

電子部品の信頼性評価および不具合解析技術

Various Techniques for Reliability Estimation and Failure Analysis of Electronic Products and Components

伴 充行 BAN Mitsuyuki JFE テクノリサーチ 分析・評価事業部 千葉事業所物理解析グループ 主査(係長)
島内 優 SHIMAUCHI Yutaka JFE テクノリサーチ 分析・評価事業部 千葉事業所物理解析グループ長

要旨

JFE テクノリサーチでは、電子部品の不具合の解析や信頼性評価に積極的に取り組んでいる。本報では、透過 X 線観察法、走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡などの手法を用いて、IC 製品や Pb フリーはんだ実装されたプリント基板における不具合解析手法を事例紹介により示す。

Abstract:

JFE Techno-Research has been working on the reliability estimation and failure analysis. In this paper, the authors introduce the failure analyses for IC products and printed circuit boards in which electronic devices are mounted with Pb free solder, using the techniques of transmission X-ray microscope, scanning electron microscope, and transmission electron microscope.

1. はじめに

電気製品の軽薄短小化にともない、電子部品自体の短小化はもとより、回路基板の高密度化には著しいものがある。それによって、不具合の発生が頻発している。また、環境負荷物質の低減という観点から、ヨーロッパ連合 (EU) では有害物質使用制限指令 (RoHS 指令) が 2006 年 7 月より施行され、回路基板の実装用のはんだについても、既存の Sn-Pb 共晶はんだから Pb フリーはんだへ移行している。製造メーカーは、これまで使用してきたプロセスの大幅な見直しを迫られており、搭載する部品や基板と実装プロセスの組み合わせも多種多様となった。そのため、信頼性試験や不具合解析を改めて実施する必要性が生じてきている。このようなニーズに応えるため、JFE テクノリサーチでは、各種環境試験や非破壊による調査技術をはじめとする、さまざまな不具合解析技術を蓄積し、信頼性評価や不具合解析を行ってきた。本報では、実際の例を用いて、このような不具合解析技術を紹介する。

2. 集積回路 (IC) の不具合解析

この章では、電子部品の代表的な事例として、IC の不具合解析について紹介する。IC の不具合解析では、まず非破壊調査を実施した後、予想される原因別に破壊調査を実施

する。その代表的な解析フローを Fig. 1 に示す。

非破壊調査として、外観観察、電氣的調査 (オープン/ショートおよびダイオード特性など)、透過 X 線調査および超音波探傷調査などを行う。以下に、これらの調査方法の具体的内容を示す。

電氣的調査では、正常品と比較することにより、不具合端子および不具合モード (オープンまたはショートなど) を推測する。透過 X 線調査では、チップ/リードフレーム間の Au ワイヤのボンディング状態やパッケージ内部破

