

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：83205

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05708

研究課題名(和文) 高信頼性電子機器のための放射光CT技術を基盤とした統合化ヘルスマネジメントの構築

研究課題名(英文) Development of Integrated Health Management for High Reliability Electronics Based on Synchrotron Radiation Computed Tomography Technologies

研究代表者

佐山 利彦 (Sayama, Toshihiko)

富山県工業技術センター・その他部局等・課長

研究者番号：40416128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：実際の電子基板接合部における強度信頼性をマネジメントすることを目的として、放射光ラミノグラフィを適用したモニタリングの実用研究を行いました。繰返し通電加熱を受ける接合部における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その場モニタリングして、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 order to manage the strength reliability of the actual joints on printed circuit boards, a practical monitoring technique was investigated by applying synchrotron radiation laminography. The technique realized in-situ nondestructive monitoring of the joints through the fatigue process due to cyclic energization loading, in which 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：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、高密度実装化であり、パワーエレクトロニクスの分野では、これに高出力化が加わる。しかし、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、溶接学会やスマートプロセス学会などが、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、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ており、既存の評価方法の適用限界が見えてきている。加えて、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も、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（上記の研究分科会の委員）らは、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 CT 技術を適用して、非破壊で接合部の組織変化およびき裂進展過程をモニタリングし、疲労寿命を推定する基礎研究を行ってきた。本研究では、接合部に対する従来の信頼性評価の限界をブレークスルーするために、(1)放射光 CT 技術を適用し、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技術を実用レベルに高め、(2)その技術を基盤として、供用中の基板の接合部に発生する疲労破壊に対して余寿命評価、健全性診断を行う。このように、放射光 CT 技術を適用した非破壊検査に基づいた、新しい概念のヘルスマネジメントの構築を目指す。

### 2. 研究の目的

パワーモジュール等に用いられている典型的な接合構造であるダイアタッチ接合部やチップ部品のはんだ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（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、疲労き裂を総合的に非破壊で観察、3D 可視化する技術を開発する。さらに同一の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構築する。

#### (1) 実基板における疲労き裂進展過程のラミノグラフィ観察技術の開発

実際の電子基板（平板構造）の観察に特化した、放射光 X 線マイクロ CT を適用したラミノグラフィ技術を開発する。これにより、基板上的ダイアタッチ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 次元的、時系列的に定量化できる。

#### (2) 繰返し通電状況下におけるラミノグラフィ

### イ観察技術の展開

冷熱衝撃試験による熱疲労に加え、実際の基板における負荷形態である繰返し通電によって発生した疲労き裂にも対象を拡張すべく、通電状態のままでもその場観察が可能となるレベルまでラミノグラフィ技術を高める。これにより、供用状態での電子基板の接合部を逐次モニタリングすることを実現できる。

#### (3) 非破壊モニタリングによるヘルスマネジメントの適用

ラミノグラフィを適用して開発したその場モニタリング技術に基づき、種々の繰返し通電負荷によってダイアタッチ接合部に発生した疲労き裂に対して、ヘルスマネジメントを実施し、接合部の余寿命評価、健全性診断を試みる。

### 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- $\mu$ 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、高い空間分解能を必要とする 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。

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- $\mu$ 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

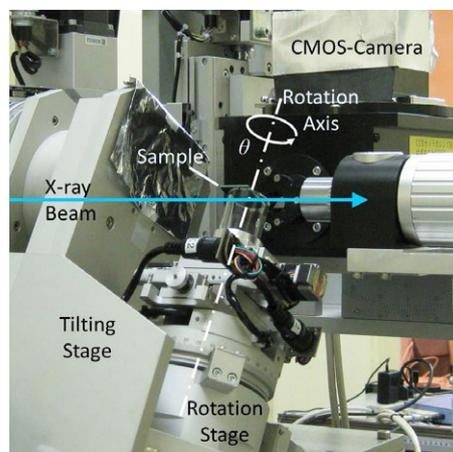


図 1 放射光 X 線ラミノグラフィ装置

た。図1は、放射光X線ラミノグラフィ装置の全体像を示す。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線が十分に透過する範囲で、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。

