

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 31 日現在

機関番号：83205

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560120

研究課題名(和文)放射光CTを適用した総合的非破壊モニタリングによる実装基板の信頼性評価技術の開発

研究課題名(英文)Development of Reliability Evaluation Technique for Fatigue Failure in Electronic Packages by Applying Integrated Nondestructive Monitoring Based on Synchrotron Radiation Micro-tomography

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 機械システム課・課長

研究者番号：40416128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：実際の電子基板における微細な接合部の観察、評価を目的として、放射光ラミノグラフィを適用する研究を初めて行いました。繰返し加熱による接合部の変形状態、および疲労き裂の発生から破断に至るまでの過程を、電子基板を破壊することなく継続的にモニタリングして、その寿命を総合的に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。

研究成果の概要(英文)：In this work, synchrotron radiation laminography technique was firstly applied to the nondestructive observation and evaluation of actual micro-joints on printed circuit boards. The developed technology realized nondestructive monitoring of the joints through the fatigue process, in which the joints deform, the cracks initiate, propagate, and reach to failure, and then led to the integrated estimation of the fatigue lifetime. This result will widely contribute to the improvement of the reliability and the development of electronic equipment.

研究分野：工学

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、高密度実装化である。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。しかし、実装の高密度化は非常な勢いで進行し、接合部は数十  $\mu\text{m}$  オーダーにまで小型化しており、接合部における欠陥や損傷状況の変化を直接観察する非破壊検査手法の開発が、エレクトロニクス関連業界において強く望まれている。

そこで、研究代表者ら(上記の研究分科会の委員)は、まったく新しい発想から、21世紀の光として多くの可能性を持つ放射光を光源とする X 線マイクロ CT 技術を適用して、非破壊ではんだ接合部の相成長(組織変化)およびき裂進展過程を観察し、疲労寿命を推定する研究を行ってきた。本研究は、これまでの研究を進展させ、放射光 X 線マイクロ CT 技術に基づいて、「デジタル画像相関法による 3D ひずみ分布の直接計測技術」、「マイクロ疲労き裂進展過程の 3D 可視化技術」等の非破壊観察技術を開発し、統合化する初めての試みである。さらに、同一の接合部を総合的、継続的に非破壊モニタリングすることによって、供用中の基板におけるマイクロ接合部の余寿命を診断する新しい概念の信頼性評価技術へと発展させる。

### 2. 研究の目的

実際の基板に用いられている典型的なマイクロ接合部である FBGA (Fine pitch Ball Grid Array)、微小チップ部品の接合部、およびダイアタッチ接合部などを対象として、その熱疲労による損傷の全過程(組織変化、疲労き裂の発生、および進展)に、放射光 X 線マイクロ CT を適用し、組織、ひずみ、およびき裂を総合的に非破壊で 3D 可視化する技術を開発する。さらに同一のマイクロ接合部を継続的に非破壊モニタリングして余寿命を診断する新しい概念の信頼性評価技術を開発する。

#### (1) マイクロ疲労き裂進展過程の 3D 可視化技術の開発

放射光 X 線マイクロ CT を適用し、電子基板(平板構造)の観察に特化したラミノグラフィ技術を開発する。これにより、基板上的マイクロ接合部を完全に非破壊で観察し、疲労き裂の進展過程を 3 次元、時系列的に定量化する。

#### (2) マイクロ接合部におけるひずみ分布の 3D 可視化技術の開発

放射光 X 線マイクロ CT によって得られた CT 画像に基づき、デジタル画像相関法を適用して、マイクロ接合部におけるひずみ分布の 3D 可視化およびモニタリング技術を開発する。

#### (3) 総合的な非破壊モニタリングによる信頼性評価技術の開発

実際の基板上にある同一のマイクロ接合部に対し、組織、ひずみ、およびき裂の総合的な非破壊モニタリングにより、その余寿命を逐次診断する新しい概念の信頼性評価技術を開発する。

### 3. 研究の方法

本研究において用いた X 線マイクロ CT 装置(以下、SP- $\mu\text{CT}$ )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。SPring-8 においては、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) 値の 2 次元分布を定量的に表示したものとなる。

