

フリップチップはんだ接合部における熱疲労き裂の進展および 寿命評価への X 線マイクロトモグラフィ技術の応用

Application of X-ray Micro-tomography to Evaluation of Thermal Fatigue Crack Propagation and Lifetime in Flip Chip Interconnects

高柳 毅^{*1}, 岡本佳之^{*1}, 釣谷浩之^{*2}, 佐山利彦^{*2}, 上杉健太郎^{*3}, 森孝男^{*4}
Takeshi Takayanagi^{*1}, Yoshiyuki Okamoto^{*1}, Hiroyuki Tsuritani^{*2}, Toshihiko Sayama^{*2},
Kentarō Uesugi^{*3}, Takao Mori^{*4}

^{*1} コーセル株式会社, ^{*2} 富山県工業技術センター, ^{*3} 高輝度光科学研究センター, ^{*4} 富山県立大学
^{*1}Cosel Co., Ltd., ^{*2}Toyama Industrial Technology Center, ^{*3}SPRING-8/JASRI,
^{*4}Toyama Prefectural University

フリップチップ構造体のはんだボール接合部を対象とし、高分解能 X 線 CT 装置 (SP- μ CT) を用いて、熱疲労によるき裂の発生および進展を解析した。特に、指向性の高い X 線の屈折、干渉現象を利用した屈折コントラスト法により、はんだボール内のマイクロクラックを、明確にとらえることができた。また、同一試料を時系列で観察し、疲労き裂の進展および破断寿命を評価することが可能となった。研究成果は、実際の電子基板マイクロ接合部における寿命評価を、X 線 CT を用いて非破壊で実施できる可能性を示すものである。

1. はじめに

電子基板においては実装の高密度化が進行しており、はんだ等を用いた電氣的、機械的な接合部が μm オーダの寸法となっている。いわゆるマイクロ接合部においては、疲労損傷（組織変化、疲労き裂の発生や進展など）が、電子基板の信頼性に大きな影響を与える因子であり、これらの微細な欠陥や損傷を非破壊で検出、評価する技術の開発は、エレクトロニクス関連産業においては急務となっている。しかし、非破壊検査手法として、超音波検査や X 線管球を用いた透過検査が試みられているが、現状では、 μm オーダの欠陥や損傷を認識できる十分な分解能を有する画像が得られていない。

一方、SPRING-8 においては、上杉を中心として、放射光光源を用いた高分解能の X 線マイクロ CT 装置（以下、SP- μ CT）の開発を進めている^{1,2)}。これまで、はんだ接合部における熱サイクル負荷による微細組織変化の観察³⁾、あるいは、アルミニウム合金内における疲労き裂の進展挙動解析⁴⁾などに、成果をあげている。

そこで、本研究では、典型的なマイクロ接合部であるフリップチップに用いられているはんだボール接合体構造を対象とし、SP- μ CT を用いて、熱サイクル負荷による疲労損傷について非破壊で解析、評価を行った。すなわち、同一試料を時系列的に観察することで、微細組織の変化による疲労き裂の発生、およびマイクロクラ

ックの進展から破断に至るまでの過程を定量的に解析、評価した。

2. X線マイクロCT装置の概要

SP- μ CTは、SPring-8の研究開発用の共用ビームラインBL47XUに設置されている^{1,2)}。アンジュレータからの放射光を、Siの二結晶分光器により単色化したX線を試料に照射する。このX線は、擬似的に平行光と見なせるほど高い指向性を有しており、高分解能の3次元画像を再構成することが可能である。また、単色光化することにより、そのX線エネルギーに対するX線線吸収係数(LAC, Linear Attenuation Coefficient)の3次元分布を定量的に評価することが可能である。

さらに、このX線のコヒーレントな特性を利用し、フレネル回折によってエッジを強調表示させることが可能である。すなわち、き裂や物質境界におけるX線のわずかな屈折および干渉を利用して、エッジコントラストを強調した透過像を得る。これを再構成することにより、voxel(3次元での画素)サイズの1/10オーダのマイクロクラックなどが検出可能となる⁴⁾。

SP- μ CT本体は、試料を回転させる精密回転ステージ、およびX線の透過像を撮影するX線検出装置によって構成される。X線検出装置(浜松ホトニクス社製AA50およびC4880-41S)は、試料を透過したX線を蛍光板で可視光に変換し、顕微鏡用対物レンズによって拡大した後、CCDカメラで撮影するものである。最終的に、 $0.47\mu\text{m}\times 0.47\mu\text{m}\times 0.47\mu\text{m}$ のvoxelで構成されるCT画像を得ることが可能であり、 $1\mu\text{m}$ 程度の空間分解能を達成していることが確認された。

