

熱サイクル負荷を受けるSn-Ag系Pbフリー はんだ接合部の破断寿命評価

荘司 郁夫*, 森 史成**, 藤内 伸一**, 山下 勝***

Rupture Life of CSP Solder Joints with Sn-Ag Lead-Free Solders under Thermal Cycle Condition

Ikuo SHOHJI*, Fuminari MORI**, Shinichi FUJIUCHI** and Masaru YAMASHITA***

*日本アイ・ピー・エム株式会社野洲事業所電子回路部品技術 (現・群馬大学工学部 〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

**日本アイ・ピー・エム株式会社野洲事業所電子回路部品技術 (〒520-2392 滋賀県野洲郡野洲町市三宅800)

***株式会社アイテス (〒520-2392 滋賀県野洲郡野洲町市三宅800)

*Card Engineering, Yasu, IBM Japan, Ltd., Presently at Gunma University (1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma 376-8515)

**Card Engineering, Yasu, IBM Japan, Ltd. (800 Ichimiyake, Yasu-cho, Yasu-gun, Shiga 520-2392)

***International Test & Engineering Services Co., Ltd. Yasu (800 Ichimiyake, Yasu-cho, Yasu-gun, Shiga 520-2392)

概要 Sn-Ag系Pbフリーはんだを用いた0.5mmピッチCSP接合部を研究対象として、熱サイクル試験により接合部に熱サイクル負荷をかけ、接合部の破断寿命を評価した。平均破断寿命値で比較すると、Sn-3.5Ag>Sn-3.5Ag-0.76Cu>Sn-37Pb>Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Biなる序列が得られた。Sn-3.5AgおよびSn-37Pbはんだによる接合部では、接合界面近傍のはんだ層内をクラックが進展し破断に至るが、Sn-3.5Ag-0.76CuおよびSn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Biはんだの場合には、CSP側の電極/はんだ界面に形成されたCu-Sn-Ni三元化合物層と電極界面およびはんだとの界面をクラックが進展して破断に至ることが明らかとなった。破断モードが界面破断の場合には、破断寿命の試料依存が大きく寿命予測の信頼性は低下する。

Abstract

A thermal fatigue life evaluation was performed for 0.5 mm pitch CSP solder joints with several Sn-Ag lead-free solders. Comparing the average of fatigue life, the experimental result showed Sn-3.5Ag > Sn-3.5Ag-0.76Cu > Sn-37Pb > Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi. A crack grew in solder near a joint interface in the joints with Sn-3.5Ag and Sn-37Pb. However, a crack growth occurred at a interface between Cu-Sn-Ni compound and a pad or solder in the joints with Sn-3.5Ag-0.76Cu and Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi. When the interfacial cracking was a dominant rupture mode, the fatigue life of each test piece scattered widely. The reliability of a prediction for thermal fatigue life decreases in the case of solder joints which rupture at a joint interface.

Key Words: Lead-Free Solder, Sn-Ag Alloy, Chip Size Package, Thermal Fatigue, Microstructure, Rupture

1. 緒言

鉛の地球環境に対する環境負荷の問題から、近年Pbフリーはんだに関する研究が盛んに行われ^{1)~4)}、量産実用例も見られるようになってきている⁵⁾⁶⁾。しかし、その研究対象のほとんどはQFP(Quad Flat Package)などの表面実装型部品や挿入型部品に関するもので、より小さな接合部構造をもつ面実装型部品のCSP(Chip Size Package)やフリップチップ接合に関するものは少ない^{2)~4)}。

前報では、今後さらなる需要が見込まれる0.8mmピッチCSPのはんだ接合部に注目し、各種Sn-Ag系Pbフリーはんだによる接合部を形成し熱サイクル試験を施した。その成果として、接合部に生成するクラックの進展性が接合部の組織に大きく依存することを示した。さらに、パッケージサイズが比較的小さくかつ接合部サイズが比較的に大きな場合には、熱サイクル試験中に接合部に負荷される応力が相対的に小さくなるため、数千サイクル程度の熱サイクル