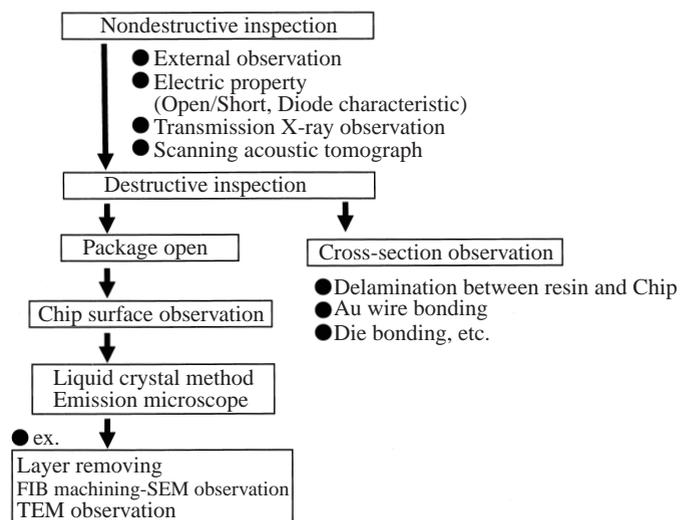


Fig.1 Flow of failure analysis on IC

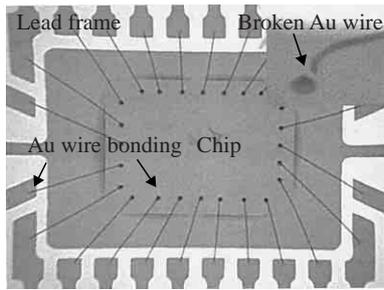


Photo 1 Transmission X-ray image of broken Au wire

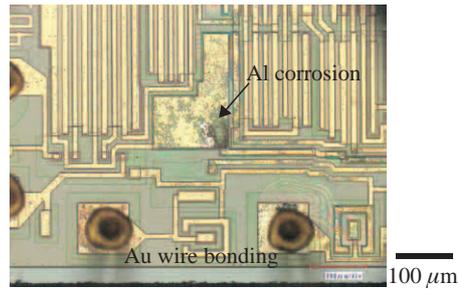


Photo 3 Optical microscope image for corrosion part of Al wiring

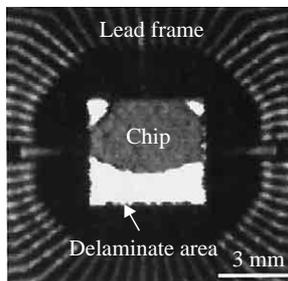


Photo 2 SAT image of delamination between chip and resin

壊の有無などを確認する。**Photo 1**にAuワイヤーボンディングの破断事例を示す。これは、チップ側Auワイヤーボンディング部のネック付近で破断したものである。Auワイヤーの破壊は、ボンディング時の工程異常、樹脂モールド時およびプリント基板実装時の応力により生じることがある。

超音波探傷 (SAT: scanning acoustic tomograph) を用いると、パッケージ内部の樹脂/チップ界面などでの剥離の有無を確認できる。**Photo 2**に示した例では、チップの一部に明るいコントラストが見られる。これは剥離した部分で超音波の反射が多くなったためである。この結果から、パッケージ樹脂/チップ界面で剥離が起きていることが明らかになった。パッケージ樹脂が吸湿していると、250°C程度の環境に曝されるプリント基板実装工程時に、水分が急激に気化するため、パッケージ内部で破壊が発生する¹⁾。この影響により、Auワイヤー断線やチップ破壊が生じることがある。通常、ICは防湿梱包により吸湿防止が施されているが、開梱後に放置されていたケースなどで、このような現象が発生する。

非破壊調査終了後、パッケージを開封して破壊調査を実施する。一般的な樹脂パッケージは、発煙硝酸を用いて溶解²⁾し、開封する。その後、まずチップの表面状態を観察し、過電流や静電破壊による焼損、パッシベーション膜の破壊、配線破壊や腐食などの有無を調査する。**Photo 3**にパッシベーション欠陥による配線腐食事例を示す。これは、チップの保護膜であるパッシベーション膜の欠陥から水分が浸入し、Al配線が腐食したものである。

表面観察で欠陥が確認されない場合には、リーク電流による発熱を利用した液晶法、またはエミッション顕微鏡を

用いて不具合箇所を特定し、表面では見えない下層の不具合を推定する。さらに、微小欠陥を調査する場合には、集束イオンビーム (FIB: focused ion beam) 加工した後に走査電子顕微鏡 (SEM: scanning electron microscopy)、または透過電子顕微鏡 (TEM: transmission electron microscopy) を用いて観察する。