3. 試験方法

3.1 試験体および熱サイクル試験

観察用の試験体は、SiチップとFR-4基板が、マイクロはんだボール(Sn-37wt%Pb共晶、以下、共晶はんだ)によって、フリップチップ接合された構造である。直径約 $150\mu\text{m}$ のはんだボールが、

約 $250\mu\text{m}$ 間隔で千鳥に配列されている。なお、装置の制約のため、試験体を、厚さ $0.8\text{mm}\times$ 幅 $0.8\text{mm}\times$ 長さ 10mm に加工して観察した。

この試験体の熱負荷による組織変化を観察するために、次の加速熱サイクル試験を実施した。すなわち、高温保持温度 125°C 、低温保持温度 -40°C 、保持時間 30min 、およびランプ時間 2min の条件を設定した。

3.2 透過像の撮影およびCT画像の再構成

SP- μ CTを用い、任意のサイクル数において、はんだボール内の微細組織の変化を観察した。試験体を回転ステージに固定し、これを 180° 回転させて1800枚の透過像を撮影した。試験体の回転軸は、試験体の長手方向と平行になるように設定した。透過画像一枚あたりのX線の露光時間は 0.2sec である。また、透過画像の撮影領域は、 $1000\mu\text{m}\times 656\mu\text{m}$ とした。透過画像からCT画像の再構成には、畳み込み逆投影法(Convolution back-projection method)を用いた。CT画像においては、LAC値の分布を表示することで、Pbリッチ相およびSnリッチ相の形状を可視化することができる。なお、X線エネルギーとして、SnのK吸収端よりもやや低い 29.0keV を選択した。

3.3 屈折コントラスト法による疲労き裂の検出

屈折コントラスト法によってマイクロクラックのエッジコントラストを最大化するために、試験体と蛍光板との距離を最適化した。用いた光学系では、 20mm 程度の距離が最適値であった。また、得られたCT画像とSEM画像とを比較したところ、SP- μ CTの空間分解能をはるかに超える開口量 $0.5\mu\text{m}$ 以下のマイクロクラックをとらえることが可能であった。

4. 観察疲労き裂発生寿命の評価

4.1 熱サイクル負荷による組織変化

共晶はんだは熱負荷により、Snリッチ相、Pbリッチ相の各相が凝集、粗大化すること(相成長)が知られている。Fig.1は、同一試験体の同

一断面における組織変化の例を CT 画像で示す。図中のグレースケールは、LAC 値の大きさを示す。白い部分は LAC 値が大きい Pb リッチ相に、また灰色の部分は LAC 値が小さい Sn リッチ相に、各々対応している。これらの CT 画像は、サイクル数 N の増加に伴う相成長の進行状況を明確にとらえている。はんだボールの微細組織は、X線管球を用いた CT 装置ではとらえることができなかった情報であり、SP- μ CT による観察の有効性を示すものである。

さて、著者らは、共晶はんだの相成長を、次式で定義される相成長パラメータ S によって特徴付けられることを見出した⁵⁾。

$$S = d^4 \quad (1)$$

ここに、 d は平均相寸法である。すなわち、周期的な熱負荷が加えられる場合は、 S がサイクル数 N に比例して増加するように、相成長が進行する。そこで、CT 画像を用いて相成長パラメータ S を計測し、相成長の進行状況について定量的な評価を試みた。Fig.2 は、いくつかのはんだボールについて S の計測値の N に対する変化を示す。なお、 S_0 は、 S の初期状態における値である。図より、 S の計測値が N に比例して増加していることが確認できる。

4.2 疲労き裂発生寿命の推定

さらに、著者らは、 S の 1 サイクル当たりの変化速度 ΔS とはんだ内の疲労損傷量との対応関係を調べ、次の疲労き裂発生寿命 N_i の推定式を提案している⁶⁾。

$$\Delta S = CN^\alpha \quad (2)$$

ここに、 C および α は定数である。Fig.2 より、 $\Delta S = 0.91\mu\text{m}^4$ が得られ、式(2)より疲労き裂発生寿命は、 $N_i = 310$ サイクルと推定された。一方、別の試験体に対して断面の SEM 観察を実施したところ、平均の疲労き裂発生寿命は $N_i = 300$ サイクルと決定された。双方の結果は非常によく一致しており、CT 画像を用いてマイクロはんだ接合部の疲労き裂発生寿命を推定できることを示している。

5. 疲労き裂の進展および破断寿命の評価

5.1 疲労き裂の進展状況

疲労き裂の発生後も熱サイクル負荷を継続すると、疲労き裂がはんだボール内部に進展していく。Fig.3 は、同一試験体の同一断面における疲労き裂の進展状況の例を CT 画像で示す。疲労き裂が、明確にとらえられているのが分かる。約 300 サイクルで、Cu パッド界面に近いはんだボールのコーナー部から疲労き裂が発生している。疲労き裂は、はんだボールの内部を進展しており、界面き裂ではない。熱サイクル負荷に伴い、疲労き裂は、屈曲、分岐しながら、はんだボールの中心部へと進展を続ける。また、ボイドがはんだボールの変形に伴って潰れていく状況も観察される。これらの情報は、X線管球を用いた CT 装置ではとらえることができなかったものであり、SP- μ CT による観察の有効性を示すものである。

