

放射光 X 線 CT 装置によるフリップチップはんだ接合構造体の  
熱疲労損傷評価  
Development of Evaluation Method by X-ray Micro-tomography for  
Thermal Fatigue Damage in Flip Chip Interconnects

高柳 毅<sup>\*1</sup>, 岡本佳之<sup>\*1</sup>, 釣谷浩之<sup>\*2</sup>, 佐山利彦<sup>\*2</sup>, 上杉健太郎<sup>\*3</sup>, 森孝男<sup>\*4</sup>  
Takeshi Takayanagi<sup>\*1</sup>, Yoshiyuki Okamoto<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Tsuritani<sup>\*2</sup>, Toshihiko Sayama<sup>\*2</sup>,  
Kentaro Uesugi<sup>\*3</sup>, Takao Mori<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> コーセル株式会社, <sup>\*2</sup> 富山県工業技術センター, <sup>\*3</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>\*4</sup> 富山県立大学  
<sup>\*1</sup>Cosel Co., Ltd., <sup>\*2</sup>Toyama Industrial Technology Center, <sup>\*3</sup>SPRING-8/JASRI,  
<sup>\*4</sup>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- $\mu$ CT) を用いて、熱疲労による微細組織の変化を解析した。その結果、同一試料を時系列で観察し、Pb リッチおよび Sn リッチ各相が成長する過程を、著者らが提案している相成長パラメータを用いて定量化することができた。さらに、相成長パラメータの 1 サイクルあたりの変化量に着目して、疲労き裂の発生寿命を評価することも試みた。研究成果は、電子基板におけるマイクロ接合部の寿命評価に、X 線マイクロ CT による非破壊検査を利用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 $\mu\text{m}$  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ける初期接合不良 (ボイド、接合界面の剥離など) および疲労損傷 (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、微細組織レベルでの信頼性評価が必要とされている。しかし、 $\mu\text{m}$  オーダの欠陥や損傷を検出し、マイクロ接合部の信頼性を評価することは、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた断面観察以外の方法では極めて困難である。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、微細組織を観察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- $\mu$ CT) の開発を進めている<sup>1,2)</sup>。さらに、佐山らは、電子基板はんだ接合部において、熱サイクル負荷による微細組織の変化を観察し、その熱疲労寿命を推定する手法を確立している<sup>3)</sup>。

そこで、本研究では、典型的なマイクロ接合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- $\mu$ 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、微細組織を表す CT 画像を再構成し、これらの画像を用いて、同一試料を時系列的に観察することで、熱サイクル負荷によるはんだボールの疲労損傷を、その微細組織の変化から定量的に検討した。

## 2. X線マイクロCT装置の概要

SP- $\mu$ 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<sup>1,2)</sup>。Fig.1は、SP- $\mu$ CTの概要を示す。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高い平行度を有しており、高分解能の3次元画像を再構成することが可能である。さらに、単色光化することにより、そのX線エネルギーに対する線吸収係数(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。

SP- $\mu$ 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(3次元での画素)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 $0.8\text{mm}$ ×幅 $0.8\text{mm}$ ×長さ $10\text{mm}$ 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 $125^\circ\text{C}$ 、低温保持温度 $-40^\circ\text{C}$ 、保持時間 $30\text{min}$ 、およびランプ時間 $2\text{min}$ 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- $\mu$ CT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 $180^\circ$ 回転させて1800枚の透過画像を撮影した。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 $0.2\text{sec}$ 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 $29.0\text{keV}$ を選択した。これは、はんだ各相におけるLAC値の差を大きくし、高いコントラストを付けて表示するとともに、X線エネルギーを高くして、Pb相におけるX線の減衰をできる限り抑制するためである。

## 4. フリップチップ構造体の3次元観察

フリップチップ構造体を3次元的にとらえるために、全CT画像を用いて、3次元のボリュームレンダリング画像を抽出した。Fig.2は、熱サイクル試験を300サイクル実施した後の試験体について、3次元画像の例を示す。なお、内部構造の観察を容易にするために、Siチップおよびアンダーフィルは表示していない。この画像から、はんだボールおよび基板の内部構造が、LAC値の違いとして明確にとらえられていることが分かる。次に、Fig.3は、Fig.2と同一の試験体について、回転軸(z軸)と垂直な平面(x-y面)での、はんだボール付近のCT画像の例を示す。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。また、CT画像では、ボイド(ボールの左上)やリフロー接合した時に特徴的に現れる組織である比較的大型のPbリッ

チ相（ボールの右下）も認められる。共晶はんだを比較的速い冷却速度によって不均一凝固を行った場合は、このような組織が現れるものと推測される。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- $\mu$ CTによる観察の有効性を示すものである。

## 5. CT画像による熱疲労損傷評価

### 5.1 熱サイクル負荷による組織変化

Sn-Pb 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.3 は、同一の試験体における組織変化の例を、回転軸と平行な同一の x-y 面における CT 画像で示す。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。特に、初期組織から  $N=100$  までの相成長は、その後の変化と比較して急激なものとなっている。

