

鉛フリーはんだの実用化技術検討

鉛フリーはんだの実装技術の確立から製品への適用

A Practical Application of Lead-Free Soldering

板倉 治 男*
Itakura, Haruo

佐藤 昌 毅*
Sato, Masaki

斉藤 貴**
Saito, Takashi

荒井 孝 一***
Arai, Kouichi

We selected a promising lead-free solder, used it in a printed circuit board assembly, and tested the reliability of this application. Based on favorable results, we then developed a manufacturing process that employed lead-free soldering. In October 2002, this lead-free soldering process found its place in the full-scale production of a Konica plain paper copier. Reported here are the technologies involved in this success.

1 はじめに

電子製品への特定化学物質（鉛/水銀/カドミウム/六価クロム/PBB/PBDE）の使用をEUのROHS指令（EU Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment）では2006.7.1以降禁止しようとしている。電子機器の組み立てに使用されるはんだは鉛を含み、電子機器の稼働後の埋め立て廃棄に伴って流出する鉛が地下水汚染源の一つとして指摘され、それを飲料水として摂取した場合の血中濃度の上昇と知能指数低下に関係があるとの報告が背景にある。同指令は2003年には法制化される見通しである。

日本の電子業界ではJEITA（電子情報技術産業協会）が1998年より鉛フリーはんだ実装に関する研究プロジェクトを開始し、定期的に成果報告がされている。当社ODカンパニーでは2000年5月環境委員会の8番目の分科会として“鉛フリー分科会”を発足し、鉛フリー化に向けた技術検討を開始した。その検討成果と実用化事例を報告する。

2 鉛フリー化の課題

従来の代表的なはんだは錫63%鉛37%（Sn37Pb）の合金組成であり、熔融温度が183℃で有る。鉛フリーとして開発された代表的なはんだは錫96.5%銀3%銅0.5%（Sn3Ag0.5Cu）の合金組成であり、熔融温度が220℃で従来より37℃上昇する。そのはんだ材質の変更が以下のような課題を生み、多方面からの検討が必要となった。

2.1 実装方法

最近のプリント配線板実装は回路の微細パターン化、電子部品の小型化/表面実装化が大幅に進み、実装方法もリフロー法が大半を占めている。リフロー法とはプリント配線板にクリームはんだを印刷し、その上に電子部品

を搭載し、高温雰囲気のリフロー炉で固着する方式である。従来はんだ（共晶はんだ）でも電子部品が搭載されたプリント配線板をリフロー炉内にて215℃の高温雰囲気を30秒程印加している。鉛フリー化すると融点の上昇分を加味し、最低でも230℃以上の加熱が求められる。

フロー法とは従来からの熔融はんだをはんだ槽ではんだ付けする方式であり、250℃程のはんだ温度にて生産している。鉛フリーはんだ化されてもほぼ同様の方式で生産可能である。但し、はんだ材質に対応したフラックス（はんだ付け部の酸化防止剤）の最適化が必要である。

はんだ鍍による手はんだは鉛フリーはんだの融点の上昇分、溶け広がり難さへの対応が必要である。

2.2 電子部品

鉛フリーはんだの融点上昇に伴い、搭載する電子部品の高耐熱化が求められる。電子部品のリフロー耐熱温度は220℃～240℃が一般的であり、鉛フリー対応として耐熱性の向上（260℃が一般的）が部品メーカーに要求されている。同様にプリント配線板の耐熱温度（樹脂材の軟化点/膨張係数/接着強度）も用途に応じ吟味が必要である。更に、はんだ付けする端子部の表面処理は、従来はんだメッキが多かったが、その表面処理の鉛フリー化も求められる。

2.3 生産設備

課題となる顕著な例はリフロー炉である。部品を搭載したプリント基板の全領域で、高融点化されたはんだを十分に熔融する為の最低温度（230℃）を確保し、搭載する電子部品の耐熱を越えない最高温度（240℃）を満足する必要がある。つまり、基板全面での温度分布は極小（△10℃）化が必要である。ところが、従来のリフロー炉の構造ではその条件を満足することが出来ない。そこで熱風吹きつけ/加熱部を多分割ゾーン化するなど、高精度な温度の均一化が課題である。