しかし、平板状の電子基板においては、基板の長手方向に X 線が十分に透過せず、通常の SP- $\mu\text{CT}$  では完全な再構成画像を得ることができない。この問題への対応策の一つとして、放射光 X 線ラミノグラフィの適用を試みた。図 1 は、放射光 X 線ラミノグラフィの模式図を示す。放射光 X 線ラミノグラフィでは、X 線の照射方向に対して回転軸を傾斜させることで、常に X 線が十分に透過する状態で撮影を行い、問題の解決を図る。しかし、回転軸の傾斜角が増すに従って X 線は透過し易くなる一方で、断層画像の再構成に必要なデータの欠損が多くなり、基板面と直交する断

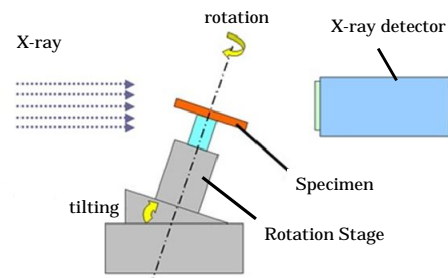


図 1 放射光 X 線ラミノグラフィの模式図

面においてアーティファクトが顕著になる。このため、高い画質の再構成画像を得るためには、X線が十分透過する範囲で、回転軸の傾斜を極力小さくする必要がある。

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 カメラあるいは sCMOS カメラで撮影するものである。最終的に一辺が約 0.5  $\mu\text{m}$  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。

さらに、デジタル画像相関法を用いて、SP- $\mu$ CT により撮影した CT 画像から、マイクロ接合部内におけるひずみ分布の計測を試みる。デジタル画像相関法では、変形前の画像における各画素が、物体の変形後にどの位置に移動したのかという変位ベクトルを決定するために、変形前の画像において対象とする画素を中心とするサブセット領域を設定し、これと最も類似している領域を変形後の画像において探索する。

#### 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) 実際の電子基板におけるマイクロ接合部の疲労き裂を非破壊で可視化

通常の CT では、平板状の電子基板のような極端に X 線の透過経路が長くなる方向がある試料の場合、高画質の CT 画像を再構成することが困難である。この問題を解決する方法の一つとして、放射光 X 線 CT にラミノグラフィの適用を試みた。放射光 X 線ラミノグラフィを用いた際、き裂をどの程度捉えているかを確認するために、全く同じ試験体について SP- $\mu$ CT と放射光 X 線ラミノグラフィで撮影を行い、断層画像を比較観察した。試験体は、FBGA はんだ接合構造であり、従来の SP- $\mu$ CT で撮影可能なサイズである縦 1 mm  $\times$  横 1 mm  $\times$  長さ 10 mm に加工したものをを用いた。はんだバンプの直径は約 360  $\mu\text{m}$  である。図 2 は、同一バンプ内部について 3 次元画像を比較した例を示す。き裂を黄色、ポイドを緑色、および引け巣をオレンジ色で示す。また、内部構造の観察を容易にするために、Si チップおよび基板は表示していない。3 次元画像から SP- $\mu$ CT とラミノグラフィにおいて、き裂をはじめとする形状に大きな違いは見られなかった。電子基板を全く加工することなく完全な非破壊で疲労き裂を観察することが可能となった。