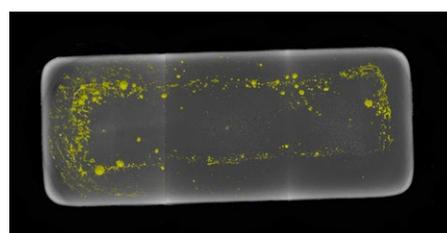
#### 4. 研究成果

本研究において得られた成果は、次のとおりである。

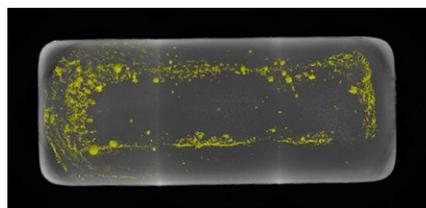
(1) 実基板における疲労き裂進展過程の可視化、定量化

FR-4基板にSn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cuはんだによって、縦3.2 mm × 横1.6 mmのチップ抵抗を接合、および縦3 mm × 横3 mmのセラミックチップをダイアタッチ接合した、実基板と同様の構造を有する試験体を対象とした。はんだ接合部の厚さは、約40  $\mu\text{m}$ であった。また、熱疲労き裂の進展過程を観察するために、JIS規格C60068-2-14環境試験方法(電気・電子)温度変化方法に準拠した加速熱サイクル試験を実施した。この試験の温度プロファイルは、高温保持温度125°C、低温保持温度-40°C、保持時間30 min、およびランプ時間2 minである。任意のサイクル数で試験を中断し、放射光X線ラミノグラフィによる疲労き裂の観察を継続して実施した。

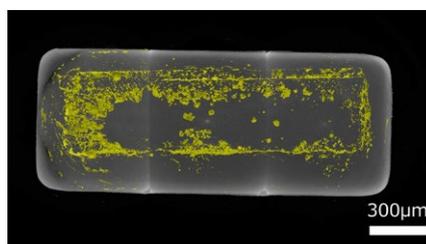
図2は、チップ抵抗のはんだ接合部における疲労き裂の進展過程を3次元画像で示す。図2(a)、(b)、(c)は、それぞれ熱サイクル試験を400、600および1200サイクル実施した時点での画像である。図は、試験体の上方から見た画像であり、パッドを灰色で、疲労き裂およびボイドを黄色で示す。400サイクルの時点では画像の左側から疲労き裂が発生しており、サイクル数が進むにつれ内部に進展していることが分かる。1200サイクルでは接合部全体に疲労き裂が進展している様子を確認することができる。さらに、疲労き裂の表面積を計測したところ、熱サイクル試験のサイクル数の増加に伴い、疲労き裂の表面積がほぼ直線的に増加していることが分り、疲労き裂の平均進展速度は、 $5.52 \times 10^2 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ と測定された。はんだ接合部の全断



(a) 400 サイクル後



(b) 600 サイクル後



(c) 1200 サイクル後

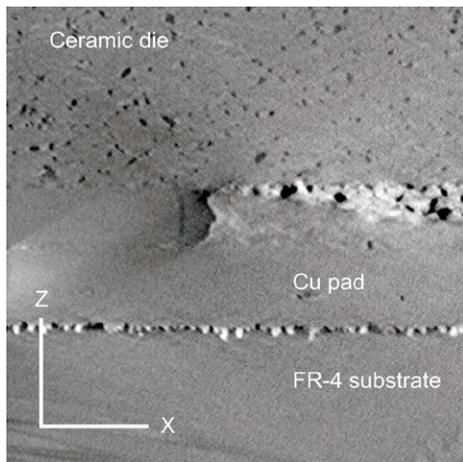
図2 チップ抵抗のはんだ接合部における疲労き裂進展過程の3次元画像

面(1.82 mm × 0.75 mm)にこの速度で疲労き裂が進展すると仮定すると、破断寿命は約2470サイクルと推定され、実験結果と比較して概ね妥当な推定値が得られた。以上より、放射光X線ラミノグラフィを用いて、実基板を全く加工することなく完全な非破壊で、疲労き裂進展の可視化、定量化を行うことが可能となった。