試験では接合部の破断は観察されず、接合部の信頼性は実用上十分なレベルであることが明らかとなった⁷⁾。しかし、接合部の破断が観察されなかったがゆえに十分な熱疲労寿命評価までには至らなかった。

そこで、本研究では、前報よりもさらに小さな接合部を試験対象として、各種Pbフリーはんだを用いたはんだ接合部の熱サイクル負荷環境における破断寿命を評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究では、TABテープをインタポーザに使用したキャリアタイプのCSPを供試材として用いた。CSPのパッケージサイズは12×12mmであり、はんだ接合用電極が外周周辺部に0.5mmピッチで2列に、合計116個配されている。インタポーザ基板には、チップサイズ8×8mmのダミーのSiチップが基板の中心部にフリップチップ方式により

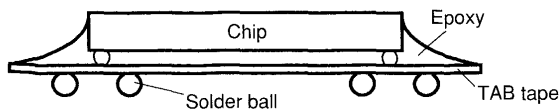


Fig.1 Schematic of CSP cross sectional view

Table 1. Solder type

Solder type (mass%)	Solidus Temp. (°C)	Liquidus Temp. (°C)
Sn-3.5Ag	221	221
Sn-3.5Ag-0.76Cu	216	220
Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi	189	214
Sn-37Pb	183	183

実装されている。はんだ接合用電極はダミーチップの内側下部に52個、外側下部に64個配された位置関係をとる。ダミーチップはエポキシ樹脂によって樹脂封止されるため、チップの外側位置に配された電極はアンダーフィル材の下部に配された位置関係をとる (Fig. 1 参照)。本研究で用いたFig. 1 のような断面構造を持つCSP単体の線膨張係数 (X, Y方向) は、16.4ppm/°Cであった。

CSPには、Table 1 に示す 4 種類の組成の直径0.3mmのはんだボールを、各電極に搭載した。本研究では、Table 1 に示す 3 種類のSn-Ag系Pbフリーはんだと、比較のためにSn-37Pbはんだを加えた 4 種類のはんだ材を試料として用いた。前報⁷⁾では、20mass%Biを添加したのも試料として用いたが、20mass%Bi添加はんだは成形性に劣り、0.3mm径のボールの形成が困難であったため今回の試料からは除外している。また、20mass%Bi添加はんだにおいては、熱サイクル試験中に表面形状が樹枝状に変化し、その樹枝状部がはがれ落ちて基板表面に付着するため、狭ピッチ接合部においては電極間短絡の危険性がある⁷⁾。Biを多量に添加したはんだ材は、そのような信頼性低下因子をかかえることから、今回の評価対象からは除外した。なお、CSP側の電極端子材のCuは電解めっき法により、Ni/Au表面処理が施されているものを用いた。Ni, AuはCu電極上に順にそれぞれ平均で3, 0.1 μ mの厚みで形成されている。

各CSP試料は、リフローソルダリング法により基板厚0.75mmの評価用FR-4基板上に実装された。実装時には、接合部中へのボイドの発生をできるだけ抑制するために基板側へのはんだペーストの供給は行わず、基板側へフラックスのみを供給して接合部を形成した。FR-4基板側のCu電極材の表面処理に関しては、CSP側のものとは異なり、表面めっき処理は施されていない。リフロー条件は、ピーク温度が各はんだの液相線温度+20 \pm 2°C、液相線温度以上での保持時間が70 \pm 10sとなるように調整した。Fig. 2 にリフローソルダリング後の接合部の断面観察例を示す。

2.2 熱サイクル試験

Fig. 2 のような断面形状を持つCSPはんだ接合部に対し、熱サイクル試験 (-40~80°C, 2 cycles/hour) を施した。熱サイクル試験は、約100サイクル終了ごとに四端