3. プリント基板実装関連調査

この章ではプリント基板実装関連の調査方法および事例を紹介する。

3.1 はんだ濡れ性調査

電子部品のはんだ濡れ性評価試験として JIS Z 3198-4 に採用されているウェッティングバランス法の模式図を **Fig. 2** に示す。この試験方法は、試料を溶融はんだに浸漬し、はんだの濡れ時間や濡れ力などによりはんだ濡れ性を評価する。濡れ性が良好であれば速やかに濡れ始めるのに対し、濡れ性が悪くなるにつれて濡れ時間が遅くなり、不具合品については全く濡れなくなる。

3.2 はんだ濡れ不具合調査

プリント基板実装時のはんだ濡れ不具合には、以下ののような事例がある。

- (1) 被接合部となる電子部品めっき、もしくはプリント基板ランドめっき (またはランド材料) などの表面状態に起因するもの
 - (2) フラックスの活性度、もしくははんだペーストの状態などのはんだ接合材料に起因するもの
 - (3) はんだ接合時の熱容量などの接合条件に起因するもの
- この節では、電子部品めっきに起因する、はんだ濡れ不具合事例を紹介する。

一般的に、電子部品には、Sn、Sn-Cu、Sn-Bi、Sn-Ag および Sn-Pb などの Sn 系合金めっき、もしくは下地を Ni めっきとした Au めっきなどが使用される。本来の金属よりも不活性である酸化物、硫化物もしくは金属間化合物などに変質している場合、また、異物が混入している場合などではんだ濡れ性が劣化する。以下にこれらの事例を示す。

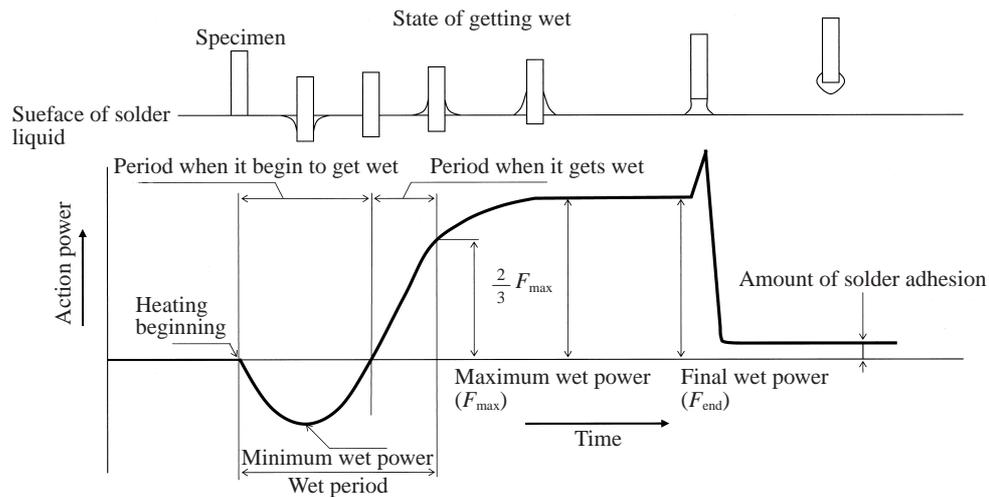


Fig.2 Schematic diagram of methods for solderability test by a wetting balance method