5.2 疲労き裂の破断寿命の推定

疲労き裂発生後の CT 画像から、疲労き裂の長さを計測した。Fig.4 は、いくつかのはんだボールについて疲労き裂長さ L の計測値の N に対する変化を示す。図より、き裂進展の特徴として、ボールごとのばらつきはあるものの、き裂進展速度がほぼ一定であることが分かる。そこで、いくつかのボールについて平均のき裂進展速度を計算したところ、 $0.058\mu\text{m}/\text{cycle}$ の値が得られた。さらに、き裂進展速度を一定であると仮定して進展寿命を求めると、 $N_p = 1490$ サイクルとなった。したがって、き裂の発生寿命 $N_i = 311$ サイクルに進展寿命 $N_p = 1490$ サイクルを加えて、破断寿命は、 $N_f = 1800$ サイクルと推定された。これは、2000 サイクル経過後では、ほとんどのはんだボールが破断していることから、妥当な推定値であるといえる。

6. まとめ

放射光光源を利用した X 線マイクロ CT 装置 (SP- μ CT) を用いて、フリップチップはんだ接

合構造体における熱サイクル負荷による疲労き裂の観察、および疲労寿命の評価が可能となった。今後、実際の電子基板構造の観察に対して、SP- μ CT を適用することが期待される。

参考文献

- 1) Uesugi, K. *et al.*, *Nucl. Instr. Method., Sec. A*, Vol. **467-468** (2001), 853-856.
- 2) <http://www.spring8.or.jp/e/bl/BL47XU/index.html>
- 3) 釣谷浩之ほか, 機械学会年次大会講演論文集, No.06-1-(6) (2006), 203-204.
- 4) 戸田裕之ほか, 材料試験技術, Vol.**49**, No.1 (2004), 5-10.
- 5) 佐山利彦ほか, 機論 (A), Vol.**65**, No.640 (1999), 2553-2560.
- 6) 佐山利彦ほか, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **4**, No. 4 (2001), 298-305.

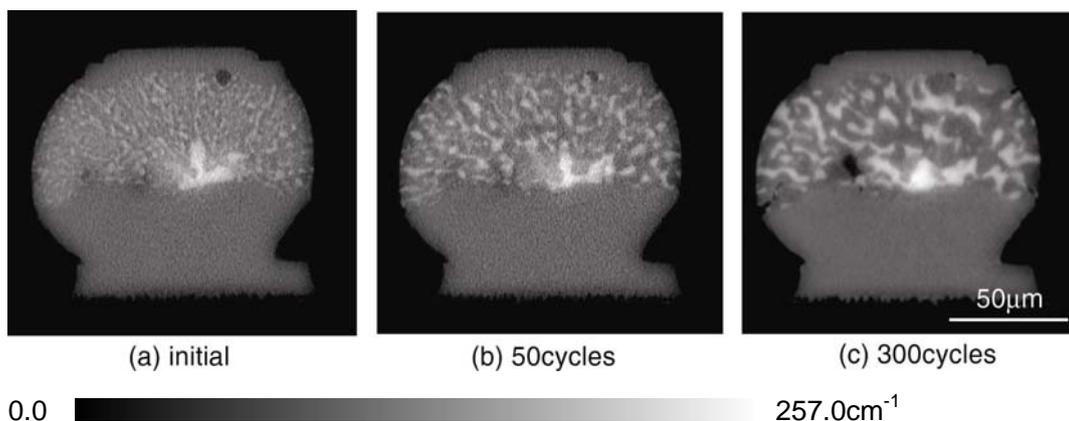


Fig.1 CT images of the same solder bump showing phase growth process by the thermal cyclic loading