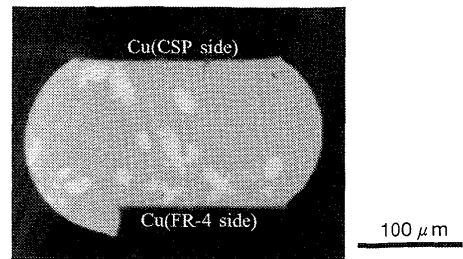


Fig.2 Microstructure of CSP solder joint (Sn-37Pb)

子法により接合部の電気抵抗値を測定し、接合部の破断の有無を確認しながら10000サイクルまで行い、各接合部の破断寿命を評価した。なお、試料数は各はんだ材ごとに5個とした。

2.3 組織観察

CSPはんだ接合部のリフロー直後の初期組織および熱サイクル試験後の破断組織について、組織観察を行うために、接合部断面に機械的研磨 (エメリー研磨とバフ研磨) を施して試料とした。各試料に対しSEM(Scanning Electron Microscope)を用いて組織観察を行い、同時にEPMA (Electron Probe X-ray Microanalyzer)定量分析により生成相の同定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 接合部初期組織

はんだ相の初期組織に関しては、0.8mmピッチCSPを用いた前報⁷⁾の結果と同様の組織が観察された。すなわち、Sn-3.5AgおよびSn-3.5Ag-0.76Cuを用いた接合部のはんだ相は、Snをマトリックスとして、1 μ mからサブミクロンオーダーの粒状のAg₃SnがSnの粒界および粒界近傍へネットワーク状に分散した構造を呈する。また、はんだ相中には数 μ m程度の大きさのCu₆Sn₅相、および初晶と思われる針状のAg₃Sn相の生成も認められた。Biを添加したSn-1.9Ag-7.6Bi-0.5Cuはんだを用いたものについても、前報⁷⁾と同様、SnをマトリックスとしてBi, Ag₃Sn, Cu₆Sn₅相が数 μ mのオーダーで分散した組織となっていた。

Table 2 に初期接合部中で観察された生成相に関して、各はんだ材ごとにまとめた結果を示す。各生成相はEPMA分析による定量分析結果と各系の平衡状態図より推定されたものを示している。接合界面の生成相も若干の組成の違いは見られるものの基本的には前報⁷⁾で観察された相と同等の相が生成している。CSP側のNi/Auめっき層とはんだとの界面にはいずれのはんだ材の場合もCu/Sn/Ni 3元化合物層の生成が認められた。今回用いた試料中、最もSn, Cuの含有量の多かったSn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.76Cuはんだの接合界面においては、それぞれよりSn, Cu-richなNi₃Sn₄, Cu/Sn/Ni 3元化合物層の生成が見られた。一方、FR-4側のCu電極との界面においては、今回評価したいずれのはんだ材においても数at%のNiを固溶したCu₆Sn₅層の生成が見られた。これらの生成相は、熱サ

Table 2. Probable formation phases in initial joints by EPMA analysis

Solder type (mass%)	Formation phase		Cu pad side
	Ni/Au plating pad side	in Solder	
Sn-3.5Ag	Ni ₃ Sn ₄ , Cu/Sn/Ni*	Sn, Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅	Cu ₆ Sn ₅
Sn-3.5Ag-0.76Cu	Cu/Sn/Ni*, Cu/Sn/Ni**	Sn, Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅	Cu ₆ Sn ₅
Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi	Cu/Sn/Ni*	Sn, Bi, Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅	Cu ₆ Sn ₅
Sn-37Pb	Cu/Sn/Ni*	Sn, Pb, Cu/Sn/Ni**	Cu ₆ Sn ₅

*, Cu : Sn : Ni = 35 : 45 : 20. **, Cu : Sn : Ni = 45 : 45 : 10 (at%)