2.4 はんだ付けの信頼性

従来のはんだ付け管理は長い歴史の元、常識化した条件を維持すれば問題なし、との意識が強かった。鉛フリー化に伴って、各種パラメーター（はんだ組成/はんだ

* コニカテクノプロダクト 八王子技術センター
** ODカンパニー CS統括部 製品評価センター
*** コニカテクノプロダクト 都留技術センター

付け温度/はんだ付け時間/フラックス材質/部品の端子処理剤)に対するはんだ付け強度とその長期耐久性が重要な品質管理のポイントとなる。

3 課題への取り組みと得られた成果

3.1 はんだ材料の決定

主なはんだ材料について、融点/強度/ぬれ性/コストなどについての比較を行った結果をTable 1にまとめる。

Table1 Characteristic of solder materials

はんだ材料	融点℃	強度	ぬれ性	コスト
Sn37Pb	183	○	◎	◎
Sn3Ag0.5Cu	217/220	◎	○	△
Sn0.7Cu	227	△	○	○
Sn9Zn	199	○	△	○

材料選定のポイントは、以下の通りである。

- ① 設備能力、電子部品耐熱温度に対してはんだ付け温度が、高すぎないこと。
- ② 共晶はんだに比べて接合信頼性が劣らないこと。
- ③ 使用に際して、特許が問題にならないこと

以上の観点より、コストの点で不利であるが、信頼性を重視してSn3Ag0.5Cu組成のはんだを鉛フリーはんだとして選定した。同材料はJEITA推奨でもある。

3.2 搭載電子部品の鉛フリー対応

3.2.1 耐熱温度

これまで採用してきた電子部品は、共晶はんだでの実装を前提としてきたため、各部品の耐熱温度をその採用の基準とはしていなかった。しかし、鉛フリーはんだによる高温でのはんだ付けに対しては、品質確保のために耐熱温度を把握した上での採用が必須となった。そこで、社内電子部品データベースに各部品耐熱温度を登録し、実装基板ごとの部品耐熱温度がはんだ付け時のピーク温度以上であることを設計段階から確認できるシステムを構築した。また、電子部品耐熱温度調査の結果より、鉛フリー実装可能な耐熱温度を240℃以上とし、部品選定の基準とした。

3.2.2 電子部品端子処理

前述したように、電子部品の端子処理には鉛を含んだはんだメッキが使用されていることが多い。鉛全廃のためには、この端子処理にも鉛を使用しないことが必要となる。そこで、耐熱温度と同様に社内電子部品データベースに端子処理の鉛フリー化情報を登録し、実装基板ごとに電子部品端子の鉛フリー化状況の管理を開始した。

また、鉛フリー化への移行の過渡期には、以下のような組み合わせが混在することになる。さらに、鉛フリー

端子処理は、デバイス/メーカーにより対応がまちまちで、SnBi/Sn/SnCu/SnAgなど複数の表面組成が存在している。そのため、各組み合わせにおけるはんだ接合の信頼性について事前確認を行っている。

- ① 実装用 = SnPb 端子処理 = SnPb
- ② 実装用 = SnPb 端子処理 = 鉛フリー
- ③ 実装用 = SnAgCu 端子処理 = SnPb
- ④ 実装用 = SnAgCu 端子処理 = 鉛フリー

3.3 製造条件、生産設備

3.3.1 生産設備

Sn-Ag-Cu使用による約40℃融点の上昇と電子部品における温度制限の両者を同時に満たすことは製造としては厳しく、従来のリフロー装置では達成出来ない。ここで鉛フリー化におけるリフロー装置の条件を下記の4つに絞った。

- ① 基板内部品の温度分布(Δt)が5℃以下であること
- ② 高温化ゆえに、急冷が出来ること
- ③ 反り防止機能を搭載していること
- ④ 従来より濃度の高い窒素雰囲気が可能なこと