次に、Fig.4 は、同一のはんだボール内の中心部分における voxel について、その LAC 値の頻度分布の変化を示す。熱サイクルの進行に伴い、LAC 値のピークが、Sn 側（Sn の LAC 値は、 $57.7\text{cm}^{-1}$ ）へシフトしており、また高い LAC 値側でも Pb（Pb の LAC 値は、 $375.6\text{cm}^{-1}$ ）に比較的近い小さなピークが徐々に現れてきている。すなわち、熱サイクルとともに、各相においては、相手原子の固容量が減少し、純粋な Pb 相および Sn 相に近づきつつあることが分かる。

さて、著者らは、共晶はんだの相成長を系統的に SEM で観察し、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<sup>3)</sup>。

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

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.5 は、 $S$  の計測値の  $N$  に対する変化を示す。 $S$  の計測は、はんだボールの中心付近をとる同一の x-y 面において行った。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。

### 5.2 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  $\Delta S$  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<sup>4)</sup>。

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

ここに、 $C$  および  $\alpha$  は定数である。Fig.5 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、 $N_i = 311$  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寿命を推定できる可能性を示しているといえる。

## 6. まとめ

放射光光源を利用した X 線マイクロ CT 装置（SP- $\mu$ 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組織変化（相成長）の観察、および疲労き裂の発生寿命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- $\mu$ 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) 佐山利彦ほか, 機論(A), Vol.**65**, No.640 (1999), 2553-2560.
- 4) 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.

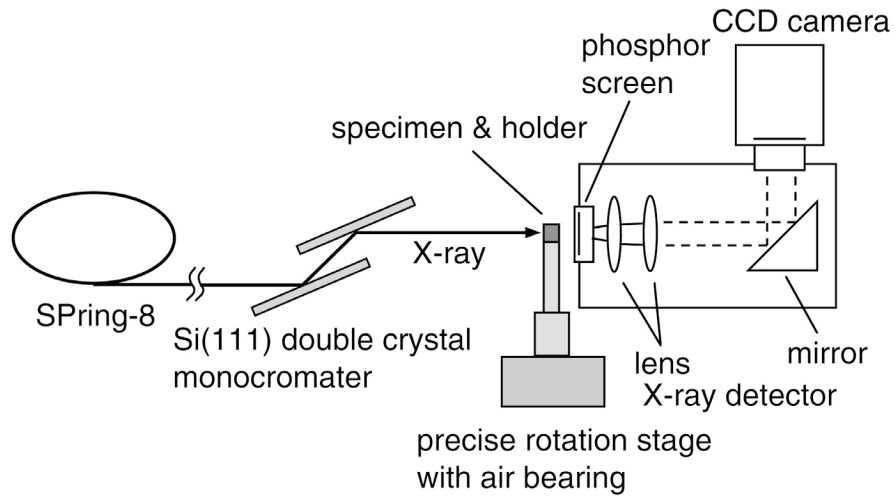


Fig.1 Schematic view of an X-ray micro-tomography system called SP- $\mu$ CT in SPring-8

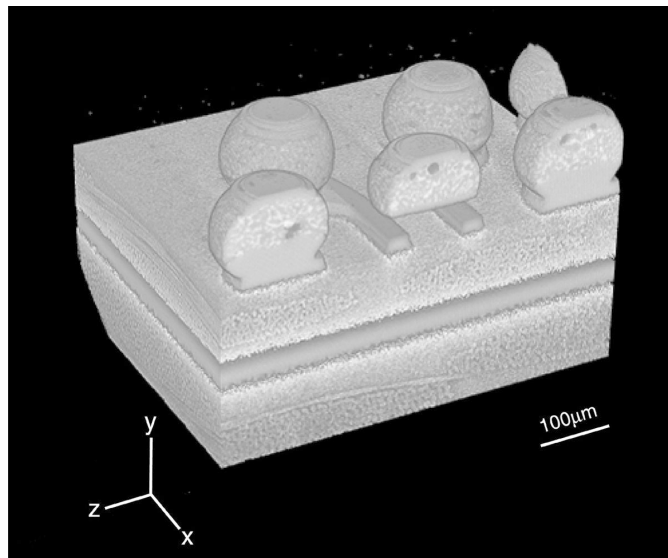
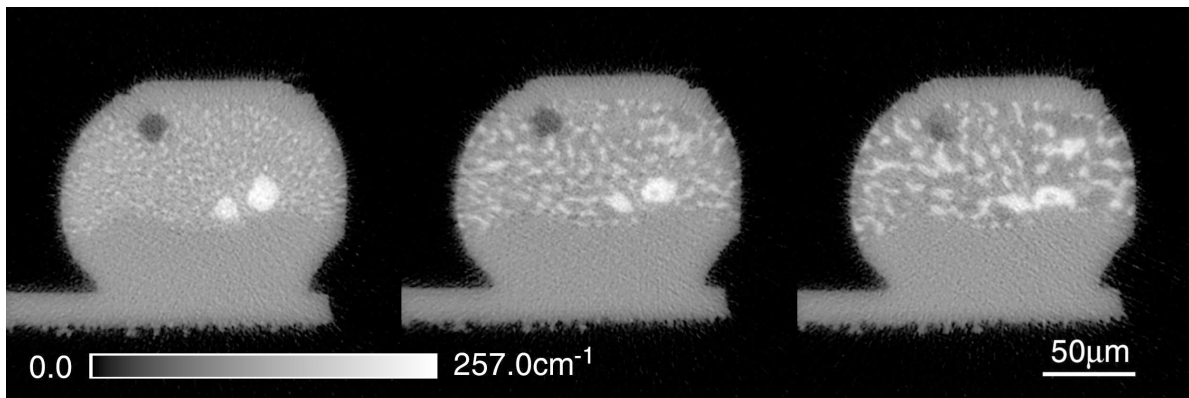


