

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560096  
 研究課題名（和文） 放射光 X 線 CT を用いたマイクロ接合部における熱疲労寿命の  
 評価技術の開発  
 研究課題名（英文） Development of Evaluation Technique for Thermal Fatigue Lifetime  
 in Micro-joints by Synchrotron Radiation X-ray CT  
 研究代表者  
 佐山 利彦（SAYAMA TOSHIHIKO）  
 富山県工業技術センター・機械電子研究所・副主幹研究員  
 研究者番号：40416128

研究成果の概要：21 世紀の新しい光である放射光を光源とする X 線 CT の技術を、実際の電子基板に用いられている微細な接合部における繰返し加熱によって発生する損傷の評価に初めて適用しました。その結果、微細な接合部におけるき裂の発生から破断に至るまでのすべての過程を、電子基板を破壊することなく観察して、その寿命を推定する技術を開発できました。この技術は、電子機器の信頼性の向上と新しい機器の開発に貢献するものです。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,400,000	0	2,400,000
2007 年度	600,000	180,000	780,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	330,000	3,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：信頼性設計、高密度実装、マイクロ接合部、X 線マイクロ CT、放射光、はんだ、熱疲労、寿命評価

## 1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクス機器開発の動向は、小型化、実装の高密度化である。これに伴い、高密度実装技術の信頼性保証が、電子機器を開発するにあたってのボトルネックとなっている。このため、米国やアジア諸国では、実装技術の研究機関が設立され、国家的なプロジェクトとして、新しい実装技術の開発が進められている。我が国では、日本機械学会の

エレクトロニクス機器の信頼性評価技術に関する研究分科会や溶接学会のマイクロ接合研究委員会などが、産学官の連携によって実装技術、信頼性評価技術の開発をリードしている。この中で最も重要な研究テーマの一つは、微小な電氣的、機械的な接合部における高信頼性技術である。いわゆるマイクロ接合部においては、初期接合不良（ボイド、接合界面の部分剥離など）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最も大きな影響を与える因子である。

しかし、マイクロ接合部の疲労強度に対する微細組織の影響については、十分に明らかになっていないのが現状である。その第一の原因は、マイクロ接合部の疲労強度は、製造プロセスによる残留ひずみや組織の不均一性、接合境界からの原子拡散などの影響を受けるので、バルク試験体による強度試験データでは評価が困難であるという点にある。したがって、マイクロ接合部の疲労強度は、実際の電子基板における接合構造で評価する必要がある。第二は、マイクロ接合部における欠陥や損傷状況の変化を捕らえる非破壊検査手法が、これまでなかったことである。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、十分な解像度の画像が得られていない。

ところが、近年、大型放射光研究施設 SPring-8 において、1 $\mu$ m 程度の空間分解能を有する X 線マイクロ CT 装置 (以下 SP- $\mu$ CT) を開発し、宇宙塵の内部構造の解明、合金の凝固や結晶成長機構の解明などに適用できるようになった。そこで、本研究では、この X 線マイクロ CT 装置をさらに改良し、実際の電子基板のマイクロ接合部における疲労損傷を、微細組織レベル (組織変化や疲労き裂を直接観察すること) で評価することを試みる。

## 2. 研究の目的

LSIチップの実装などに用いられている典型的なマイクロ接合部であるフリップチップのはんだ接合部を主な対象として、熱疲労による相成長 (微細組織の変化)、疲労き裂の発生や進展などを、SP- $\mu$ CTを用いて解析、評価する。具体的な目標は次のとおり。