特に、基板上の部品毎の温度分布を出来る限り小さくする必要がある。部品はそのサイズ・材料により熱容量が異なり、全ての部品のはんだ付け部分に対して規定温度以下でかつ融点以上の温度を与えられるかが、ポイントとなる。複写機で使用している大サイズ基板は、BGA・CSP・大型QFPと熱容量の大きい部品と1005チップ等の小型部品の混在により共晶はんだでも困難な部分に対してこれを満足することは易しくない。ここではプリヒート温度やピーク温度の均一性、部品温度235℃以下リフロー下限230℃、高精度加熱 $\Delta t=5℃$ 以下を目標に、当社最大級のコンピューター基板を用いて各社のリフロー装置を比較し、導入を実施した。実際には、装置の導入だけではなく工場内の湿度管理の徹底と部品保管における湿度管理、定期的加熱温度監視が運用上の大きな条件となる。

またフロー装置についても、熔融温度の上昇に伴うヒーター容量UP、高温による槽自体の浸食、共晶はんだから鉛フリーへの切替時期の共存対応のため、新規購入や従来装置の改造を実施した。

3.3.2 製造条件

(1) リフローはんだ条件

Fig. 1にリフロー温度プロファイル例を示す。ここでのポイントを述べると、A部；初期時部品にストレスとなるような急激な温度上昇を加えないこと(2~4℃/s)。B部；融点温度に上昇させる前には Δt を最小化する為、主要なはんだ付けポイントをプリヒート設定温度で均一化させる(170~180℃)。C部；はんだ熔融温度以上、部品耐熱温度以下になるよう設定する(225~235℃)。D部；はんだの硬化・強度を上げる為、

必要な加熱の完了後冷却器による強制空冷を実施する。

一般的に鉛フリーはんだはヌレ性が悪く、ヌレ不足による接合強度の悪化が問題となる。ここではリフロー炉内を窒素雰囲気（酸素濃度1000ppm以下）にしはんだ自体の酸化を抑制することでヌレ不足を解消する。またこれは外観検査の検出力向上に繋がる。

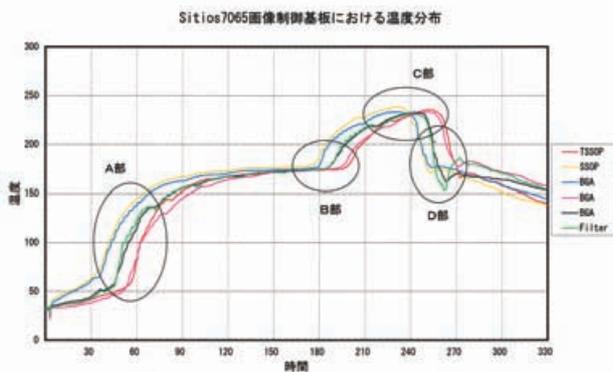


Fig.1 Reflow profile

(2) フローはんだ条件

基板への挿入部品のはんだ付けは電子部品の面実装化の加速によって少なくなってきてはいるが、パワー系・駆動系の基板関連では未だ多く用いられている。フローはんだ付けでの注意点は、リフロー部分の再溶解である。まだまだ電子部品自体の鉛フリー化は遅れており、端子部の表面処理に鉛はんだが用いられている例が多い。鉛を含むはんだで端子処理されている電子部品は、フローはんだ付け温度にて、基板上面のリフロー部品面の温度が187℃近辺まで上昇すれば、はんだが再溶解を始めはんだ付け強度の劣化を招くので基板上面の温度プロファイルを165℃以下に設定することとした。

またフローはんだ付けでは、はんだ槽内の材料組成の管理が重要になる。はんだメッキされた部品端子からのPb溶解による混入、プリント配線板の銅箔からのCuの槽への混入は避けられず、槽内の材料組成の変化ははんだ融点の低下に繋がり、接合強度に悪影響を及ぼす。定期的に組成管理を行うことが必要となる。

3. 4 はんだ付けの信頼性

プリント配線板におけるはんだ付け部の信頼性要求事項は「電氣的接続を製品寿命まで維持確保すること」と整理出来る。つまり、はんだ接続部の断線/短絡（マイグレーション）の発生なきことと言える。

