

鉛フリーはんだ実装技術

Lead-Free Soldering Technologies

前原 洋一郎

MAEHARA Yoichiro

忠内 仁弘

TADAUCHI Masahiro

川上 崇

KAWAKAMI Takashi

東芝は、第3次環境ボランタリープラン(環境自主行動計画)で策定した鉛削減計画に基づき、2000年度から製品基板への鉛(Pb)を含まないはんだ(以下、鉛フリーはんだと呼ぶ)の採用を進めている。2002、2003年度には、鉛フリーはんだの製品適用拡大のため、鉛フリーはんだのリフロー・フロー混載実装技術、プロセスマージンの広いすず-亜鉛(Sn-Zn)系鉛フリーはんだの実装技術、基板の完全鉛フリー化のために必要な半導体部品外装めっきの鉛フリー化について検討してきた。更に信頼性設計技術の開発と、実装工程診断や技能教育など生産現場へ技術を展開する仕組みを構築した。

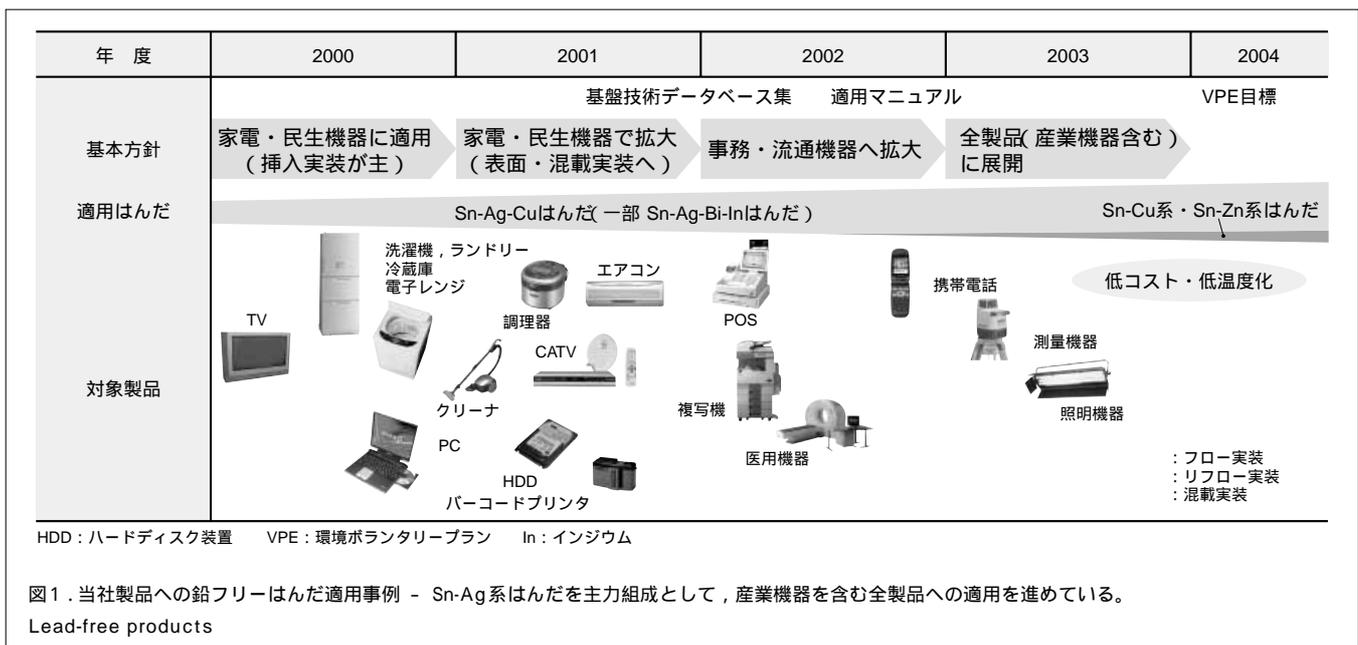
Toshiba's third voluntary plan (voluntary environmental action plan) includes the theme of lead reduction. Based on this plan, we have been expanding the application of lead-free soldering to products since fiscal 2000.

In fiscal 2002 and 2003, we investigated reflow/flow lead-free soldering technology to expand its application, the Sn-Zn soldering process to widen the process margin, and lead-free solder coating technology for the leads of electronic devices to make completely lead-free products. We have also applied reliability design technology, a diagnosis system for lead-free soldering processes, and a skill education system for lead-free soldering to the manufacturing scheme.