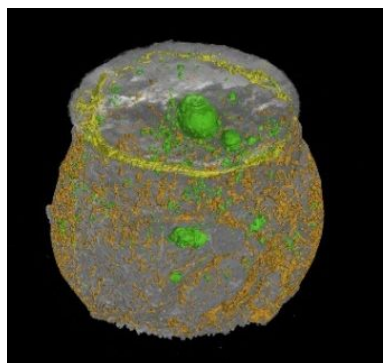
(2) はんだ接合部におけるデジタル画像相関法による変位計測

放射光 X 線ラミノグラフィにより撮影したフリップチップはんだ接合部の CT 画像に対して、デジタル画像相関法によるひずみ計測

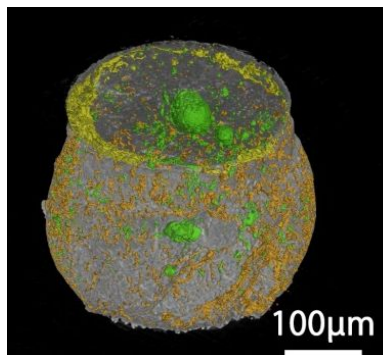
の可能性について検討を行った。図 3 は、同一の試験体に対して、無負荷の初期状態において撮影した再構成画像を変形前の画像とし、熱サイクルを 1 サイクル負荷した後に撮影した再構成画像を変形後の画像として、変位ベクトルの粗探索を行った結果をまとめる。(a)は変形前の画像として用いた 1 回目の撮影による再構成画像、(b)は変形後の画像として用いた 1 サイクル負荷後の再構成画像、(c)は、サブセットサイズ M を 15 ピクセルとした場合の変位ベクトルの絶対値の分布を画素単位で示している。その結果、 $\text{Ag}_3\text{Sn}$  相のような特徴点のある部分では、デジタル画像相関法による変位計測を、空間分解能が 5  $\mu\text{m}$  程度で行える見通しが得られた。

(3) はんだ接合部における疲労き裂の進展過程の 4 次元的评价

疲労き裂の 4 次元 (3 次元 + 時系列) 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。一例として、電子基板において最も多く使用されている FBGA はんだバンプを対象とし、き裂発生後から破断に至るまでの疲労き裂進展過程を評価した。図 4 は、同一のはんだバンプにおける、500、750 および 1000 サイクル熱負荷後の 3D レンダリング画像である。き裂を黄色、およびポイドを緑色、で示す。500 サイクルでは、バンプ上部の LSI チップとの界面に近い領域で右奥のほうからき裂



(a) SP- $\mu$ CT による 3 次元画像



(b) ラミノグラフィによる 3 次元画像

図 2 SP- $\mu$ CT と放射光ラミノグラフィによって得られた FBGA バンプ内における疲労き裂の 3 次元画像の比較

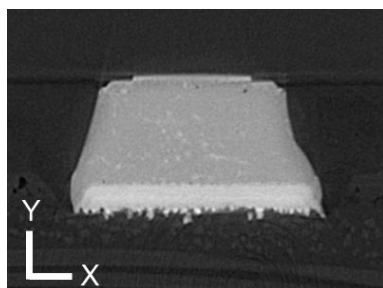


が発生しているのが確認できる。既にいくつかのポイドが、き裂と繋がっている。750 サイクルでは、き裂が手前に向かって大きく進展していることが確認できる。また、手前の比較的大きなポイドが、完全にき裂と繋がり黄色で表示されている。1000 サイクルでは、さらにき裂が進展し、はんだバンプ上部のほぼ全面に広がっているのが確認できる。以上のように、放射光 X 線ラミノグラフィを用いて、断面観察では把握が困難であったはんだ接合部における疲労き裂進展過程を 4 次元 (3 次元 + 時系列) に捉えることが可能になった。

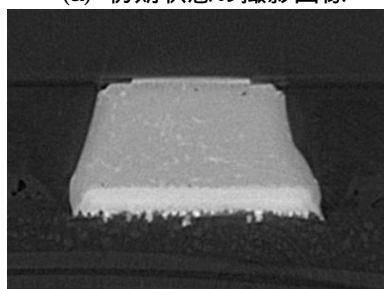
#### (4) はんだ接合部の総合的ヘルスマニタリングへの取り組み

本技術を実際の電子基板における FBGA はんだバンプやセラミック基板のダイアタッチ接合部などに適用し、疲労き裂の表面積を計測しながら、マイクロ接合部の余寿命を逐次推定するという新しい概念のヘルスマニタリング技術を開発した。

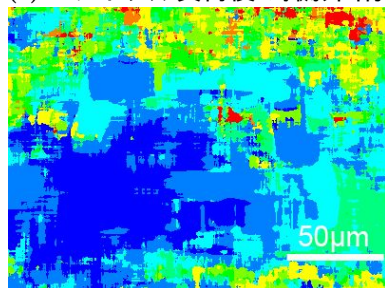
一例として、図 5 は、隣り合う 2 つの FBGA はんだバンプについて、熱サイクル試験のサイクル数と、き裂表面積の関係を示す。図が