上記を左右する要因として、①はんだ外観、②フィレット形状、③金属間化合物、④内部欠陥などが上げられる。鉛フリー化を推進する中で、共晶はんだと組成が変わることはもちろん、部品実装条件も変わってくる事

は記載した通りである。これらの変更が前述の項目にどのように影響し、結果として信頼性要求事項が確保できるか評価する必要がある。

3. 4. 1 信頼性試験項目

鉛フリーはんだの実用化に向けての信頼性試験項目として以下の試験項目を実施する事とした。

- ① 冷熱衝撃試験
- ② 高温放置試験
- ③ オゾン暴露試験
- ④ マイグレーション試験
- ⑤ はんだ接続部の強度劣化（ピール強度測定試験）
- ⑥ ベンディング試験
- ⑦ 振動試験
- ⑧ はんだ濡れ性
- ⑨ クリープ試験

上記試験は、鉛フリーはんだに対し、特別に実施するというものではなく、従来からはんだ付け部の接続信頼性を評価する事を目的とした試験である。

JEITAや溶接学会等の研究より、Sn-Ag-Cu系鉛フリーはんだは共晶はんだより接続後の信頼性は優れている事がわかってきている。よって、実用化に向けては、接合が正確、確実にに行われている事を確認することが重要となってくる。合わせて、製品寿命範囲内で共晶はんだと同等以上の接続信頼性を確保している事を確認するため、評価試験は基本的に共晶はんだとの相対比較をすることを前提とした。

3. 4. 2 冷熱衝撃試験による評価

冷熱衝撃試験の一例として、鉛フリーはんだで試作、評価した結果を以下に記載する。

(1) 目的

冷熱衝撃試験後のはんだ付け部の断面観察を実施し、実用化に向けての課題を抽出する。

(2) 試験条件

- 40℃ ↔ 125℃（各30分）

500サイクル実施

(3) 試料

- ・ Stios7065 画像処理基板
- ・ Sn-Ag-Cu系 鉛フリーはんだ実装品
- ・ 共晶はんだ実装品

(4) 断面観察結果

冷熱衝撃試験後の断面観察結果より以下の事が分かった。

- 1) 共晶はんだ、鉛フリーはんだともクラックが発生する部位に変わりはない。特に注意が必要な部品は、フロー工程で実装されるコネクタ（Fig. 2 /Fig. 3）、およびリフロー実装のBGAである。（Fig. 4 /Fig. 5）

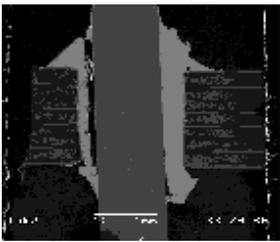


Fig.2 Connector

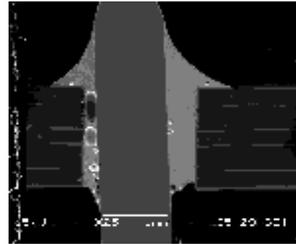


Fig.3 Connector

Blank Condition After Thermal Shock Test

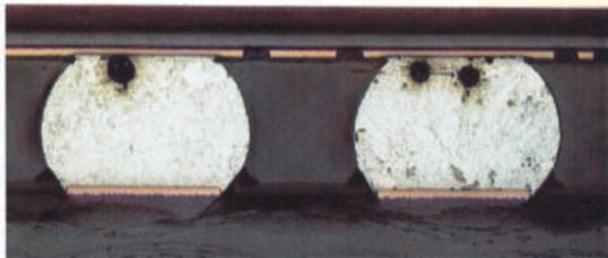


Fig.4 BGA Solder Ball Blank Condition



Fig.5 BGA Solder Ball After Thermal Shock Test

2) はんだ付け部にクラックが発生する主要因は、プリント配線板と電子部品の線膨張係数の違いによるものである。しかしながら、断面観察結果、はんだ内部のボイドを起点としてクラックが発生している場合が有ることが確認された。よって、クラック発生を助長させる要因としてボイドの発生があると考えられる。