1 まえがき

かけがえのない地球環境を健全な状態で次世代に引き継ぐために、“環境と調和した経済社会の構築”が求められている。企業としても、環境に調和した経済活動と社会の構築に向けて良き企業市民としての社会的責任と役割が大きくなっており、企業の自主的な取組みを網羅した環境ボランタ

リープランが不可欠なものとなっている。東芝グループでは、1999年度末に定めた第3次環境ボランタリープランにより、資源の有効活用、地球温暖化防止、化学物質の管理強化、環境調和型製品の開発、使用済み製品の地球環境負荷の低減に努め、循環型社会の実現に向けて技術革新を進めている。環境負荷に影響を及ぼす鉛入りはんだに関しては、第3次環境ボランタリープランの1項目として、2003年度までに当社全製品



に対して鉛フリーはんだを採用することを公表している⁽¹⁾。具体的には、図1に示すように2000年度から主要家電製品やパソコン(PC)に順次採用を開始し、既に、家電・民生機器(冷蔵庫, テレビ(TV), ホームランドリー, 洗濯機, クリーナー, 電子レンジ, PC, 携帯電話機, プリンタなど), 事務・流通機器(複写機, POS(Point Of Sales)など), 産業機器(測量機器, 照明機器など)などの約50製品で鉛フリーはんだを採用している。

2 鉛フリー実装の技術課題

当社では2001年度までに、家電・民生機器の主要プロセスであるリフロー・フロー実装へ、すず銀(Sn-Ag)系を主力組成とした鉛フリーはんだを適用する技術を確立した⁽²⁾。2002, 2003年度には、事務・流通機器や産業機器の主要プロセスであるリフロー・フロー混載実装への鉛フリーはんだ適用技術を開発し、当社製品への鉛フリーはんだ採用を拡大してきた。

ここでは、リフロー・フロー混載実装基板のプロセス開発とプロセスマージンを広げるSn-Zn系はんだのフロー実装技術の取組みについて述べ、更に実装基板の完全鉛フリー化に対する取組みとして、半導体部品外装めっきの鉛フリー化について検討した事例について述べる。

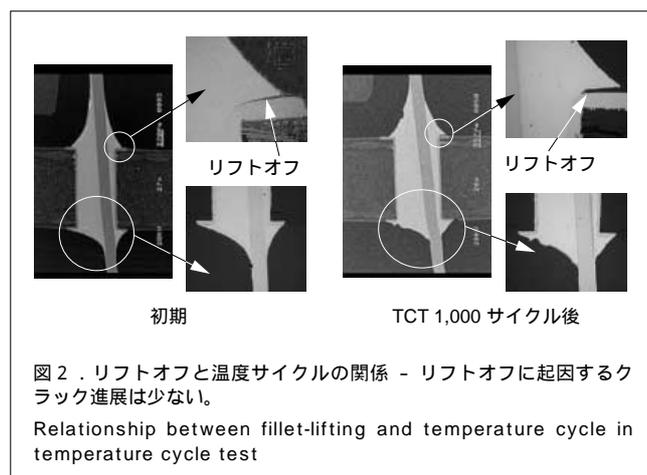
2.1 リフロー・フロー混載実装プロセス

リフロー・フロー混載実装基板(以下、混載実装基板と略記)とは、表面実装部品をリフロー実装後、挿入実装部品をフロー実装する基板である。混載実装基板の鉛フリー化における課題は、部品外装めっきと使用する鉛フリーはんだ(すず銀-銅(Sn-Ag-Cu)はんだ, Sn-Cuはんだ)の組合せで実装品質や接合信頼性が変化することである。特に、現行のSn-Pbめっき部品を用いた場合には、次のことが課題となる。

- (1) フロー実装時に、挿入実装部品のはんだ接合部が部分的に剥離(はくり)するリフトオフや、表面実装部品のはんだ接合部が部分的に剥離する再溶融剥離などが発生する。
- (2) 再溶融剥離とフロー実装品質はトレードオフの関係があり、フロー実装時のプロセス条件の管理が難しくなる。

事例として、Sn-Cu系はんだで実装したテスト基板においてリフトオフの進行性を評価した結果を図2に示す。接合部の断面観察から、スルーホール内部に到達するようなクラックは確認できなかった。製品への鉛フリーはんだの適用可否に関しては、前記の基礎評価に加え、製品基板での接合信頼性評価と機能評価を行ったうえで最終判断する。