イクル試験後もその成長は見られるものの生成相自体の変化は認められなかった。

3.2 熱サイクル試験後の破断部組織

Fig. 3 に熱サイクル試験により破断したSn-37PbはんだとSn-3.5Agはんだによる接合部の断面観察例を示す。Fig. 3 中の下段の図はそれぞれ上段の図を拡大したものである。いずれのはんだ材においても、クラックはCSP側に発生し進展している。クラックはCSP側のパッドとはんだとの界面に生成したCu/Sn/Niの3元化合物層近傍のはんだ層中を進展している。8600サイクル終了後に破断が確認されたSn-3.5Agはんだによる接合部においては、Fig. 4 に示すように、はんだ層中に粒界割れに起因するクラックの進展も確認された。Fig. 4 は、Fig. 3 に示した8600サイクル終了後の組織に対して塩酸5%混合メタノール溶液中で腐食した後の光学顕微鏡組織を示している。応力集中部である界面近傍でクラックが発生しても数千サイクル程度で破断に至らない場合には、Fig. 4 で見られるようなはんだ層内部での粒界割れに起因するクラックの進展も認められるようになる。

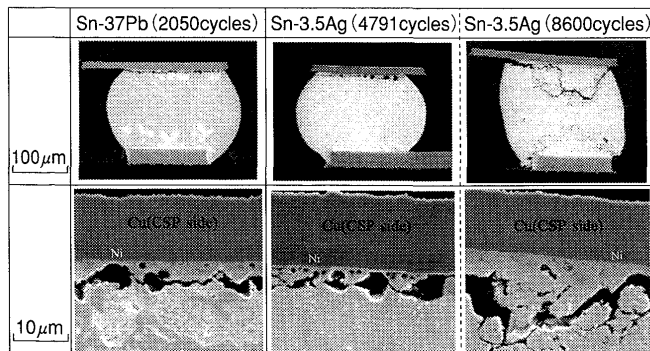


Fig.3 Microstructures of cracked solder joints with Sn-37Pb and Sn-3.5Ag after thermal cycle test

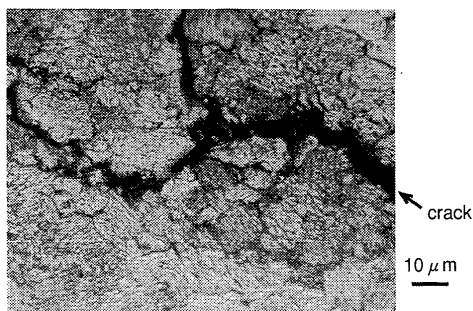


Fig.4 Optical microstructure of Sn-3.5Ag solder joint after 8600 cycles

Fig. 5 にSn-1.9Ag-0.52Cu-7.6BiおよびSn-3.5Ag-0.76Cuはんだによる接合部に生じたクラックの断面観察例を示す。Fig. 3 と同様、図中の下段は上段の図を拡大したものである。いずれのはんだ材の場合とも、Fig. 3 で示した接合部とは破断モードが異なり、クラックは、CSP側パッドとはんだ層との界面に生成したCu/Sn/Ni 3元化合物層とNi電極層との界面を進展し、破断に至っている。また、Cu/Sn/Ni 3元化合物層とはんだ層との界面を進展する場合も観察された。Sn-Ag系PbフリーはんだにBiを添加していくと、Bi含有量が増すほどはんだ材自身の強度が急激に高くなり、伸びも急減することが報告されている⁹⁾。はんだ層の強度が高くなり延性が低下すると、熱サイクル試験中に接合部に生じる熱応力をはんだ層自身で十分に緩和できなくなり、比較的脆い3元化合物層との界面部において破断が生じるものと考えられる。本研究で観察された破断モードと同様の結果がSn-3.5AgとSn-3.5Ag-5Biはんだ接合体を用いたせん断疲労試験によっても確認されている⁹⁾。Sn-Ag系PbフリーはんだにCuを添加する場合にも、Bi添加ほどではないが、はんだ材自身の強度上昇および延性低下することが報告されており⁹⁾、Bi添加の場合と同様の効果により、界面部での破断が観察されたものと考えられる。