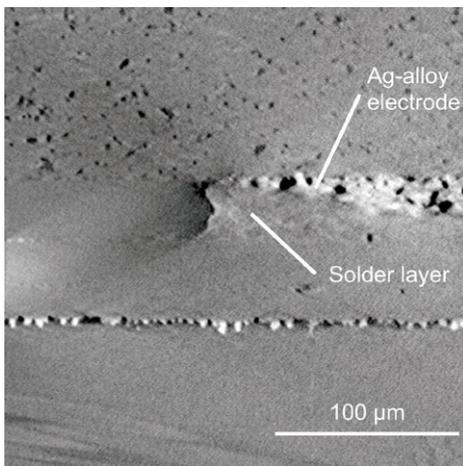
(2) 繰返し通電状況下におけるラミノグラフィモニタリング技術の確立

繰返し通電状況下におけるラミノグラフィによる疲労き裂のモニタリング実験を行った。試験体は、長さ2.0 mm × 幅1.2 mmのチップ抵抗が実装された縦3 mm × 横3 mmのセラミック基板を、縦40 mm × 横40 mmのFR-4基板に、Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cuはんだによってダイアタッチ接合したものである。FR-4基板の中央部に、チップ抵抗が実装されたセラミック基板5個を2 mmの間隔をあけて十字に配置した。この実装されたチップ抵抗に10 min通電し、その後10 min非通電状態で室温にさらず繰返しを行った。これにより、ダイアタッチ接合部は、通電中に約110°Cまで加熱され、非通電の10 minで室温付近まで温度が降下する。

繰返し通電状態にあるはんだ接合部において、試験体を治具に固定したままで、非通電および通電、それぞれの状態でラミノグラフィ撮影を行った。通電状態の撮影は、通電



(a) 非通電状態



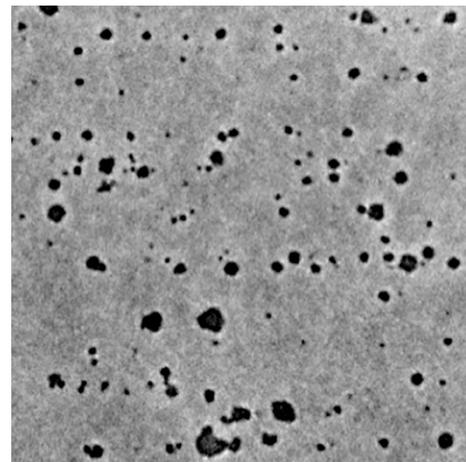
(b) 通電状態

図3 非通電および通電における同一はんだ  
接合部のラミノグラフィ画像の比較

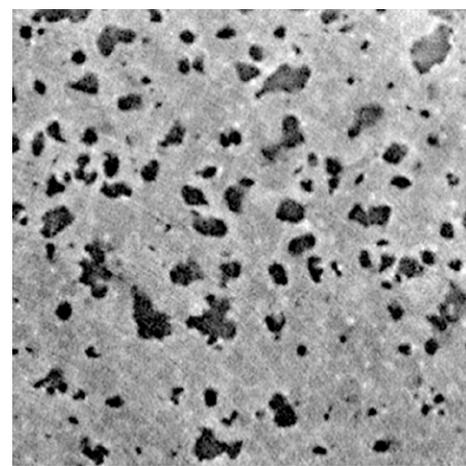
後に温度が安定した状態で撮影を実施した。図3は、非通電、および通電、それぞれの状態におけるラミノグラフィ画像を示す。図3(a)および (b)いずれの画像も、同一のダイアタッチ接合部のコーナー部において、基板に垂直な断面を示している。いずれの画像においても、セラミック基板、Ag電極、FR-4基板などの部材が明瞭に確認できる。はんだとCuパッドの境界は、やや不明瞭ではあるものの、はんだ内部のボイドが確認できるほか、 $\text{Ag}_3\text{Sn}$ 相がはんだの他の部分よりも明るい部分として確認できる。結果として、双方の画像には大きな違いは見られず、繰り返し通電状態においても、その場観察が十分可能となった。

### (3) 非破壊その場モニタリングによるヘルスマネジメントの実現

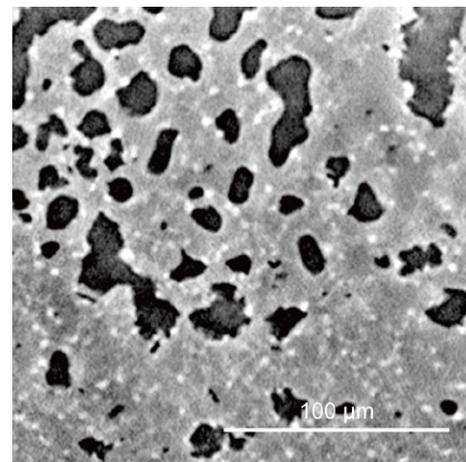
繰り返し通電状態にある実基板に対して、ラミノグラフィによるその場モニタリング技術を適用して、疲労破壊のヘルスマネジメントを実施した。図4は、通電による熱サイクル試験(1サイクル20min)を行った同一の試験体について、そのはんだ接合部の基板と平行な同一断面における変化をラミノグラ