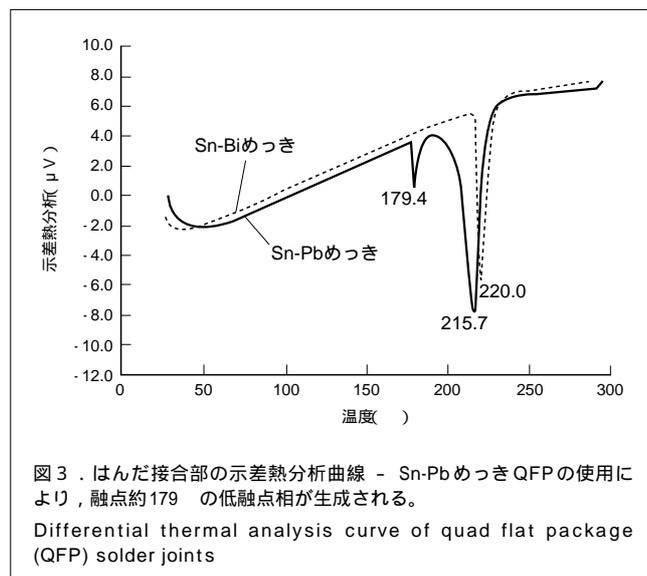
再溶融剥離は、フロー実装時のQFP(Quad Flat Package)のリード接合部温度、リード材質、リードめっき、基板の材質、

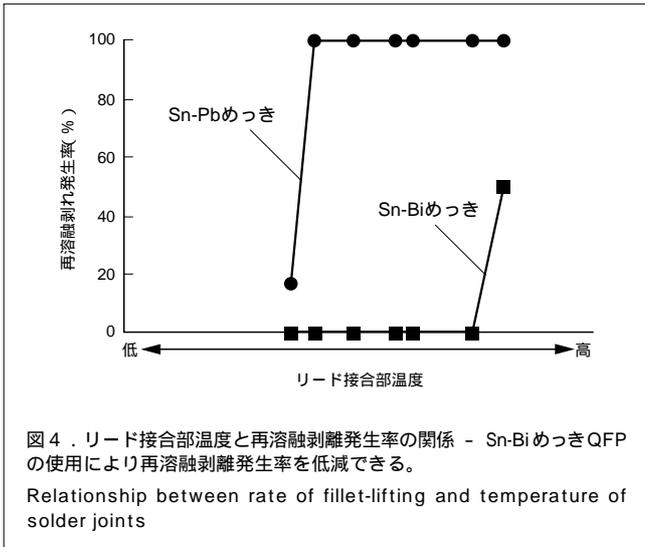


など様々な要因により発生することが確認されている。Sn-PbめっきQFPとすず-ビスマス(Sn-Bi)めっきQFPをSn-Ag-Cuはんだでフロー実装したはんだ接合部の示差熱分析結果を図3に示す。図3からわかるように、Sn-PbめっきQFPを使用した場合、接合部に生成するSn-Ag-Pbの低融点相(融点: 約179)が再溶融剥離の発生する原因の一つであると言える。しかし、フロー実装時の基板や部品の反りが再溶融剥離に与える影響も大きく、表面実装部品のボディ形状やサイズによっても発生頻度が異なる。対策として次のことが挙げられる。

- (1) 鉛フリーめっき部品を採用する。
- (2) フロー実装時における表面実装部品のはんだ接合部の温度を、挿入部品の実装品質に悪影響を与えない程度に抑える。