今回、鉛フリーはんだを使用した場合、共晶はんだに比べてボイドの発生が多い傾向が認められた。これは、プリヒート温度やBGAのはんだボールの材質にも影響されていると推定される。

3) 共晶はんだ、鉛フリーはんだともにクラックの発生レベルは同等であり大きな差異はない。しかしながら、一般的に、クラックの発生は、はんだの濡れ広がりや、はんだ上がりによって左右される。はんだ付け条件の適正化は、鉛フリーはんだの接続信頼性を確保するために極めて重要な項目である。

4) はんだクラックは基板表面では微細であっても、内部にてクラックが進行している場合があり、十分注意が必要である。

5) はんだ付け部の評価に際し、断面観察は有効であ

る。

(5) 改善策の検討

(4)項の断面観察結果より、問題事象への対策を検討し、以下の結果を得た。

1) フロー工法時に使用するキャリアの材質を熱容量の小さい材料に変更し、被はんだ付け部品に熱が十分伝わる構造とした。

2) リフロー工法時の温度プロファイルの見直しを実施。その結果BGAはんだボール内のボイドの低減が確認された。これはピーク温度保持時間を長くする等の対策により、はんだボール内のガスが十分抜けたものと推定する。但し、半導体の耐熱性や、その他の部品耐熱には十分な配慮が必要であり、基板種毎に対応する必要がある。

3. 4. 3 はんだ接続部の機械的強度劣化

はんだ接続部の機械的強度の劣化を初期および冷熱衝撃試験後で比較した。試料はチップ抵抗、QFP、アルミ電解コンデンサである。結果は、冷熱衝撃試験後に強度低下が認められるが、絶対値は共晶はんだ同等以上であり、実用上問題ない結果が得られた。チップ抵抗の結果を Fig. 6 に示す。

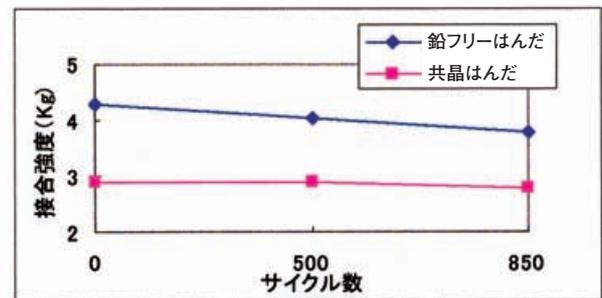


Fig.6 Cyclic stability of shear strength

3. 4. 4 はんだ接続部の接触抵抗変化

冷熱衝撃試験、および、高温放置試験を通じて、はんだ接続部の接触抵抗値変化を観測した。その結果、電氣的にオープンに至るものは無く、良好な結果が得られた。チップ抵抗の結果を Fig. 7 に示す。

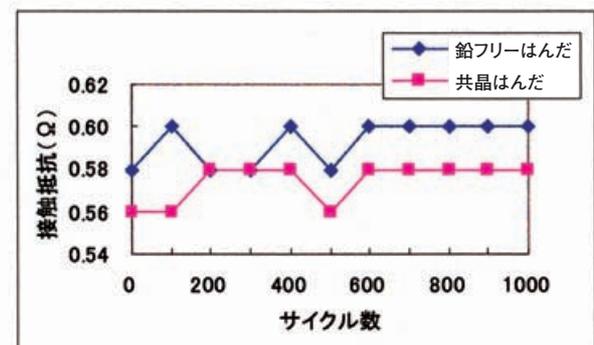


Fig.7 Cyclic stability of Contact resistance

3. 4. 5 製品寿命に対する試験条件の検証

はんだ付け部の冷熱衝撃試験における加速係数は、一般的に修正 Coffin Manson 式によって予測できる。

この式より前述の試験条件は、機器の一般的な使用環境に対して5年以上であると推定できる。

今回、それを裏付けるため、市場にて5年以上、且つ製品寿命まで稼働した機械より電装基板を回収しはんだ付け部の断面観察を実施した。

この基板は機内の高温部に配置されており、機内での最悪環境に曝されていたといえる基板である。

(1) 外観観察結果

冷熱衝撃試験ではんだクラックが発生した電源コネクタ部に微細なクラックが認められた。

(2) 断面観察結果

クラックは内部に進行していたが、冷熱試験品よりやや良好な状態を維持していた。

(3) まとめ

冷熱衝撃試験条件（ $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 125^{\circ}\text{C}$ 各30分、500サイクル）は、劣悪な市場環境下での5年以上を再現していると考えられる。但し、今回はガラスエポキシ（FR-4）基板での比較であるため、他種基板に適用する際には注意が必要である。