- (1) 実際の電子機器に用いられているフリップチップ実装基板のマイクロはんだ接合部を非破壊で観察することを可能にするため、SP- $\mu$ CTの位置決めテーブルやCT画像の再構成アルゴリズムを新たに開発する。
- (2) マイクロはんだ接合試験体を製作し、はんだ接合部の熱疲労による相成長 (微細組織の変化) 過程および疲労き裂の成長過程を3次元、時系列的に捕らえ、疲労損傷の進行を微細組織レベル (組織変化や疲労き裂を直接観察すること) で明らかにする。
- (3) SP- $\mu$ CTを用いて得られたCT画像や3次元画像により、マイクロはんだ接合部の熱疲労寿命を推定する方法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究において用いた SP- $\mu$ CT は、SPring-8 の研究開発用の共用ビームライン BL47XU および BL20XU において利用可能である。図 1 は、SP- $\mu$ CT の模式図および回転ステージ周辺の写真を示す。光速に近い速度で運動する電子を、アンジュレータを用いて小刻みに繰返し蛇行させることで、極めて明るい特定波長帯域の放射光が得られる。この放射光は、擬似的に平行光とみなせるほど指向性が高く、高い空間分解能を有する CT 画像を得るのに適している。さらに、この放射光を Si (111) の二結晶分光器を用いて単色化することで、単一波長の X 線が得られる。単色化された X 線を試料に照射し、撮影した透過画像から CT 画像を再構成する。得られた CT 画像は、使用した X 線のエネルギーに対応して、試料を構成する物体の LAC (Linear Attenuation Coefficient, 以下 LAC) 値の 2 次元分布を定量的に表示したものである。

さらに、屈折コントラスト法と呼ばれる手法を用いてエッジを強調して表示させることが可能である。これは、放射光 X 線のコヒーレントな特性を利用し、フレネル回折により、エッジを強調表示させる手法である。通常の CT 撮影撮影では、X 線の屈折の影響を極力少なくするために、検出器と撮影対象は可能な限り近づける。屈折コントラスト法においては、検出器と撮影対象の距離を適切に選択することで、物質の界面や、き裂における X 線のわずかな屈折、干渉を利用してエッジコントラストを強調した透過画像を撮影する。この透過画像を再構成して、voxel (3次元における画素) サイズ以下の開口量を有する微細なき裂などを強調して表示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透過画像を撮影する X 線検出装置により構成される。X 線検出装置 (浜松ホトニクス

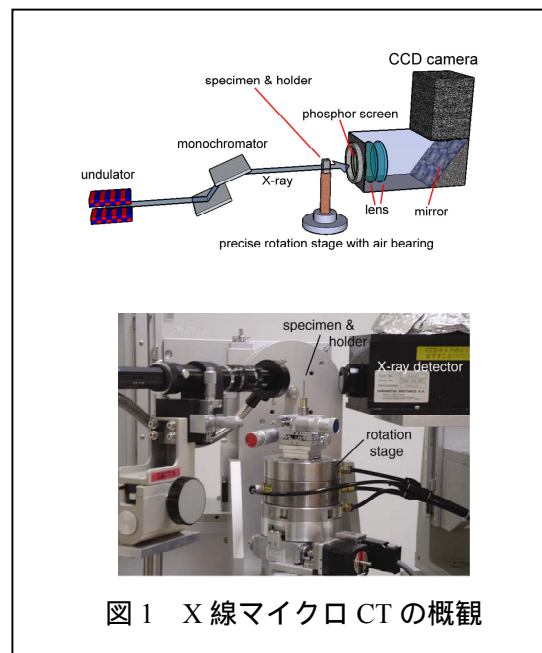


図 1 X 線マイクロ CT の概観

社製AA50およびC4880-41S)は、試料を透過したX線を蛍光板により可視光に変換し、これを顕微鏡用対物レンズにより拡大し、CCDカメラで撮影するものである。最終的に1辺が $0.47\mu\text{m}$ のvoxelで構成されるCT画像を撮影することが可能であり、約 $1\mu\text{m}$ の空間分解能を有していることが確認された。

#### 4. 研究成果

本研究において得られた成果は、次のとおりである。

##### (1) 実際のマイクロ接合部の内部構造を非破壊で鮮明に可視化

フリップチップ構造体を3次元的にとらえるために、撮影したCT画像全体を使用して3次元のボリュームレンダリング画像を作成した。図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。図中のz軸方向が試験体の長手方向に対応する。図では、試験体の一部のみが表示されている。また、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。この画像より、はんだバンプ内部の組織やFR-4基板のガラス繊維が、はっきりと捉えられていることが分かる。このような画像は、既存の産業用の非破壊検査装置では得ることができなかったものであり、SP- $\mu\text{CT}$ による非破壊観察の有効性を示すものである。