図3から、Sn-BiめっきQFPはんだ接合部には、Sn-Ag-Pbの低融点相が生成されないため、179 付近の吸熱ピークが見られないことがわかる。



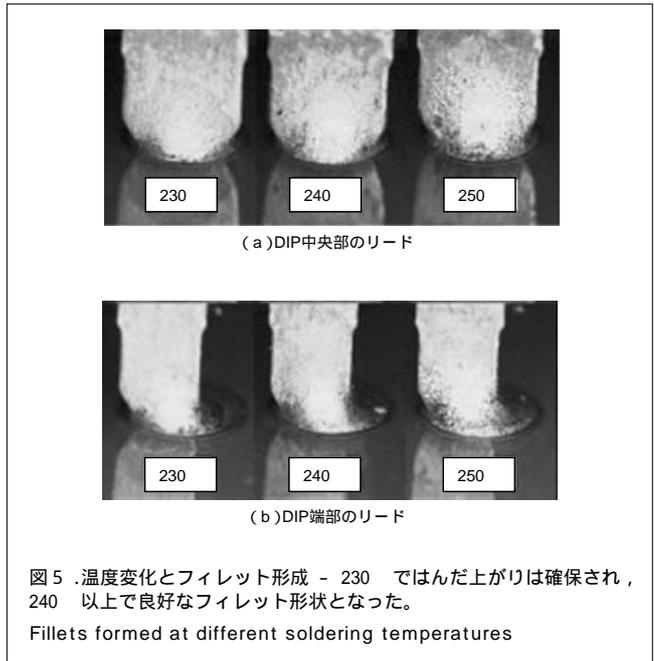


Sn-BiめっきQFP及びSn-PbめっきQFPを使用した場合の再溶融剥離発生率を図4に示す。Sn-BiめっきQFPを使用した場合は、Sn-PbめっきQFPを使用した場合と比較して、再溶融剥離の発生するリード接合部温度が高温側にシフトしており、フロー実装のプロセス条件が広がることわかる。現在、混載実装基板については、プロセス条件の適正化に加えて、鉛フリーめっき部品の採用により再溶融剥離を防止している。

2.2 Sn-Zn系はんだのフロー実装

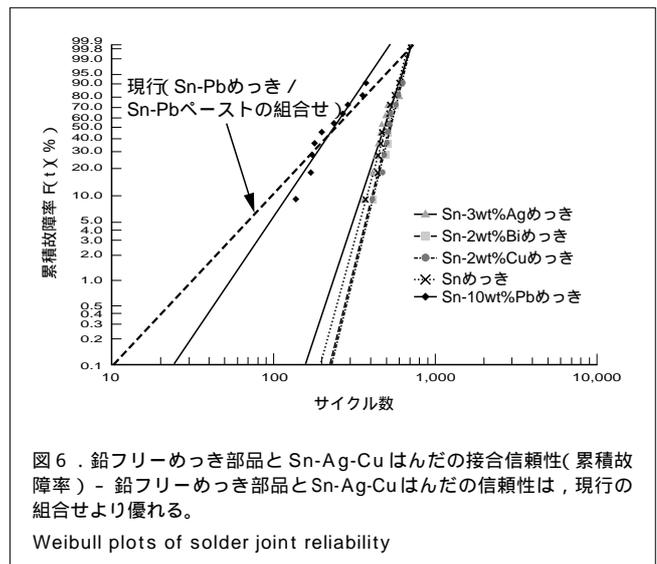
リフロー・フロー実装におけるはんだ付け温度は、使用するはんだの融点以上であり、かつ使用する部品の耐熱温度以下であることが必要である。Sn-Zn系はんだはSn-Ag系はんだに比べて融点が高いため、はんだ付けプロセスのマーヅンが広がる。そのため、実装時の基板内温度分布がばらつくために、鉛フリー化が難しい大型混載基板にはSn-Zn系はんだの適用が期待されている。Sn-Zn系はんだはリフロー実装での適用事例が報告されているが⁽³⁾、フロー実装では課題が多い。ここでは、窒素雰囲気においてSn-Zn共晶はんだのフローはんだ付けを検討した事例について述べる。

挿入部品としてSn-PbめっきリードのDIP(Dual In-line Package)をCuプリフラックス基板に実装し、はんだ上がりについて調べた。Sn-Znはんだ用フラックスを基板にスプレー塗布し、コンベアスピード1.0 m/min、酸素濃度50 ppm以下の雰囲気中でフロー実装した。図5に示すように、はんだ槽温度230℃ではんだ上がりが確保され、はんだ槽温度を240℃にするとフィレット形状が良好となった。次に、はんだ槽温度を240℃に固定し、酸素濃度を変化させてはんだ上がりを確認した。その結果、酸素濃度1,000 ppm以下であればSn-Znはんだのはんだ上がりは良好であった。以上のことから低酸素濃度雰囲気であれば、Sn-Znはんだを適用できることが明らかになった。



2.3 半導体部品外装めっきの鉛フリー化

実装基板の完全鉛フリー化を実現するには、半導体部品外装めっきの鉛フリー化が必要となる。ここでは半導体部品外装めっきと鉛フリーはんだペーストの組合せについて検討した結果について述べる。TSOP(Thin Small Outline Package)における各種鉛フリーめっき部品とSn-Ag-Cuはんだの接合信頼性を評価した結果の一例を図6に示す。部品の鉛フリー外装めっきの候補であるSn-Ag、Sn-Bi、Sn-Cu、Snに現行のSn-Pbめっきを加えた5種類の部品を評価した結果、いずれの組合せも現行(Sn-Pbめっき / Sn-Pbはんだペースト)と同等以上の接合信頼性を持つことがわかった。また、Sn-Ag-Cuはんだを用いる場合は、鉛フリーめっき部品を使