3. 4. 6 はんだ接続部の寿命シミュレーション

冷熱試験結果と市場回収基板より冷熱衝撃試験条件の妥当性が検証できた。更に、今回、シミュレーション技術を用いてはんだ接続部の寿命推定を行った。その結果、今回採用した冷熱衝撃試験条件は、製品寿命を十分保証できる事の結論を得た。以上の結果から「はんだ付け部の寿命予測式（修正 Coffin Manson 式）、冷熱衝撃試験、市場回収基板、シミュレーション結果」が、ほぼ一致する事が確認できた。

3. 4. 7 その他試験結果

(1) オゾン暴露試験

製品の使用状態におけるオゾン量 / 使用時間を想定し、10ppm/100hr 放置後において、はんだ付け部の接触抵抗及びはんだ付け部外観に異常は無くオゾン環境下での使用においても問題ない結果を得た。

(2) マイグレーション試験

供試はんだペーストにおいてマイグレーションの発生は無く、良好な結果を得た。

(3) 振動試験

試験基板は、トランス等、重量電子部品が実装されているDC電源ユニット（鉛フリーはんだ試作品）とし試験を実施した。試験条件は、加速度2.5G一定、周波数10-55-10Hz（1分間）掃引、加振方向X、Y、Zの3方向、試験時間 各2時間実施とした。

結果、部品脱落、はんだクラックの発生無く、良好な結果を得た。

3. 4. 8 Sitios7145 への適用評価

鉛フリーはんだの基本特性は把握できたので、量産適用の可否を判断するために、適用予定機種すべての基板に対して信頼性の評価を実施した。以下にその一例を報告する。

(1) 評価基板

Sitios7145 本体制御基板 (Fig. 8)

Sitios7145 パラメータメモリ基板 (Fig.10)

(2) 評価項目

① 温度サイクル試験

($-20 \leftrightarrow 70^{\circ}\text{C}$ 各30分 500C)

② 冷熱衝撃試験

($-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 125^{\circ}\text{C}$ 各30分 500C)

(3) 評価結果

① 温度サイクル試験

基板2種とも、試験後の基板動作は正常で、外観も特に問題なし。

② 冷熱衝撃試験

基板2種とも、試験後の基板動作は正常。各部の断面観察結果は、本体制御基板にのみ各部にはんだクラックが認められた。(Fig. 8、Fig.10)