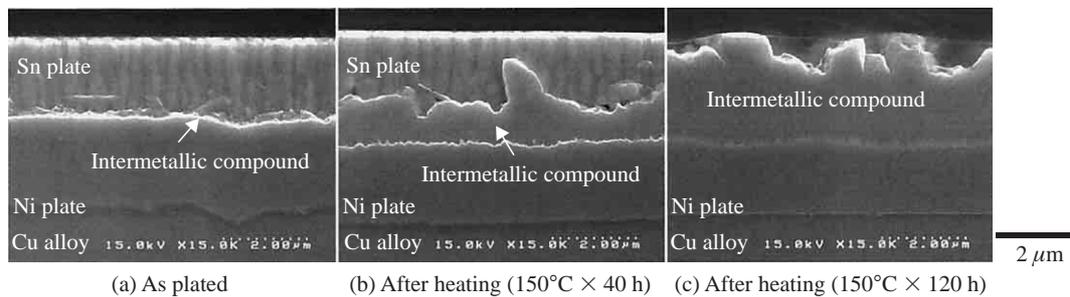
3.2.1 めっき表面にまで金属間化合物が成長した例

めっき表面まで金属間化合物が成長した SEM 像を **Photo 4** に示す。この例では、母材の Cu 合金に Ni めっきした後、最表面に Sn めっきを施したままのもの、さらに、150°C で 40 h もしくは 120 h 加熱したものを示した。これは、加熱による金属間化合物層の成長を示したものであり、加熱時間が長くなるに従い、めっき/母材界面で生成した金属間化合物が成長し、120 h の加熱後、その一部は最表面にまで成長している。実際、Sn と Ni との相互拡散により生成する金属間化合物の生成速度は、温度と時間に依存することが知られている³⁾。最表面が Sn であれば、はんだの濡れ性は良好であるが、融点が高く不活性な金属間化合物

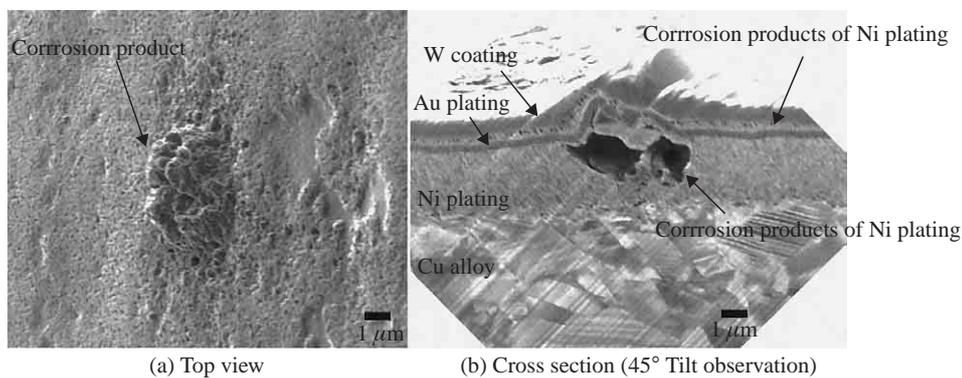
物が生成しているとはんだ濡れ性が劣化する。

3.2.2 Au めっき腐食による事例

腐食した Au めっきの SIM (scanning ion microscopy) 像を **Photo 5** に示す。このめっきは、母材の Cu 合金に Ni めっきした後、最表面に Au めっきを施している。Au めっきは、50 nm 程度と薄いことが多く、めっき条件によってはピンホールが発生することがある。Au は耐食性が高く、一般的な使用環境においてはほとんど腐食されることはない。しかし、この事例のように、Au めっきのピンホールが Ni めっきまで到達している場合、Au が陰極となり Ni が陽極となる電池が形成され、ガルバニック腐食が発生する⁴⁾。その結果、下地の Ni が腐食し、その腐食生成物が



(a) As plated (b) After heating (150°C × 40 h) (c) After heating (150°C × 120 h)
Photo 4 SEM image of cross section for Sn plate



(a) Top view (b) Cross section (45° Tilt observation)
Photo 5 SIM image of corrosion products of Au plating on Ni plating

Auめっき表面まで達すると、はんだ濡れ不具合の原因となる。

3.3 はんだ接合状態調査

プリント基板実装後のはんだ接合状態は、外観観察、はんだ接合強度およびはんだ接合部断面観察などの手法を用いて評価する。はんだ接合部の信頼性については、ヒートサイクル試験、恒温恒湿試験、機械的応力などの負荷を与えた後、はんだ接合強度の変化およびはんだ接合部へのクラック発生状態などを調査する。この節では、その調査方法および事例を紹介する。