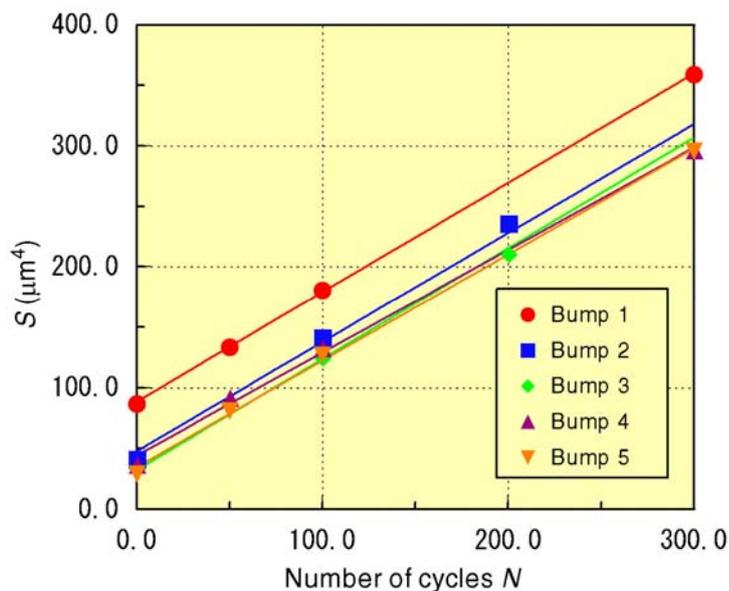


Fig.2 Phase growth process by the thermal cyclic loading in solder bumps

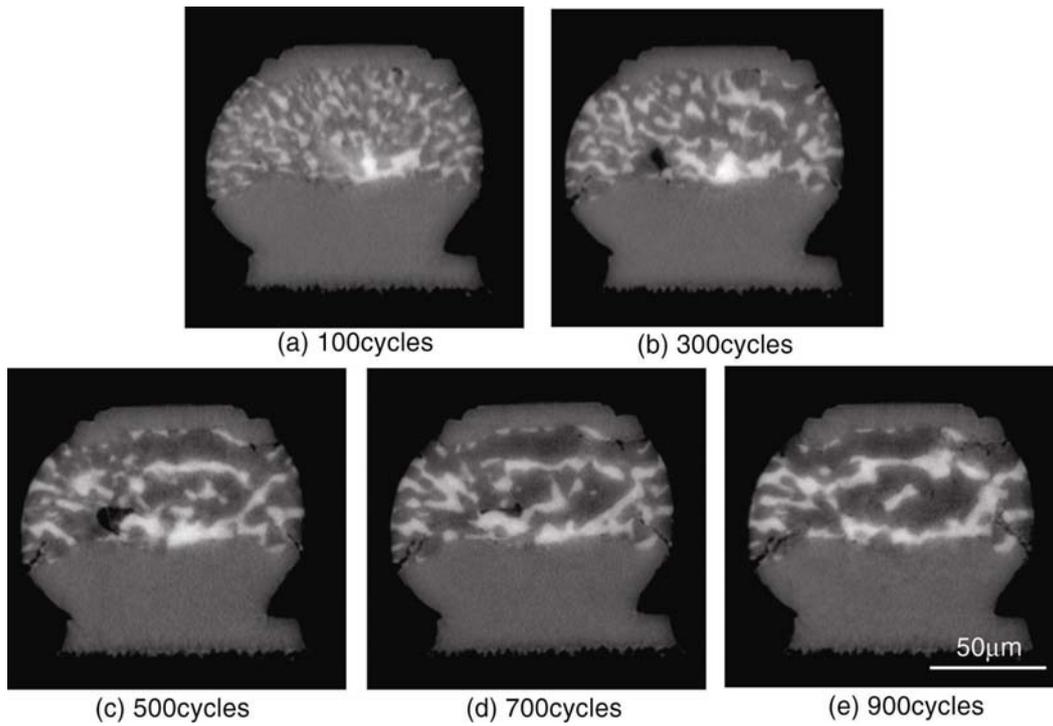


Fig.3 CT images of the same solder bump showing fatigue crack propagation process by the thermal cyclic loading

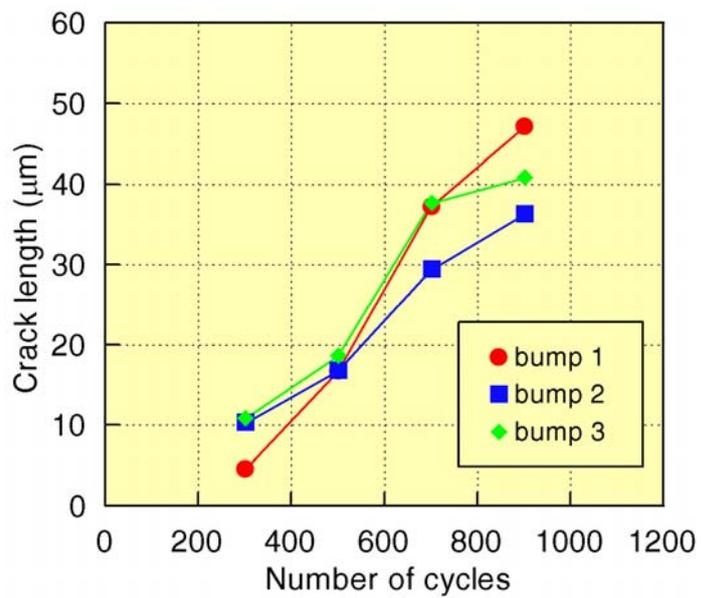


Fig.4 Crack propagation process by the thermal cyclic loading in solder bumps