3.3 破断寿命解析結果

Fig. 6 に熱サイクル試験により得られたサイクル数と累積破断率との関係を対数正規プロットした結果を示す。対数正規プロットは、古くよりはんだの熱疲労寿命解析に用いられ¹⁰⁾、平均寿命を評価する際にはワイブルプロットか

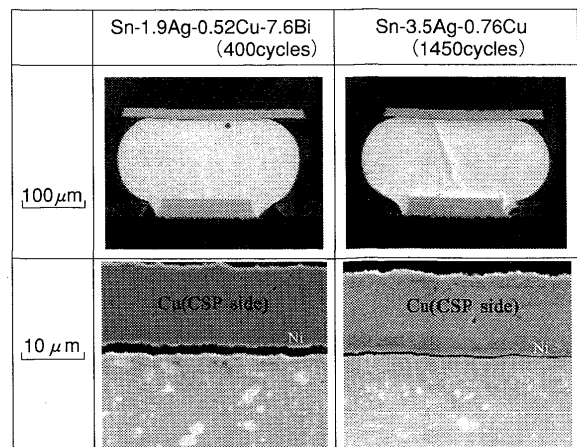


Fig.5 Microstructures of cracked solder joints with Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi and Sn-3.5Ag-0.76Cu after thermal cycle test

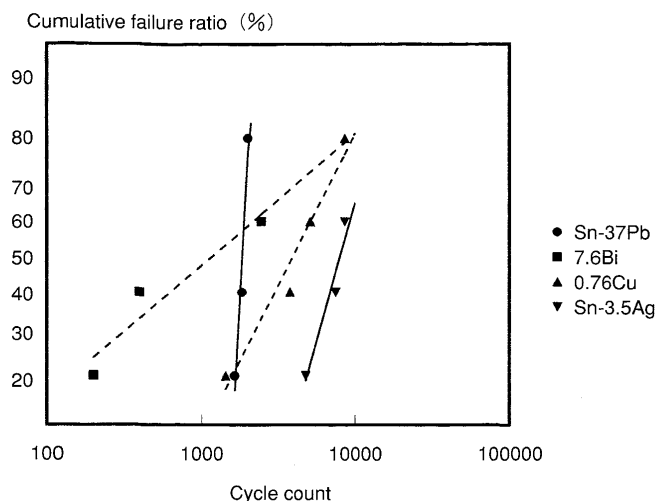


Fig.6 Relationship of cumulative failure ratio and cycle count (lognormal plot)

Table 3. Mean life of CSP solder joints

Solder	Mean life (cycles)
Sn-37Pb	1863
Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Bi	1160
Sn-3.5Ag-0.76Cu	3946
Sn-3.5Ag	8006

ら得られる結果とよく一致することが知られている¹¹⁾。そこで、本研究でも対数正規プロットを行った。

Fig. 6 中の直線は各はんだ材ごとのデータの最小自乗近似から得られたものである。実線は、はんだ層中をクラックが進展して破断に至ったものを、点線は、3元化合物層とNi層または、はんだ層との界面をクラックが進展して破断に至ったものを示している(3.2参照)。平均寿命値(各直線が累積破断率50%を横切るサイクル数)をTable 3に示したが、平均寿命値で比較すると、Sn-3.5AgおよびSn-3.5Ag-0.76CuがSn-37Pbに比べ優れた破断寿命値を示すことがわかる。特にSn-3.5Agはんだの場合には、Sn-37PbおよびSn-3.5Ag-0.76Cuの寿命値に対しそれぞれ約4倍、2倍もの寿命値を示す。