3.3.1 はんだ接合強度試験

JIS Z 3198-6 および JIS Z 3198-7 に規定されている電子部品のはんだ接合強度評価方法を Fig. 3 および 4 に示す。QFP (quad flat package) などのガルウィングタイプの端子については 45° 方向の引っ張り試験、チップ部品についてはせん断試験を用いて評価する。

3.3.2 はんだ接合部断面観察

ICの一般的な端子形状である、ガルウィングタイプのはんだ接合部断面のSEM像を Photo 6 に示す。これは、Pb

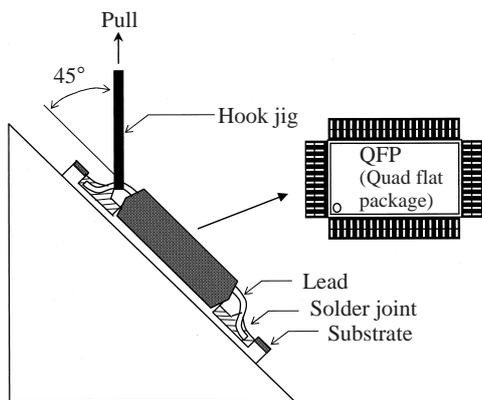


Fig. 3 Schematic diagram of method for 45° pull test of solder joints on QFP lead

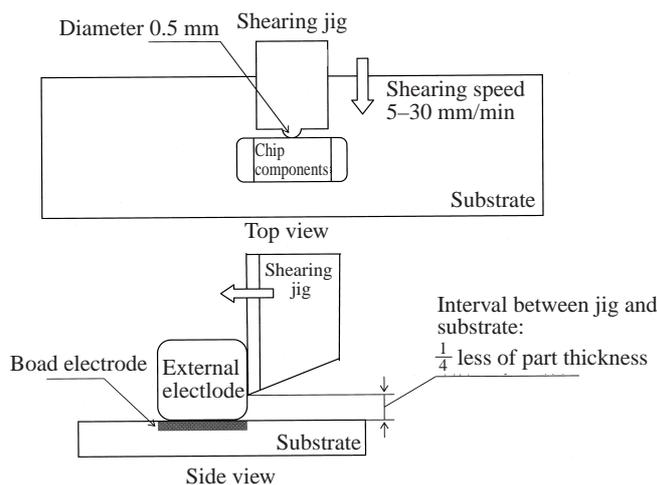


Fig. 4 Schematic diagram of methods for shear strength of solder joints chip components

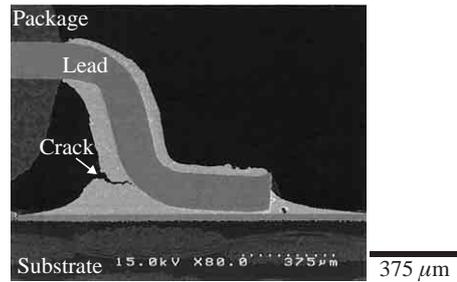


Photo 6 SEM image of cross section of solder joint after heat-cycle examination of 500 cycles

フリーはんだである Sn-3.5%Ag-0.5%Cu を用いて実装し、ヒートサイクル試験(低温 -40°C, 高温 125°C, 各 30 min 保持, 500 サイクル) を実施した後のものである。はんだ接合部のバックフィレット部には、ヒートサイクル試験時の熱応力(各材料の熱膨張率の差により発生する応力)により生じた疲労破壊⁵⁾によるクラックが見られる。このように、はんだ接合部の断面を観察し、破壊状況を評価する。

3.3.3 はんだ接合界面のSEM観察およびSIM観察

はんだ接合界面のSEM像とSIM像との比較を Photo 7 に示す。SEM像は形状を詳細に観察できるという特長があり、SIM像では結晶方位によるコントラスト情報が得られるため、組織観察が容易にできるという特長がある。ここに示した例では、SIM像より得られたNiめっき層の微細組織から、不純物の影響により結晶の成長が阻害されていることが示唆される^{6,7)}。