用したほうが高い接合信頼性が得られ、部品外装めっきの鉛フリー化も同時に進めるべきであることが示唆された。これらの接合信頼性に関するデータを製品の実装設計に使用している。

3 信頼性設計技術

IT(情報技術)機器の高性能化やモバイル化に伴い、はんだ接合部を対象とした信頼性設計の重要性が増しており、ここでは鉛フリーはんだ接合部の熱疲労設計と実装基板の耐落下設計について述べる⁽⁴⁾。

半導体部品の高性能化とともに素子の発熱量も増加しており、機器の電源のON/OFFに伴う温度変化幅も増える傾向にある。一方、電子部品と実装基板を接合する形態は短寸・微細化している。その結果、部品と実装基板の熱膨張差に起因してはんだ接合部に繰り返し発生する熱応力も大きくなっており、はんだ接合部の金属疲労に対する設計は、今や機器の高性能化と信頼性を両立させるためには欠かせない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

一般に疲労寿命は、材料の疲労特性と応力集中部位の応力やひずみ変動幅から予測できる。特に、はんだは軟らかく延性に富んでおり、実装基板に温度変化サイクルが加わると、はんだ接合部は永久変形を伴う非弾性挙動を呈しながら、低サイクル疲労破壊を起こすことがある。また、接合部の寸法は小さく、その中で更に局所に集中する応力やひずみを直接計測することは難しく、非弾性の応力シミュレーションが計測の代わりに用いられることも多くなっている。

疲労防止技術や応力シミュレーション技術は、高温エネルギー機器を対象に技術開発が進められてきた経緯もあり、当社においてはこれまでの貴重な経験を生かし、はんだ接合部の信頼性設計について業界をリードしてきている。

まず、各種の鉛フリーはんだ素材について、低サイクル疲労試験により取得した疲労線図を図7に示す⁽⁷⁾⁽⁸⁾。負荷量を表す非弾性ひずみ範囲から破損寿命を読み取ることができる。Bi添加量の多いSn-Zn-Bi系を除いていずれの鉛フリーはんだも、疲労強度はSn-Pb共晶はんだと同等以上であり、また強度の温度依存性も少ない。

疲労寿命を予測するうえで、応力シミュレーションの精度の影響は大きい。特に、はんだ材は、一定の応力が作用している間にもひずみが時間とともに増加してしまうクリープ特性を顕著に示すため、材料モデリングが重要となる。ここでは、名古屋大学と共同開発したSn-Ag-Cuはんだの材料モデリングについて述べる。室温における実際の引張試験結果と材料モデリングを用いてシミュレートした数値試験結果を図8に示す。非弾性ひずみ速度を定常部分に限った旧材料モデルに比べ、過渡部分と定常部分から成るとした新材料