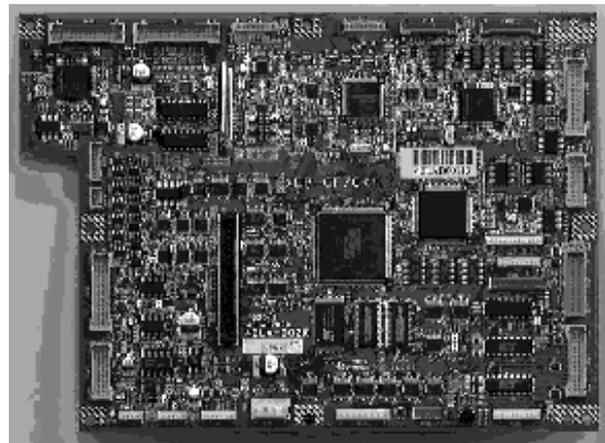


Fig.8 Main Control Board

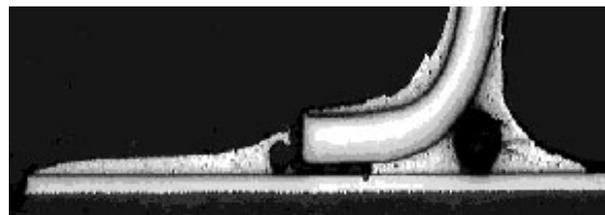


Fig.9 IC6 after Thermal Shock Test

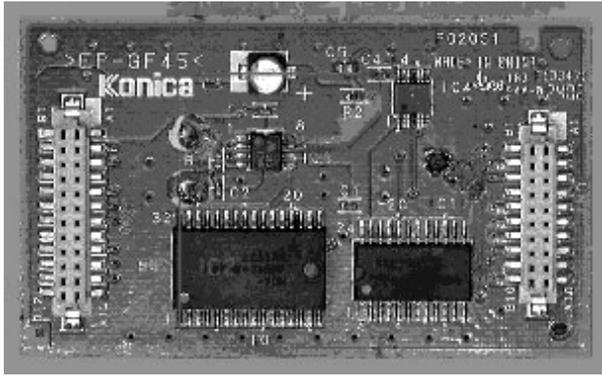


Fig.10 Parameter Memory Board

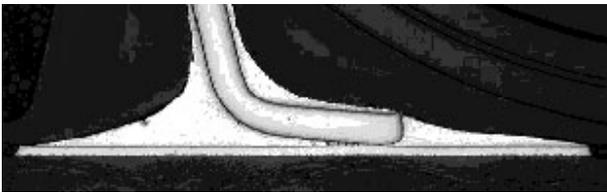


Fig.11 IC2 after Thermal Shock Test

(4) まとめ

これまでの評価は、KTP 都留事業所をパイロット工場として中心に行ってきた。しかし、製品への適用評価においては、実際に量産製品の実装を行う海外EMSでも行った。そのため、使用する基板材質の違い、リフロー炉、フロー槽などの設備の違いなどが生じ、今回のような結果が出たと推測される。今回行った信頼性試験後に基板の動作上問題がないことは、製品寿命まで基板動作を保証できることとなるが、これまでの検討結果に対して、そのレベルが劣るものについては量産適用を控え、今後の課題として現在対応中である。

3. 5 製品への適用

本格的な鉛フリー適用製品として Sitios7145 を選定した。その適用では、国内の GPN (Green Purchasing Network) 登録を考え、電子部品を基板へ接続するためにはんだを使用している実装基板/電気部品をすべてリストアップし、さらに、各基板/部品で使用しているはんだ量の調査を行った。自社にてコントロール可能な実装基板に合わせ、海外EMSや他社から購入している部品への適用状況/計画を調査し、海外EMSや部品購入先へ積極的に働きかけることにより、適用率の拡大に努めた。その結果、Sitios7145では50%を超える鉛フリーはんだ適用率となりクラスAを達成することができた。

4 まとめと今後の課題

鉛フリーはんだ材料、はんだ付け条件、品質確認方法、品質の基準、等実用化技術課題についてはほぼ確立した。大量に生産される製品の信頼性を、製品寿命まで確実な物とする為には、生産初期の外観検査では検知出来ないはんだ付け接続の信頼性を確保する事、生産プロセスの中で、材料管理/はんだ条件管理/電子部品管理/等、製造現場での日々の管理を徹底する事が最も重要である。

現在量産中の製品の中で、電子部品自体の耐熱性が前記温度を確保出来ず、鉛フリー化が未適用な基板もある。

電部品メーカーでの部品自体の耐熱性向上対策、低融点はんだ材料による実装検討を精力的に取り組中である。

5 謝辞

本活動は前述のように、第8分科会として検討した成果である、ODC 開発 C/CS 統括部 /KTP 購買 C/KTP 都留事業所 /KTP 技術センターからの委員各位に紙面を借りて感謝致します。

●参考文献

- 1) 鉛フリーはんだ研究開発成果報告 (2000/2001/2002)
: JEIDA/JEITA
- 2) 鉛フリーはんだ規格化の為の研究開発プロジェクト報告 (2000): 日本溶接協会
- 3) エレクトロ実装学会研究会資料