3.3.4 はんだ接合界面のTEM観察

はんだ接合界面のTEM観察結果を Photo 8 に示す。これは、Ni無電解めっきにAuめっきを施したランドに Sn-3.5%Ag-0.5Cu はんだを接合し、150°C で 240 h 加熱したものである。この界面は、Ni-P層/Pリッチ Ni-P層/Au-Ni-Cu-Sn層/はんだ層の構造を有している^{8,9)}。加熱により原子の拡散が進行し、Pリッチ Ni-P層にボイドが発生している様子が観察される。

3.4 はんだ接合不具合事例

はんだ接合部の不具合には以下のような事例がある。

- (1) 電子部品端子およびプリント基板めっき不具合: 被接合部となるめっき内部に不具合が内在している場合、実装後の応力により不具合部を起因とした破壊が生じることがある。
- (2) スルーホールはんだ接合部のリフトオフ: はんだの凝固過程において、各材料の熱収縮により、はんだ接合界面、ランドなどが剥離することがある。Pbフリーはんだにおける代表的な不具合である¹⁰⁾。
- (3) プリント基板分割時、防湿処理時(樹脂モールドなど)および組み立て工程などによるはんだ接合部への負荷: プリント基板実装以降の工程において、はんだ接合部に大きな負荷を与えることにより、はんだ接合部

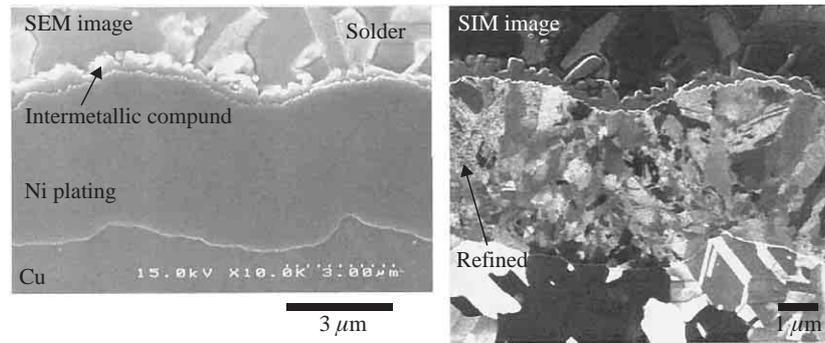


Photo 7 Comparison between SEM image and SIM image of cross section for solder joint