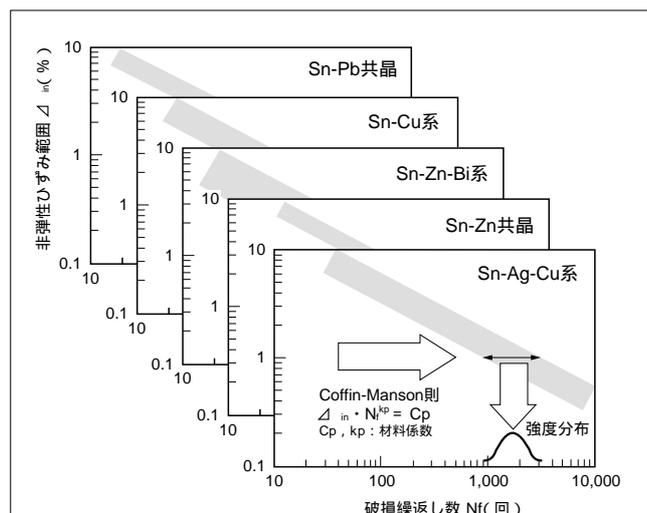


図7. 鉛フリーはんだ材の疲労特性 - 代替材料は、おむね鉛はんだ材と同等以上の強度を持つ。

Fatigue characteristics of lead-free solder materials

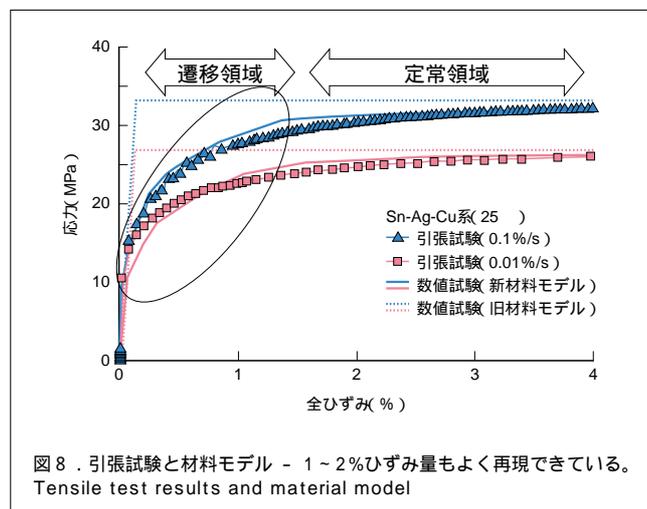


図8. 引張試験と材料モデル - 1~2%ひずみ量もよく再現できている。

Tensile test results and material model

モデルでは、IT機器設計でもっとも重要な1~2%ひずみ量の遷移領域でも試験結果を忠実に再現できている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

温度サイクル試験(TCT: Thermal Cycle Test(品質保証のための過負荷試験))に供した際のBGA(Ball Grid Array package)はんだ接合部に生じる相当ひずみ範囲分布を図9に示す。パッケージ側界面端の集中ひずみ量に基づいて疲労線図から読み取った予測寿命は、実際の試験寿命とよく相関がとれており、この予測法の妥当性が示され、設計に適用されている⁽⁷⁾。

モバイル機器に使用される実装基板では、はんだ接合部の耐落下設計が必要となる。一般的に落下衝撃時にはんだ接合部に働く力は、次のように大別される。

- (1) 実装基板がたわんだことにより発生する力
- (2) 実装部品の慣性力により加わる力

モバイル機器には一般的に軽薄短小部品が採用されるた

4 鉛フリー実装技術の生産現場への展開

前章までに述べた開発技術が、もの作りの現場にまで展開されて鉛フリーはんだ製品が実現できる。この仕組みとして、当社が取り組んでいる工程診断と技能教育の事例について述べる。

4.1 鉛フリー工程診断の事例

鉛フリーはんだで量産ラインを立ち上げるには、工程の品質管理が重要である。そこで、Sn-Pbはんだと鉛フリーはんだの技術的に異なる点(溶融温度が高く、ぬれ性が劣るなど)から重要管理因子を抽出し、管理レベルの良否を定量的に把握して工程を診断している。

鉛フリー工程診断の範囲とその内容を表1に示す。範囲は、部品管理や外観検査を中心とする共通項目、リフロー工程項目、フロー工程項目、手付け工程項目の四つに分類しており、各分類ごとにチェックリスト(計31項目)を作成している。チェックリストには各診断内容に対して4段階程度の評価基準があり、その基準と照らし合わせて現在がどのレベルにあるかをチェックする。チェックした評価基準から評価点数を算出し、各項目の評価点を加算した総合点によってAからDの4段階に診断される。この診断結果は、鉛フリーはんだ実装の量産実力を判断する基準となると同時に、その工程の改善活動のベースともなる。具体的な工程診断の流れは次のとおりである。