(a) 初期状態の撮影画像



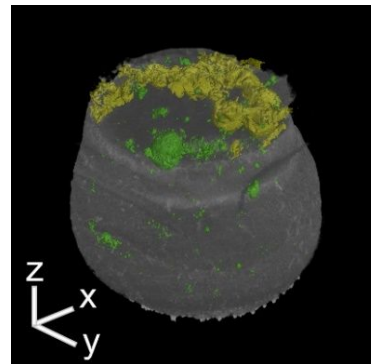
(b) 1 サイクル負荷後の撮影画像



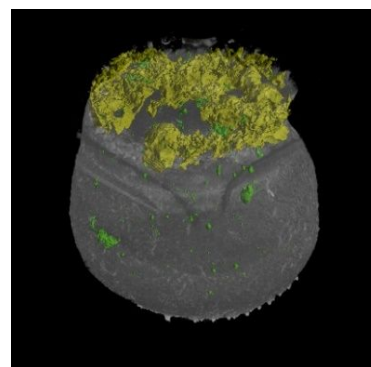
0 8 ピクセル

(c) 変位分布 (M=15)

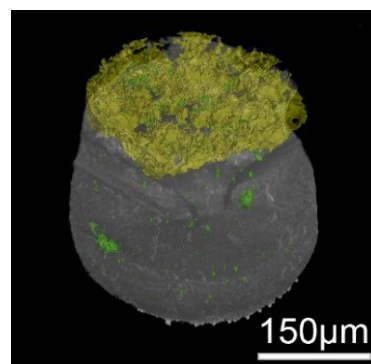
図 3 初期状態および 1 サイクル負荷後の再構成画像と変位ベクトルの絶対値の分布



(a) 500 サイクル後



(b) 750 サイクル後



(c) 1000 サイクル後

図 4 FBGA バンプにおける疲労き裂の進展過程を示す 3 次元画像の例

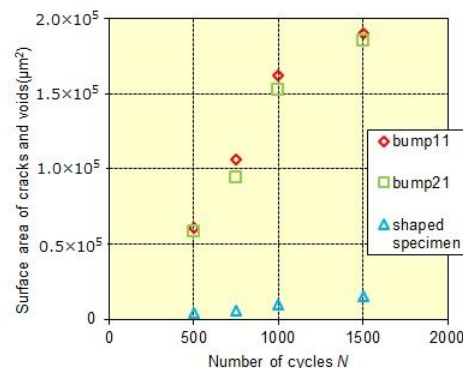


図 5 FBGA バンプにおける疲労き裂の進展過程を示すき裂表面積の変化

ら、き裂表面積が、サイクル数が増加するに従ってほぼ直線的に増加しているのがわかる。図を基に求めた平均き裂進展速度は、 $129 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ であった。これより、き裂進展寿命は  $N_p = 788$  サイクルと評価され、また平均疲労き裂発生寿命を加えると、破断までの全寿命は  $N_f = 1088$  サイクルと推定された。これは、別途実施した SEM 観察により得られた、破断までの疲労寿命が約 1200 サイクルであるという結果と一致しており、比較的正確な推定値であるといえる。

このように、本技術により、破断検出のみであった従来のヘルスマニタリング技術の枠組みを飛躍的に拡大することが可能となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

岡本佳之, 高柳毅, 釣谷浩之, 佐山利彦, 上杉健太郎, 星野真人, 長瀬達則, 森孝男: マイクロ接合部の疲労損傷評価のための非破壊ひずみ測定の可能性試験, SPring-8利用研究成果集, 早期公開版 (2015), <https://user.spring8.or.jp/resrep/?cat=17>. (査読有)

[学会発表](計11件)

Sayama, T., Turitani, H., Okamoto, Y., Kinoshita, M., and Mori, T., "Evaluation of Fatigue Crack Initiation and Propagation in Thin Solder Joints Using a Lap-joint Shear Specimen with High Stiffness Fixtures," *Proc. of InterPACK2015*, ASME (2015), InterPACK2015-48605. (査読有)