また、直線の傾きに注目すると、はんだ層内をクラックが進展して破断に至るSn-37PbおよびSn-3.5Agはんだの場合のほうが、3元化合物層の界面で破断に至るSn-1.9Ag-0.52Cu-7.6BiおよびSn-3.5Ag-0.76Cuはんだの場合よりも大きくなる。すなわち、はんだ層内をクラックが進展するSn-37PbおよびSn-3.5Agはんだの場合には、破断寿命値のばらつきがきわめて小さいことがわかる。

一方、3元化合物層の界面をクラックが進展して破断に至るSn-1.9Ag-0.52Cu-7.6BiおよびSn-3.5Ag-0.76Cuはんだの場合には、試料によって破断寿命値が大きく異なるため、破断寿命値の試料依存性が大きくなり、寿命予測の信頼性は低下する。そのため、従来のはんだ接合部とは異なり、界面破断によって破断に至るような接合部の熱疲労寿命予測に関しては、今後さらなる検討が必要であるものと考え

る。

4. 結 言

本研究では、Sn-Ag系Pbフリーはんだを用いたCSPはんだ接合部を研究対象として、熱サイクル試験を行い、接合部の熱疲労破断寿命評価および熱疲労組織観察を行った。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 本研究で用いたいずれのはんだ材とも、熱サイクル試験により接合部の破断が認められ、平均寿命値で比較すると、Sn-3.5Ag>Sn-3.5Ag-0.76Cu>Sn-37Pb>Sn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Biの序列となった。
- (2) Sn-3.5AgおよびSn-37Pbはんだによる接合部では、接合界面近傍のはんだ層内をクラックが進展し破断に至るが、Sn-3.5Ag-0.76CuおよびSn-1.9Ag-0.52Cu-7.6Biはんだの接合部では、CSPパッド側に形成されたCu/Sn/Ni 3元化合物層とNi層または、はんだ層との界面をクラックが進展して破断に至る。
- (3) 接合界面部をクラックが進展して破断に至る場合には、はんだ層中をクラックが進展する場合に比べ、熱疲労寿命値の試料依存性が大きいいため、疲労寿命予測の信頼性は低下する。

(2000.8.30-受理 2001.1.19-再受理)

文 献

- 1) 例えば Journal of Electronic Materials, Vol.23, No.8, 1994
- 2) 例えば Proc. of Mate '99 symposium, 1999
- 3) 例えば Proc. of Mate 2000 symposium, 2000
- 4) 例えば Proc. of 2000 IEMT/IMC symposium, 2000
- 5) 平野正人, 末次憲一郎, 山口敦史, 桑田秀典, 宇治和博, 高野宏明: “鉛フリーはんだの接合技術の開発とその実用化”, Proc. of Mate '99 symposium, pp.393-396, 1999
- 6) 鈴木元治, 松岡 洋, 河野英一, 酒井 浩, 五十嵐 誠, 小野寺清雄: “Sn-Zn系鉛フリーはんだのリフローへの適用”, Proc. of Mate 2000 symposium, pp.325-328, 2000
- 7) 荘司郁夫, 森 史成, 藤内伸一, 山下 勝: “Sn-Ag系鉛フリーはんだを用いたマイクロ接合部の熱疲労組織”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.4, No.2, pp.133-137, 2001
- 8) 竹本 正, 高橋昌宏, 松縄 朗, 二宮隆二, 田井英男: “Sn-Ag-Bi系Pbフリーソルダの引張変形挙動”, 溶接学会論文集, 第16集, 第1号, pp.87-92, 1998
- 9) 須賀唯知: “鉛フリーはんだ技術”, 日刊工業新聞社編, 1999
- 10) K.C.Norris and A.H.Landzberg: “Reliability of Controlled Collapse Interconnection”, IBM Journal of Research and Development 13, pp.266-271, 1969
- 11) Donald R.Banks and David Gerke: “Assembly and reliability of CCGAs”, Circuits Assembly June 1995, pp.60-65, 1995