表1 鉛フリー工程診断の範囲と内容
Scope and contents of lead-free process diagnosis

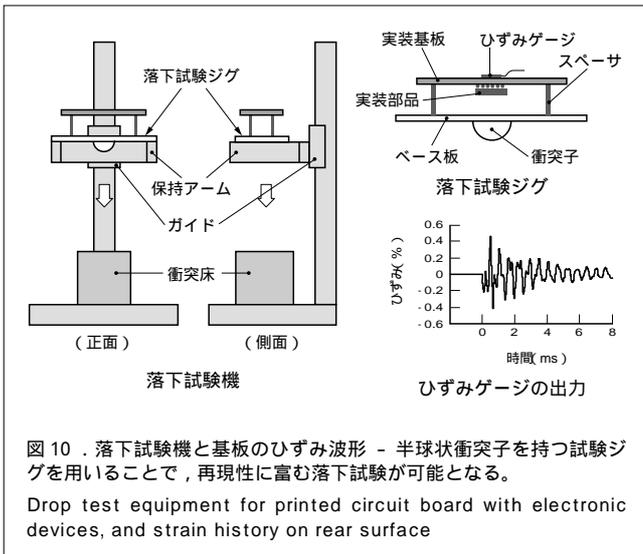
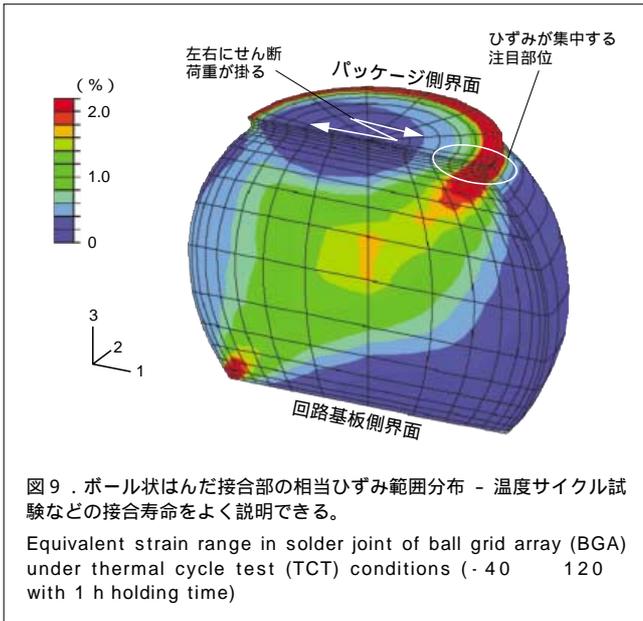
分類	診断内容
共通項目	部品仕様、部品管理、外観検査基準など
リフロー工程項目	ペースト管理、リフロー温度プロファイル管理など
フロー工程項目	フロー実装条件管理、フロー槽のメンテナンスなど
手付け工程項目	手はんだ付け条件管理、教育認定制度など

- (1) チェックシートに従い、工程の管理状態を診断する。
- (2) 診断結果をレーダチャートなどで分析して工程の弱点を目視化し、改善ポイントを明らかにする。
- (3) 工程改善を実施する。
- (4) 再度診断を実施し、改善状況を確認する。

このサイクルを回すことで、各実装ラインが鉛フリーはんだを実装する際の、量産実力を底上げしている。2003年上期は、国内事業所と海外現地法人(協力会社も含む)を合わせ7社の工程診断を実施している。

4.2 はんだ付け技能教育

Sn-Ag系鉛フリーはんだは、従来のSn-Pb共晶はんだに比べて融点が約35℃高く、ぬれにくく、流れにくい性質があるため、一段高い技能が要求される。また外観の光沢が得



め、接合部の破損は主に前者の力によることが多く、この視点からいくつかの信頼性試験方法が提案されている。

当社提案の落下試験機とジグの概略を図10に示す⁽¹¹⁾。金属製ベース板には、衝突条件の再現性を確保するために半球状の衝突子が設けられており、実装基板はスペーサを介してベース板にねじで固定される。落下試験ジグを載せた保持アームを落下させ、衝突子を衝突床に衝突させる。衝突後も保持アームは落下を続けるため、自由落下に近い所定の衝撃力をジグに印加することができる。

図10には基板裏面のひずみゲージの出力波形も示している。同時に計測される実装部品の電気抵抗の変化と、ひずみから算出される基板曲率半径から断線時の部品ごとの強度基準を求めることができ、鉛フリー実装基板開発に使われている。

られにくいので良否判定が難しくなっている。そのため当社では、はんだ付け技能教育を実施して、鉛フリーはんだのはんだ付け技能を向上させ、当社製品の鉛フリー化を支援している。

当社では、1999年10月から東芝グループを対象に、Sn-Pb共晶はんだのはんだ付け技能教育を開始し、これまでに約700名以上が(社)日本溶接協会のマイクロソルダリングオペレータ資格を取得している。また、2002年7月からは鉛フリーはんだ付けの教育を開始し(社)日本溶接協会の上級マイクロソルダリングオペレータの資格取得を進め、既に、約250名が資格を取得している。

教育のベースとなるはんだ付け品質基準はすべて国際標準(IEC(国際電気標準会議)-61191)に準拠しており、国内事業所(協力会社も含む)だけでなく、海外現地法人(7か国)にも広く展開を進めている。