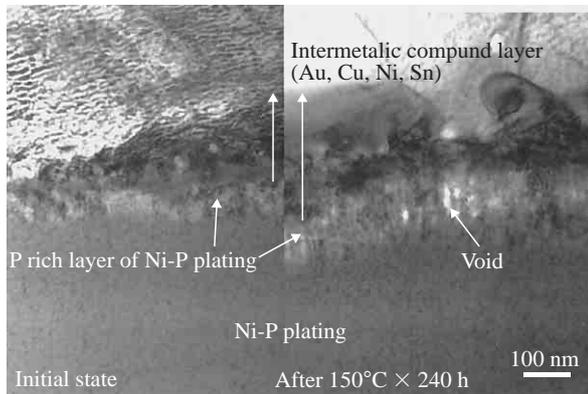


Photo 8 TEM image of cross section for Ni-P/Au/Solder

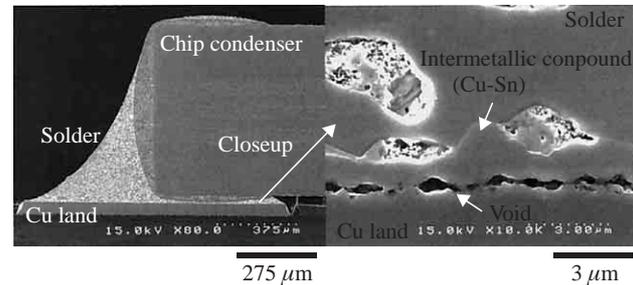


Photo 9 SEM image of cross section of solder joint for chip condenser

が破壊されることがある。

- (4) はんだ接合界面に生成する金属間化合物層の過剰成長：硬くて脆い金属間化合物が過剰成長した状態では、はんだ接合部の強度が低下することがある^{3,11)}。
- (5) はんだ接合界面の金属間化合物層に発生するカーケンダルボイドの過剰生成：金属間化合物層は、省く原子の相互拡散により生成されるが、原子の拡散速度の違いにより原子空孔が集積し、多数のボイドが生成するケースがあるカーケンダル効果^{3,12,13)}、ボイドの過剰生成により、はんだ接合強度が低下することがある。
- (6) 稼働時の熱応力および機械的応力によるはんだ接合部への負荷：はんだの疲労破壊により接合強度が低下する⁵⁾。
- (7) はんだ内部における低融点合金生成による強度劣化：部品端子めっきとはんだの組み合わせにより、低融点合金が生成され、接合強度が低下する場合がある。

以下に (5) および (7) のはんだ接合不具合の事例を紹介する。

3.4.1 カーケンダルボイド過剰生成による劣化

プリント基板実装後のセラミックコンデンサはんだ接合部にカーケンダルボイドが多数生成し、接合強度が著しく劣化した事例を **Photo 9** に示す。これは、セラミックコンデンサとランド材料の Cu とを Sn-Pb 共晶はんだを用いて接合したものである。Cu とはんだとの接合界面には、Cu と Sn との金属間化合物が生成する。実装後に高温に曝さ

れたため、金属間化合物層に多数のカーケンダルボイドが発生したケースである。

3.4.2 低融点合金生成によるボイド発生

部品端子めっきとはんだとの組み合わせによりボイドが発生した事例を **Photo 10** に示す。端子めっきとして、Snめっきおよび Sn-Pbめっきの2種を用い、Sn-8%Zn-3%BiのPbフリーはんだを使用して実装した後、ヒートサイクル試験(低温 -40°C、高温 125°C 各 30 min 保持を 700 サイクル)を実施したものである。Snめっき/Sn-8%Zn-3%Bi はんだの組み合わせの場合、熱応力の集中するバックフレットに疲労破壊が発生しているだけであるのに対し、Sn-Pbめっき/Sn-8%Zn-3%Bi はんだの組み合わせについては、端子付近に多数のクラックおよびボイドが発生していた。**Photo 11** に示した電子プローブマイクロアナリシス (EPMA: electron probe microanalysis) を用いた元素マッピングには、ボイド付近で Sn, Pb および Bi が共存している様子が見られる。Sn, Pb および Bi が共存すると、融点

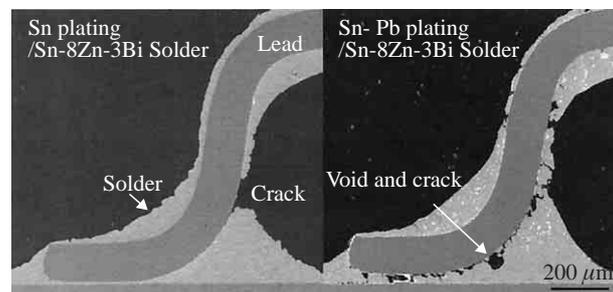


Photo 10 SEM image of cross section for solder joint after heat-cycle examination of 700 cycles

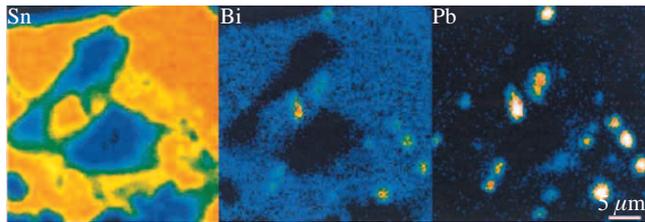


Photo 11 EPMA mapping of Sn,Pb and Bi for joint of Sn-Pb plating and Sn-Zn-Bi solder, in which voids are observed

