

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月20日現在

機関番号：83205

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560108

研究課題名（和文） 高密度実装基板の熱疲労損傷に対する放射光CTを用いたヘルスマニタリング技術の開発

研究課題名（英文） Development of Health Monitoring Technique for Thermal Fatigue Evaluation in High Density PCBs by Synchrotron Radiation CT

研究代表者

佐山 利彦（SAYAMA TOSHIHIKO）

富山県工業技術センター・企画管理部 企画情報課・主幹研究員

研究者番号：40416128

研究成果の概要（和文）：放射光を光源とする放射光CTの技術を、電子部品が高い密度で実装された電子基板の信頼性評価に初めて適用しました。微細な接合部において繰返し加熱によって発生す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、継続的にモニタリングして、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。

研究成果の概要（英文）：In this work, synchrotron radiation CT technique was first applied to the nondestructive evaluation of the reliability in high density printed circuit boards. The developed technology helps nondestructive monitoring all the process, in which cracks in micro-joints initiate, propagate, and reach to fracture, in addition, helps estimating the lifetime to failure. This result will widely contribute to the improvement of the reliability and the development of electronic equipment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

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、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。また、上記の研究分科会における最も大きな成果の一つは、有限要素解析を応用したはんだ接合部の疲労寿命評価方法の開発である。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 μm オーダーにまで小型化しており、上記の評価方法の適用限界が見えてきている。

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 Sn-Pb はんだ接合部の相成長（組織変化）を観察し、疲労き裂の発生寿命を推定する研究を行った。本研究は、これまでの研究を発展させて、実際の電子基板のマイクロ接合部における疲労寿命評価を非破壊で行おうとする初めての試みである。さらに、同一の接合部を継続的に監視することによって、電子基板の供用中におけるマイクロ接合部の余寿命を評価する新しい概念のヘルスマニタリング技術に発展させる。

2. 研究の目的

実際の電子基板に用いられている典型的なマイクロ接合部であるマイクロ BGA (Ball Grid Array)、あるいは微小チップ部品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 を適用した解析、評価を行い、さらに同一のマイクロ接合部を継続的に監視して余寿命を評価する新しい概念のヘルスマニタリング技術を開発する。

(1) マイクロ接合部における疲労損傷過程の解明

熱疲労による相成長（組織変化）と疲労損傷との対応関係を明らかにし、疲労き裂の発生寿命を推定する。さらに、疲労き裂の進展過程を 3 次元、時系列的に明らかにする。

(2) 疲労寿命評価のための 3 次元指標の導入

CT 画像に含まれる 3 次元、時系列的な膨大な情報に直接アクセスするために、疲労損傷を特徴付ける簡便な 3 次元指標を導入し、これを用いて疲労の余寿命評価技術の開発を行う。

(3) 3 次元指標を用いたマイクロ接合部のヘルスマニタリング技術の開発

実際の電子基板の同一マイクロ接合部を継続的にモニターし、3 次元指標の計測により、マイクロ接合部の余寿命を逐次推定する新しい概念のヘルスマニタリング技術を開発する。

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- μCT ）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- μCT 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- μCT 本体は、試料を回転させる精密回転

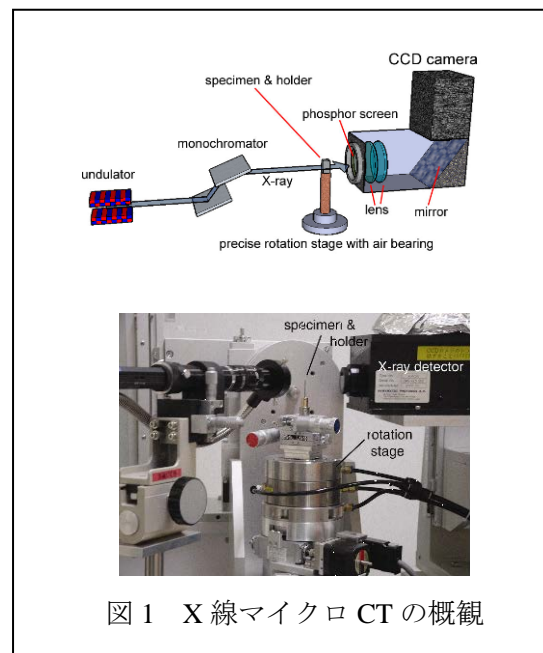


図 1 X 線マイクロ CT の概観

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。最終的に一辺が $0.47\mu\text{m}$ 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) 実際の電子基板におけるマイクロ接合部の内部構造を非破壊で可視化