##### (2) CT画像によるはんだバンプの微細組織の変化から、その疲労き裂発生寿命を評価

共晶はんだは、Snリッチ相およびPbリッチ相の各相が、熱負荷により凝集、粗大化すること(相成長)が知られている。図3は、熱サイクル試験において、同一はんだバンプの同一断面における相成長の例をCT画像で示す。各相の形状がLACの違いとしてはっきり捉えられている。図中のグレースケール

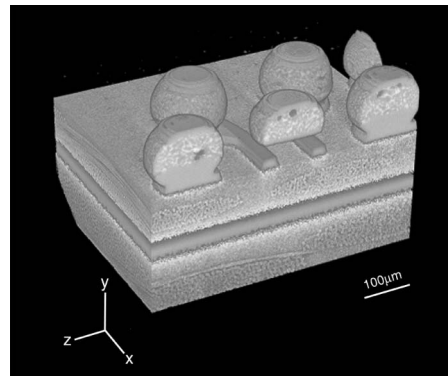


図2 マイクロ接合試験体の3次元画像の例

は、LACの大きさを示す。白い部分がLACの大きいPbリッチ相に、灰色の部分がLACの小さいSnリッチ相に、それぞれ対応している。熱サイクル試験の条件が異なるものの、これらのCT画像においては、熱サイクル数 $N$ の増加に伴って、相成長が進行していく過程が明確に捉えられている。このように、はんだバンプ内部の組織およびその変化は、X線管球を用いたCT装置ではこれまで捉えられなかった情報であり、単色光を用いたSP- $\mu\text{CT}$ によって可能となった。

さらに、著者らは、相成長パラメータ $S$ (微細組織の平均相寸法の4乗で定義)を導入し、1サイクルあたりの $S$ の変化速度 $\Delta S$ を評価指標として用いて、熱疲労き裂発生寿命 $N_f$ について次のような推定式を提案している。

$$\Delta S = CN_f^{-\alpha} \quad (1)$$

ここに、 $C$ および $\alpha$ は定数である。実施した熱サイクル試験においては、CT画像より、 $\Delta S$ の平均値が、 $\Delta S = 0.91\mu\text{m}^4$ と得られた。これを式(1)に適用して、疲労き裂発生寿命は、 $N_f = 310$ と推定された。比較のため、同じ試験体に対して、SEMによる断面観察に基づいて疲労き裂の発生寿命を評価した。その結果、平均の疲労き裂発生寿命 $N_{ave}$ は、 $N_{ave} = 300$ サイクルと決定された。得られたCT画像による疲労き裂発生寿命の推定値 $N_f$