Turitani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Hoshino, M., Uesugi, K., Hanamura, T., and Mori, T., "Nondestructive Observation of Thermal Fatigue Crack Propagation in FBGA and Die Attached Solder Joints by Synchrotron Radiation X-Ray Laminography," *Proc. of InterPACK2015*, ASME (2015), InterPACK2015-48553. (査読有)

釣谷浩之, 花村拓哉, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 星野真人, 上杉健太郎, 森孝男: ダイアタッチはんだ接合部における熱疲労き裂進展の放射光X線ラミノグラフィによる非破壊観察, 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会演説文集, Vol. 29 (2015), pp. 261-263. (査読有)

木下雅巧, 佐山利彦, 釣谷浩之, 岡本佳之, 森孝男: 高剛性ラップジョイントせん断試験によるはんだ接合部の疲労き裂発生寿命評価, 日本機械学会2014年度年次大会講演論文集 (2014), J0310205. (査読有)

釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅,

上杉健太郎, 星野真人, 森孝男: 放射光X線ラミノグラフィを用いたフリップチップはんだ接合部における熱疲労き裂進展過程のモニタリングの可能性評価, 第28回エレクトロニクス実装学会春季講演大会論文集 (2014), pp. 286-289. (査読有)

Tsuritani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K., and Mori, T., "Nondestructive observation of fatigue crack propagation process in some solder joints by synchrotron radiation X-ray microtomography," *Proc. of IEEE CPMT Symposium Japan 2013* (2013), pp.261-264. (査読有)

釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 星野真人, 森孝男: 放射光X線を光源とするマイクロCTおよびラミノグラフィによるはんだ接合部における熱疲労き裂の検出能力, 日本機械学会M&M2013材料力学カンファレンスCD-ROM論文集 (2013), GS29. (査読有)

大竹宏, 森孝男, 佐山利彦, 釣谷浩之, 岡本佳之: 改良型ラップジョイント試験片によるはんだ接合部のせん断疲労試験方法, 日本機械学会M&M2013材料力学カンファレンスCD-ROM論文集 (2013), GS27. (査読有)

Tsuritani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K., Hoshino, M., and Mori, T., "Application of synchrotron radiation X-ray laminography to nondestructive evaluation of the fatigue crack propagation process in flip chip solder joints," *Proc. of ASME InterPACK2013* (2013), InterPACK2013-73091. (査読有)

釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 星野真人, 森孝男: 放射光X線ラミノグラフィを用いたフリップチップはんだ接合部における疲労き裂進展過程のモニタリングの可能性評価, 第27回エレクトロニクス実装学会春季講演大会演説文集, Vol. 27 (2013), pp. 286-289. (査読有)

釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 星野真人, 森孝男: 放射光X線ラミノグラフィによるフリップチップはんだ接合部の疲労き裂進展評価, 第22回マイクロエレクトロニクスシンポジウム演説文集, Vol. 22 (2012), pp. 207-210. (査読有)

[その他]

ホームページ等

[http://support.spring8.or.jp/Report\\_JSJR/PDF\\_JSJR\\_24B/2012B1490.pdf](http://support.spring8.or.jp/Report_JSJR/PDF_JSJR_24B/2012B1490.pdf)  
<https://user.spring8.or.jp/resrep/?p=4854>  
[http://support.spring8.or.jp/Report\\_JSJR/PDF\\_JSJR\\_26A/2014A1521.pdf](http://support.spring8.or.jp/Report_JSJR/PDF_JSJR_26A/2014A1521.pdf)

6. 研究組織

(1)研究代表者

氏名：佐山 利彦 (SAYAMA TOSHIHIKO)

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・

課長

研究者番号：40416128

(2)研究分担者

氏名：釣谷 浩之 (TSURITANI HIROYUKI)

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・

主任研究員

(期間：平成 24 年 4 月～平成 26 年 3 月)

研究者番号：70416147

(3)連携研究者

氏名：上杉 健太郎 (KENTARO UESUGI)

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 (MORI TAKAO)

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