時間は、基板の先端が1次フローにはんだに接触した時点をもととしている。基板は図の右から左に移動し、裏側がはんだフローにより加熱され、25秒後に2次フローを通過する解析条件である。図は基板表面の温度分布を描いているが、部品の熱容量により、部品が配置された付近の基板温度は変化し難いことがわかる。

4.2 応力解析

熱解析で得られた基板の温度分布を基に応力解析を行い、はんだ接合部に負荷されるせん断荷重を算出し、これと高温強度試験で得られたせん断強度の比較を行うことにより、はんだ接合部のはく離発生条件の検討を試みた。

まず、基板の温度分布を入力条件として基板の反り分布の解析を行った⁵⁾。解析結果の一例をFig. 12に示す。評価対象のQFP搭載位置における基板の変形曲率(x方向、y方向)と温度の時刻歴をFig. 13に示す。1次および2次フローはんだの接触による温度上昇により、x方向の基板曲率の時刻歴は2つの山を有する。1山目と2山目の曲率はほぼ同程度であるため、接合部のはく離が生じる可能性が高いのは、温度の高い2山目と考えられる。一方、y方向の曲率変化は、はんだが帯状に接触して移動するため、x方向と比較して非常に小さいことがわかる。

次に、はんだ接合部の負荷を算定するために、QFPと

Fig. 12 Warp distribution of PCB

Fig. 13 Time history of curvature and temperature of PCB

Fig. 14 Finite element analysis model for QFP

Sn-Ag-Cu 鉛フリーはんだ接合部を含む応力解析を行った。対称性を考慮したQFPの3次元有限要素解析モデルをFig. 14に示す。この有限要素解析では、着目するQFPのリード1本分を取り出してモデル化を行っている。これは基板の反り解析より、基板の移動方向と直交するy方向には基板の反りがほとんど発生しないという結果が得られたため、接合部のはく離の評価に際しては、x方向の反りによる負荷のみを算定すればよいと判断したためである。境界条件として、y方向に関して解析モデルの片面に対称条件、反

Table 1. Material properties

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
42 Alloy	147.0	0.30	3.4
Solder	20.0	0.39	23.0
Resin	20.0	0.24	11.0
Chip	170.0	0.28	3.5

Fig. 15 Deformation of PCB

Fig. 16 Time history of shear load for solder joint

対面に一樣変位条件を与えている。応力解析で用いた材料特性を Table 1 に示す。

熱解析で得られた温度分布の時刻歴を入力条件として有限要素解析を実施した結果の例として、変形図を Fig. 15 に示す。2 次フローが QFP 搭載位置を通過する前後の基板の反りを、変形倍率を拡大して示したものである。基板の反りに伴って、はんだ接合部に荷重が作用することになる。

各時刻歴ステップにおけるはんだ接合部に生じるせん断荷重と引張荷重を、有限要素解析で得られた QFP リード断面内における応力分布を積分することにより算出した。得られたせん断荷重と引張荷重の時刻歴を Fig. 16 に示す。基板の反りによるはんだ接合部への負荷は、せん断荷重の割

Fig. 17 Comparison of shear strength and maximum shear load by analysis

合が高いことがわかった。

最後に、はんだ接合部に生じるせん断荷重のピーク値を、高温強度試験で得られた結果と付け合わせると、Fig. 17 に示すように 180~185 $^{\circ}\text{C}$ の間でせん断強度と交わる結果が得られた。すなわち本解析条件に対しては、接合部温度がこの温度に達するとはく離発生という予測結果が得られた。このはく離発生の予測温度は、対応する実プロセスにおける再溶融によるはく離発生状況とよい対応を示した。以上の結果より、本研究で実施した高温強度試験によるはく離強度の温度依存性の取得、熱解析と応力解析によるはんだ接合部の負荷の算定という手順により、再溶融によるはく離の発生が評価できると考えられる。

5. 結 言

リフロー・フロー混載実装における鉛フリーはんだ接合部の再溶融によるはく離防止を目的として、QFP はんだ接合部の高温におけるはく離強度試験を実施するとともに、熱解析と応力解析に基づきはんだ接合部のはく離発生条件の検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高温強度試験の結果、Sn-Ag-Cu 鉛フリーはんだ中に生成される低融点三元合金の融点を越えた試験温度において、再溶融現象を再現することができた。
- (2) 高温強度試験で得られたせん断破断荷重から、はんだ接合部におけるはく離強度の温度依存性が明らかになった。この結果、低融点三元合金の融点である 178 $^{\circ}\text{C}$ で直ちに接合強度が失われるわけではないことがわかった。
- (3) 熱解析と応力解析に基づき基板の温度分布と反り分布を評価することにより、はんだ接合部に生じるせん断荷重を算出し、これをせん断強度と比較したところ、実プロセスにおける再溶融によるはく離発生条件と良い対応を示した。
- (4) 本研究で実施した高温強度試験によるはく離強度の温度依存性の取得、熱解析と応力解析によるはんだ接

合部の負荷の算定という手順により，再溶融によるはく離の発生が評価できる。

(2004.10.25-受理)

文 献

- 1) T. Nakatsuka, K. Serizawa, T. Soga, H. Shimokawa and A. Nishimura: "Reliability of Pb-free Solder Joints of Surface-mounted LSI Packages after Flow-soldering", Proceeding of 33rd International Symposium on Microelectronics, pp. 308-313, 2000
- 2) 百川裕希, 佐藤明弘, 河野英一, 金井政史: "鉛フリーはんだのリフロー, フロー混合プロセスにおけるQFPフィレット剥離現象", Proceeding of the 8th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Mate 2002, pp. 345-350, 2002
- 3) 寺崎 健, 永田達也, 斉藤直人, 高野信英, 大村智之, 菅原貞幸, 中塚哲也: "フローソルダーリング工程におけるリフロー面リードはんだ継手再溶融防止条件の検討", Proceeding of the 8th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Mate 2002, pp. 189-194, 2002
- 4) 日本工業規格: "鉛フリーはんだ試験方法—第6部: QFPリードのはんだ継手45度プル試験方法", JIS Z3198-6, 2003
- 5) 廣畑賢治, 久野勝美, 高橋浩之, 向井 稔, 川上 崇, 高橋邦明: "熱・変形・応力シミュレーションによる実装信頼性解析", エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 7, No. 7, pp. 581-587, 2004