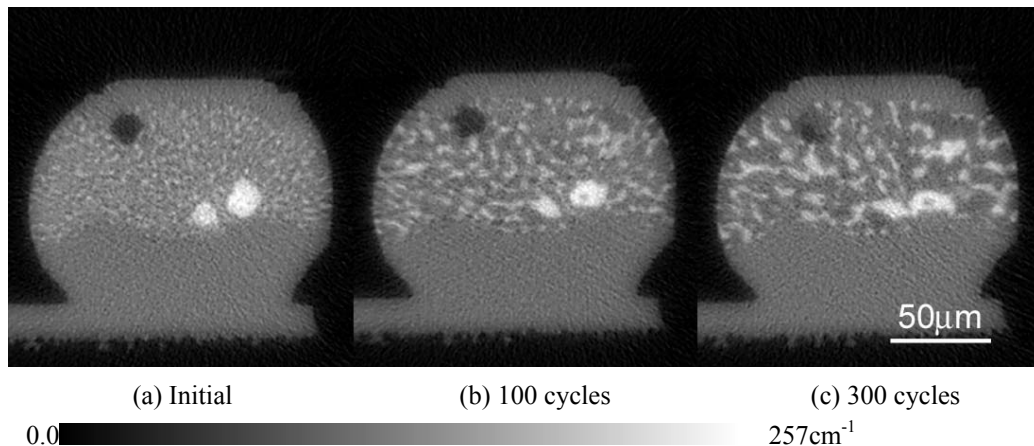


図3 熱サイクル負荷による相成長過程のCT画像による表示

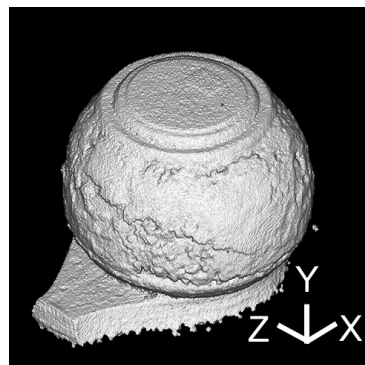
と SEM による断面観察に基づく平均の疲労き裂発生寿命  $N_{me}$  とは、非常に良く一致しており、SP- $\mu$ CT を用いて撮影した CT 画像から、疲労き裂発生寿命を精度よく推定できることが分かる。

(3) はんだバンプにおける疲労き裂進展過程の可視化および破断寿命の評価

き裂の 3 次元的な進展状況を把握するため CT 画像からき裂部分のみを抽出し、3 次元画像を作成した。図 4 は、はんだ接合部の外観、および熱サイクル試験 (500 サイクル、900 サイクル、および 1500 サイクル) 実施時における疲労き裂の 3 次元画像をそれぞれ示す。CT 画像上では、空隙は LAC が周囲より低いので、ポイドおよびき裂は、はんだよりも暗く表示される。図では、その形状から明らかにポイドと判断できる空隙は、除去した。また、最大長さ  $5\mu\text{m}$  未満の非常に小さな、孤立した空隙も同様に除去した。これは、き裂の観察、を容易にし、さらにき裂長さの変化を評価する際に悪影響を及ぼさないようにするためである。図中の  $z$  軸方向が試験体の長手方向である。より大きな熱ひずみが発生する試験体長手方向に対して、Cu パッドとはんだバンプとの界面付近 4 箇所から発生した疲労き裂が、はんだ内部に向かって直線的に進展していく状況が捉えられている。

次に、疲労き裂発生後の CT 画像から、はんだバンプの中心断面におけるき裂長さの測定を行った。すなわち、いくつかのはんだバンプについて、中心断面において最も長い疲労き裂についてその長さ  $L_{max}$  を測定した。その結果、バンプごとにばらつきがあるものの、疲労き裂の進展速度がほぼ一定であることが分かった。そこで、これらのバンプ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、破断に至る進展寿命  $N_p$  を求めたところ、 $N_p = 1490$  サイクルと得られた。なお、最大長さの疲労き裂がバンプ中心に到達したときを破断と定義した。このき裂進展寿命に、前述のき裂発生寿命の推定値  $N_i = 310$  を加えて、破断寿命  $N_f$  は、 $N_f = 1800$  サイクルと推定された。

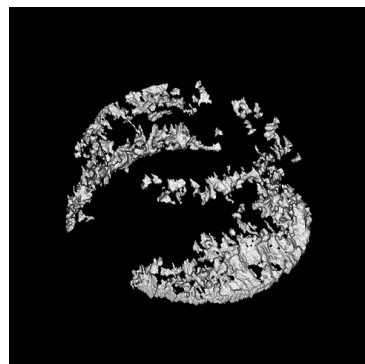
比較のため、同じ試験体に対しての SEM による断面観察に基づいて、疲労き裂の最大長さ  $L_{sem}$  を計測した。  $N = 1500$  サイクルにおいては、 $L_{sem} = 58.9\mu\text{m}$  と得られ、疲労き裂が最大でバンプ径の約 80% まで進展していた。さらに、 $N = 2000$  サイクルにおいては、 $L_{sem} = 86.4\mu\text{m}$  と得られ、疲労き裂がバンプ中心まで達し破断の状態にあった。これより、破断寿命の推定値は、妥当なものであるといえる。