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。図2は、従来撮影が困難であった平板状のフリップチップ基板に対してラミノグラフィを適用して得られたはんだバンプの3次元のボリュームレンダリング画像を示す。また、内部構造の観察を容易にするために、Siチップおよびアンダーフィルは表示していない。はんだ接合部内部の内部構造（金属組織や熱疲労き裂）が捉えられており、電子基板を全く加工することなく完全な非破壊での観察が可能となった。

(2) はんだ接合部における疲労き裂の可視化および進展過程の4次元的评价

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チップ抵抗を対象とし、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3は、同一のはんだ接合部における、1100、1550および2100サイクル熱負荷後の3Dレンダリング画像（黄色）を示す。

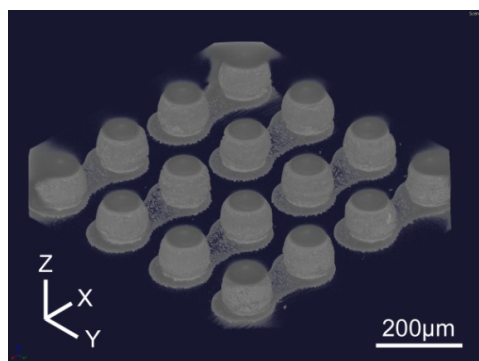
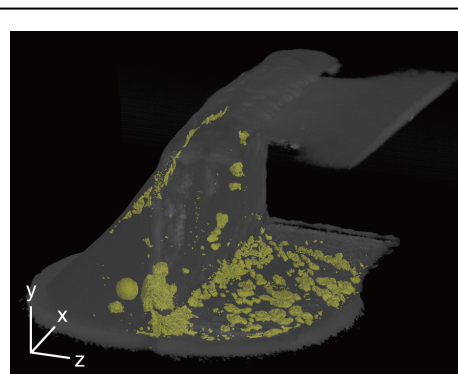
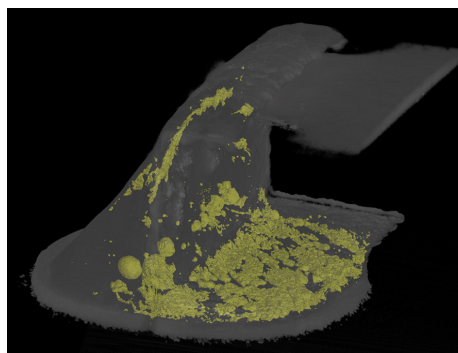


図2 ラミノグラフィによるはんだバンプの3Dレンダリング画像

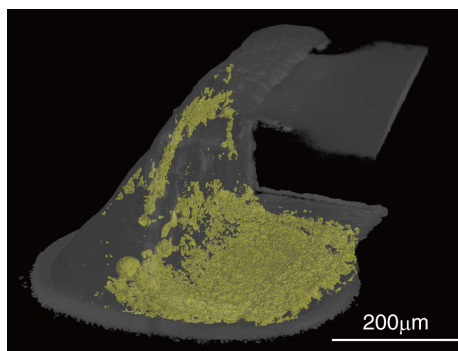
1100 サイクル時点では、主となる疲労き裂は、電極下のはんだ接合部先端とチップコーナー部近傍の2箇所から発生している。加えて、電極下の薄いはんだ層には約5から $20\mu\text{m}$ の微小き裂も発生している。1550 サイクル時点では、主となる疲労き裂と微小き裂とが互いに連結し、電極下はんだ層に広がり成長している。2100 サイクル時点では、電極下はんだ層は全域で破断し、疲労き裂はチップ電極に沿って上方に進展している。加えて、はんだフィレット上部には、新たにき裂が発生、進展しており、主となるき裂に接続し、はんだ接合部が最終破断に至



(a) 1100 サイクル後



(b) 1550 サイクル後



(c) 2100 サイクル後

図3 疲労き裂に進展過程の例（疲労き裂を黄色でレンダリング）

る様相を呈している。

このように、放射光 X 線マイクロ CT 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。

(3) はんだ接合部のヘルスマonitoringへの適用

本技術を実際の電子基板におけるチップ部品のマイクロ接合部に適用し、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onitoring技術を開発した。

一例として、図 4 は、同一のチップ抵抗における疲労き裂の表面積の変化を Monitoring した結果を示す。き裂表面積とサイクル数の関係は直線となり、その平均き裂進展速度は、 $1.61 \times 10^2 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ であった。これより、き裂進展寿命は $N_f = 2510$ 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 $N_f = 3100$ サイクル推定された。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 3000 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onitoring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 2 件)