東芝グループの資格体系を図11に示す。Sn-Pb共晶はんだ、鉛フリーはんだ共に上級(指導者)、中級(実務者)、初級(初心者)の各オペレータの教育認定コースを設置し、定期的にソルダリングスクールを実施している。2003年上期には鉛フリーはんだの上級スクールを10回、中級スクールを1回開催している。

Sn-Pb共晶はんだ資格	鉛フリーはんだ資格	開始年月
	上級鉛フリーオペレータ ((社)日本溶接協会:上級マイクロソルダリングオペレータ資格)	2002年 7月
上級・準上級オペレータ ((社)日本溶接協会:マイクロソルダリングオペレータ資格)		1999年10月
	中級鉛フリーオペレータ (対象:実務者)	2003年 1月
中級オペレータ (対象:実務者)		2001年 8月
	(初級鉛フリーオペレータ) (対象:初心者)	2004年 4月
初級オペレータ (対象:初心者)		2001年10月

⇒: 資格取得を推奨

図11. 東芝グループのはんだ付け資格体系 - 鉛フリーはんだのオペレータ資格認定制度を設けている。
Soldering qualification system of Toshiba Group

5 あとがき

製品の鉛フリー化は、接続材料であるはんだや電子部品の外装めっきを中心に加速しながら着実に進んでいる。しかし、すべての製品から鉛を撲滅するためには、より高い信

頼性が要求される製品や電子部品内部の高温はんだに対しても、待たなしでの鉛フリー化が必要である。

当社では、これを早期に実現するため、更に開発を加速させて、第3次環境ボランタリープランで掲げた鉛削減目標を完遂するとともに、環境負荷の小さいグリーン製品の調達や2006年7月に予定されている欧州での鉛フリー規制に対しても、段階的な目標を定めて完全鉛フリー化を目指していく。

文 献

- (株)東芝 環境保全推進部. 東芝グループ環境報告書2003. < http://www.toshiba.co.jp/env/index_j.htm > (参照2003-11-11).
- 森 郁夫, ほか. 電子・電気機器への鉛フリーはんだ適用技術. 東芝レビュー. 56, 8, 2001, p.24 - 28.
- 鈴木元治, ほか. Sn-Zn系鉛フリーはんだのリフローへの適用. 6th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", 2000, p.325 - 328.
- 川上 崇, ほか. 実装設計時における機械工学的信頼性解析技術. エレクトロニクス実装学会誌. 4, 5, 2001, p.406 - 411.
- 向井 稔, ほか. ICパッケージ半田接合部の弾クリーブ解析と疲労寿命. 日本機械学会講演論文集. 910-79, 1991, p.223 - 224.
- Mukai, M., et al. Mechanical Fatigue Tests of Solder Bumps, ASME Advances in Electronic Packaging. EEP. 26-1, 1999, p.449 - 455.
- Takahashi, H., et al. Thermal Fatigue Life Simulation for Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Joints. ICEP Proc., 2003, p.215 - 220.
- 高橋浩之, ほか. Sn-Zn-Bi 鉛フリーはんだ接合部の熱疲労寿命解析. 第17回エレクトロニクス実装学術講演大会, 2003, p.59 - 60.
- 小林峰雄, ほか. 時間依存分離形構成式の陰的積分とコンシステント接線係数. 日本機械学会論文集(A). 69-678, 2003, p.302 - 309.
- 高橋浩之, ほか. Sn-Ag系およびSn-Cu系鉛フリーはんだの機械的特性評価. MES2001. 2001, p.51 - 54.
- 十河敬寛, ほか. BGAはんだ接合部の落下衝撃強度評価. 日本機械学会講演論文集. 99-5, 1999, p.549 - 550.



前原 洋一郎 MAEHARA Yoichiro

生産技術センター 実装技術研究センター主任研究員。
表面実装を中心とする基板実装技術の研究・開発に従事。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Center



忠内 仁弘 TADAUCHI Masahiro

研究開発センター 環境技術ラボラトリー主任研究員。
鉛フリーはんだ及びその適用技術の研究・開発に従事。
日本金属学会, エレクトロニクス実装学会会員。
Environmental Technology Lab.



川上 崇 KAWAKAMI Takashi, D. Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹,
工博。IT機器, 半導体デバイス, 高温エネルギー機器の
機械的信頼性設計法の開発に従事。日本機械学会, 品質工
学会会員。
Mechanical Systems Lab.