Fig.2 Volume-rendering image of flip chip specimen



(a) Initial

(b) After 100 cycles

(c) After 300 cycles

Fig.3 CT images of the same solder bump showing phase growth process by thermal cyclic loading

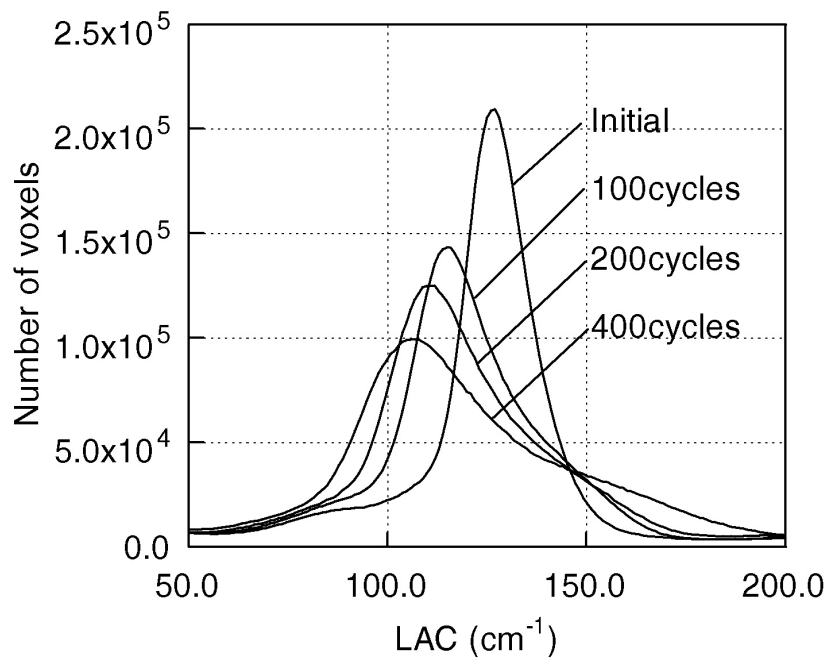


Fig.4 Change of LAC histogram by the thermal cyclic loading in a solder bump

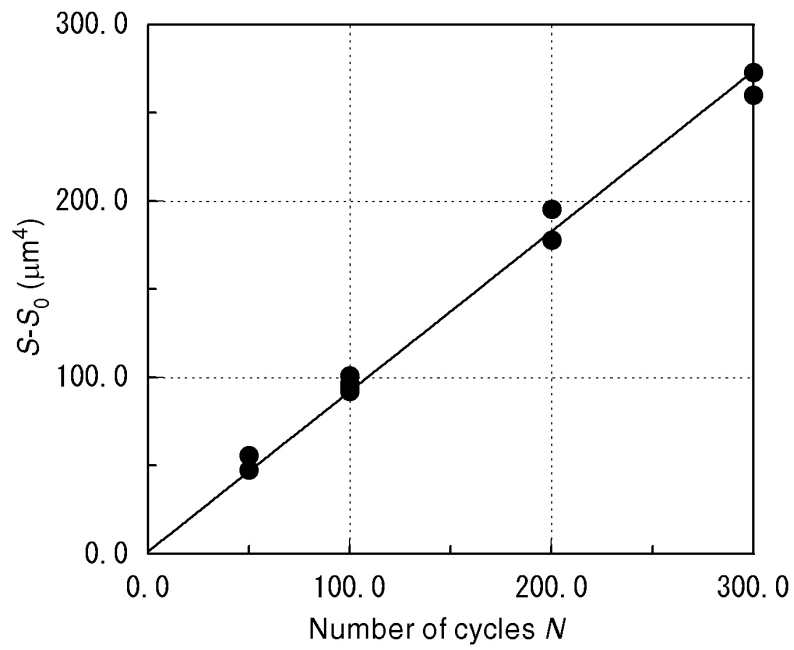


Fig.5 Phase growth process by the thermal cyclic loading in solder bumps