100°C以下のSn, PbおよびBiの3元共晶合金が生成されることが知られている¹⁴⁾。ヒートサイクル試験の高温125°C保持時に, この3元共晶合金が溶融したものと考えられる。

4. おわりに

透過X線観察法, 走査電子顕微鏡, 透過電子顕微鏡などの手法を用いて, IC製品や実装されたプリント基板の不具合解析を行った実例を用い, JFEテクノリサーチで実施している信頼性試験や不具合解析技術の一部について紹介した。

本編で示したミクロからマクロにわたる不具合解析技術を駆使するとともに, 一般の物理解析技術や化学分析技術を組み合わせて, 総合的な解析をすることで, 部品自体の微小化や高密度化, 環境負荷物質の低減のための鉛フリーはんだへの移行, さらに製造の海外展開が進むなど, 変化し続ける電子部品の信頼性評価および不良解析技術ニーズに迅速に対応していきたい。

参考文献

- 1) 鈴木秀人. 実用 電子部品の疲労信頼性評価. リアライズ社, 1996, p. 129-130.
- 2) 二川清, 山悟, 吉田徹. 信頼性110番シリーズ第1巻 デバイス・部品の故障解析. 日科技連出版社, 1992, p. 32-33.

- 3) 豊田陵子, 牧野篤, 葛原一功, 高見茂成, 井上智広, 古久保英一. 車載用チップ部品のはんだ接合部における高温劣化挙動の解明と寿命予測. 松下電工技報. 2001-05, p. 41-49.
- 4) 日本材料学会 腐食防食部門委員会. 電子部品の腐食損傷と改正. さんえい出版, 1990, p. 22.
- 5) 北野誠, 岸本宗久, 木本良輔. TSOPパッケージはんだ接合部の熱疲労強度評価. mate'95. 1995, p. 149-154.
- 6) 山本健一, 赤星晴夫, 加藤隆彦, 川村利則, 木本良輔, 佐藤了平. 電解Ni/Auめっきを用いたBGA鉛フリーはんだ接合部の衝撃信頼性. mate2006. p. 311-316.
- 7) 真名子隆弘, 丸尾聡. Niめっき光沢度とAlワイヤボンディング性の関係. 神戸製鋼技報. vol. 50, no. 2, 2000-09, p. 30-33.
- 8) 平森智幸, 伊藤元剛, 谷井義治, 廣瀬明夫, 小林紘二郎. Sn-Ag系鉛フリーはんだボールのNi-P/AuめっきCSP接合強度評価. mate2004. 2004, p. 165-170.
- 9) 伊藤元剛, 迫秀樹, 伊藤俊彦, 橋本秀樹. TEMトモグラフィーを用いたカーケンダルボイドの3次元構造の評価. mate2006. p. 155-158.
- 10) 社団法人 電子情報技術産業協会 鉛フリーはんだ実装編集委員会. 鉛フリーはんだ実装技術—基礎からリフトオフ対策まで—. コロナ社, 2003, p. 188-259.
- 11) 安部可伸. SMTはんだ付け不良の解析と対策. 工業調査会. 1994, p. 120-122.
- 12) 岩波 理化学辞典 第5版. 岩波書店, 2001, p. 255.
- 13) 電子情報技術産業協会 鉛フリーはんだ実装編集委員会. 鉛フリーはんだ実装技術—基礎からリフトオフ対策まで—. コロナ社, 2003, p. 29.
- 14) 電子情報技術産業協会 鉛フリーはんだ実装編集委員会. 鉛フリーはんだ実装技術—基礎からリフトオフ対策まで—. コロナ社, 2003, p. 34-35.



伴 充行



島内 優