- ① 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), pp. 799-806. (査読有)

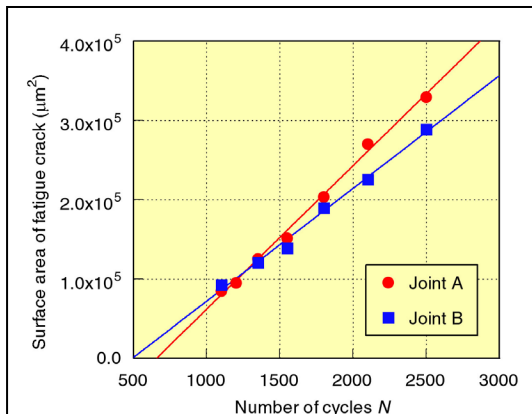


図 4 疲労き裂の進展過程におけるき裂表面積の変化

- ② Turitani, H., Sayama, T., Takayanagi, T., Okamoto, Y., Uesugi, K., and Mori, T., Application of Synchrotron Radiation X-Ray Microtomography to Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Process in Flip Chip Interconnects, *Trans. ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 133, No. 2 (2011), pp. 021007 1-9. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① Okamoto, Y., Takayanagi, T., Sayama, T., Ejiri, Y., Nakano, H., and Mori, T., “Phase Growth Process of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Joints under Mechanical Cyclic Loading at the Same Temperature,” *Proc. of InterPACK2009*, ASME (2009), InterPACK2009-89262. (査読有)
- ② Turitani, H., Sayama, T., Takayanagi, T., Okamoto, Y., Uesugi, K., and Mori, T., “Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Crack Propagation in Sn-Ag-Cu Solder Joints by Synchrotron Radiation X-ray Micro-tomography,” *Proc. of InterPACK2009*, ASME (2009), InterPACK2009-89155. (査読有)
- ③ 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 を応用した FBGA 鉛フリー接合部の熱疲労き裂の非破壊観察, 第 19 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム演論文集, Vol. 19 (2009), pp. 121-124. (査読有)
- ④ 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 によるはんだマイクロ接合部における熱疲労損傷の評価, 第 158 回日本鉄鋼協会秋季講演大会シンポジウム論文集「階層的 3D/4D 解析によるマイクロ組織の多様性の解明」講演論文集 (2009), pp. 31-36. (査読有)
- ⑤ 釣谷浩之, 佐山利彦, 岡本佳之, 高柳毅, 上杉健太郎, 森孝男: チップ抵抗鉛フリーはんだ接合部の熱疲労き裂の放射光 X 線 CT を応用した非破壊観察, 日本機械学会 2010 年度年次大会演論文集, Vol. 10-1, No. 7 (2011), pp. 291-292. (査読有)
- ⑥ 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 によるチップ抵抗はんだ接合部における熱疲労き裂進展過程の実験的評価, 第 25 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会演論文集, Vol. 25 (2012), pp. 161-164. (査読有)
- ⑦ Turitani, H., Sayama, T., Takayanagi, T., Okamoto, Y., Uesugi, K., and Mori, T., “Three-dimensional and Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Crack Propagation Process in Complex-shaped

Solder Joints by Synchrotron Radiation
X-ray Micro-tomography," *Proc. of
InterPACK2011*, ASME (2011),
InterPACK2011-52047. (査読有)

- ⑧ 岡本佳之, 高柳毅, 釣谷浩之, 佐山利彦,
上杉健太郎, 森孝男: 放射光X線CT装置
を用いた複雑形状を有するはんだ接合部
における熱疲労き裂進展の3次元非破壊
評価, 日本機械学会2011年度年次大会演
論文集, Vol. **11-1** (2011), J031034. (査読
有)
- ⑨ 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電子基板は
んだ接合部における熱疲労き裂の非破壊
観察, 第26回エレクトロニクス実装学会
春季講演大会演論文集, Vol. **26** (2012), pp.
134-136. (査読有)
- ⑩ 岡本佳之, 高柳毅, 釣谷浩之, 佐山利彦,
上杉健太郎, 森孝男: 異なる大きさのチ
ップ抵抗はんだ接合部における熱疲労き
裂進展の3次元非破壊評価, 第26回エレ
クトロニクス実装学会春季講演大会演論
文集, Vol. **26** (2012), pp. 131-133. (査読有)

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・
企画管理部 企画情報課・
主幹研究員
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
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