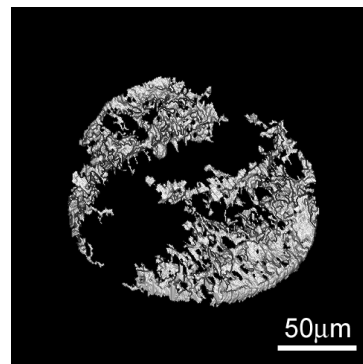
(a) solder bump



(b) 500 cycles



(c) 900 cycles



(d) 1500 cycles

の 3 次元画像による表示

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- Tsuritani, H., Sayama, T., Uesugi, K., Takayanagi, T., Mori, T., Nondestructive Evaluation of Thermal Phase Growth in Solder Ball Micro-joints by Synchrotron Radiation X-ray Micro-tomography, *Trans. ASME J. of Electronic Packaging*, Vol. **129**, No. 4 (2007), pp. 434-439. (査読有)
- 釣谷浩之, 佐山利彦, 高柳毅, 上杉健太郎, 森孝男:放射光X線マイクロCTによるSn-Pbはんだ接合部における微細組織変化の観察, 日本金属学会会報 までりあ, Vol. **46**, No.12 (2007), p. 821. (査読有)
- 釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 森孝男:放射光X線マイクロCTによるフリップチップはんだ接合部における熱疲労寿命の非破壊評価, 日本機械学会論文集A, Vol. **75**, No.755 (2009) (掲載予定). (査読有)

〔学会発表〕(件 4 件)

- 釣谷浩之, 佐山利彦, 上杉健太郎, 高柳毅, 岡本佳之, 森孝男:放射光X線CT装置によるフリップチップ接合部における熱疲労き裂の観察, *Proc. of Symposium on Microjoining and and Assembly Technology in Electronics*, Vol. **13** (2007), pp. 303-308. (査読有)
- Turitani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K., Mori, T., Application of Synchrotron Radiation X-ray Micro-tomography to Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Damage in Flip Chip Interconnects, *Proc. of InterPACK'07*, ASME (2007), IPACK2007-33170. (査読有)
- 釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 森孝男:放射光X線CTを用いたフリップチップ接合部における熱疲労き裂進展過程の評価, 日本機械学会 2007年度年次大会講演論文集, Vol. **7** (2007), pp. 221-222. (査読有)
- 釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 森孝男:放射光X線CTによる3次元データを用いたフリップチップはんだ接合部のき裂進展過程の評価, 第18回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, Vol. **18** (2008), pp. 291-294. (査読有)

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 件)

- 森孝男, 佐山利彦, 長井喜昭, 高柳毅: “はんだ接合部の疲労評価方法,” 特許 第 4168090 号, 2008.8.15. (国内)

〔その他〕

- Tsuritani, H., Takayanagi, T., and Sayama, T., Application of X-ray Microtomography to Evaluate Thermal fatigue Crack Propagation and Lifetime in Flip Chip Interconnects, *SPring-8 Research Frontiers 2007* (2008), pp. 156-157. (査読有)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏名: 佐山 利彦  
所属機関・部局名・職名:  
富山県工業技術センター・  
機械電子研究所 機械システム課・  
副主幹研究員  
研究者番号: 40416128

(2) 研究分担者

氏名: 釣谷 浩之  
所属機関・部局名・職名:  
富山県工業技術センター・  
中央研究所 加工技術課・  
主任研究員  
研究者番号: 70416147

(3) 連携研究者

氏名: 上杉 健太郎  
所属機関・部局名・職名:  
財団法人高輝度光科学研究センター・  
利用研究促進部門イメージングチーム・  
研究員  
研究者番号: 80344399

氏名: 森 孝男  
所属機関・部局名・職名:  
富山県立大学・工学部・教授  
研究者番号: 30275078