(a) 500 サイクル後



(b) 4750 サイクル後



(c) 11000 サイクル後

図4 繰り返し通電による疲労き裂の進展過程  
を示すラミノグラフィ画像の例

フィ画像で示す。ラミノグラフィによる全観察領域に対して、 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ の固定した観察領域 Area1 を設定し、接合部の変化を示す。各々500、4750、および11000サイクルの通電負荷時におけるものである。500サイクルで観察された空隙は、ほとんどが初期ボイドとみられる。4750サイクル、11000サイ

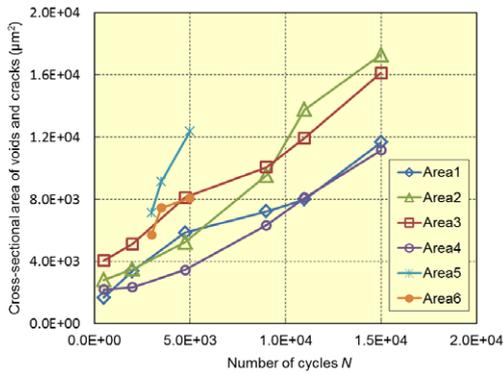


図5 異なる繰返し通電条件下での疲労き裂の進展過程におけるき裂表面積の変化

クルと繰返し負荷が進むに従い、これらの空隙を起点とした微小な疲労き裂が、顕著に進展していることが分かる。また、大きく変形している疲労き裂も確認できた。

疲労き裂の進展過程を定量化するために、ラミノグラフィ画像を基に、疲労き裂とボイドを含む空隙の断面積を計測した。図5は、1サイクルあたり20 min、および60 minの通電による熱サイクル試験を行った試験体における、疲労き裂とボイドを含む空隙の断面積の変化を示す。1サイクルあたり20 minの通電による熱サイクル試験を行った試験体では、図4に示したArea1に加え、同一の接合部における別の領域についても同様に計測し、それぞれをArea2、Area3、およびArea4とした。いずれの領域においても、サイクル数が進むに従って、き裂断面積がほぼ線形に増加していることが確認できた。矩形領域内における平均き裂進展速度は、 $0.78 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ であった。一方、1サイクルあたり60 minの通電による熱サイクル試験を行った試験体においても、観察領域Area5およびArea6を設定し、空隙の断面積を計測した。この周期が長いサイクル負荷においても、サイクルが進むに従ってき裂断面積が、ほぼ線形に増加していることが確認できた。矩形領域内での平均き裂進展速度は、およそ $1.90 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ であり、1サイクル20 minの試験と比較して進展速度が速くなっていた。いずれの繰返し負荷でも、寿命評価は可能であった。以上のように、これまで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の余寿命を、放射光X線ラミノグラフィを用いたモニタリングで常時マネージメント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 7 件)

①岡本佳之, 高柳 毅, 釣谷浩之, 佐山利彦, 星野真人, 上杉健太郎, 東方浩紀, 大井純也,

森 孝男: 繰返し通電負荷を受けるパワーデバイスに対する適切な熱的信頼性試験のための放射光ラミノグラフィモニタリングの応用, 平成 29 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2017A), オープンアクセス: [https://support.spring8.or.jp/Report\\_JSR/PDF\\_JSR\\_29A/2017A1556.pdf](https://support.spring8.or.jp/Report_JSR/PDF_JSR_29A/2017A1556.pdf) (査読無)

② Tsuritani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K., Hoshino, M., Ooi, J. and Mori, T., “In-situ Monitoring via Synchrotron Radiation Laminography of Thermal Fatigue Cracks at Die-attached Joints under Cyclic Energization Loading”, *ASME 2017 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems* (2017), pp. V001T01A015, DOI:10.1115/IPACK2017-74177 (査読有)

③岡本佳之, 高柳 毅, 釣谷浩之, 佐山利彦, 星野真人, 上杉健太郎, 東方浩紀, 大井純也, 森 孝男: 繰返し通電状態のパワーデバイス接合部における放射光 X 線ラミノグラフィを用いた疲労き裂進展の逐次モニタリング, 平成 28 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2016B), オープンアクセス: [https://support.spring8.or.jp/Report\\_JSR/PDF\\_JSR\\_28B/2016B1568.pdf](https://support.spring8.or.jp/Report_JSR/PDF_JSR_28B/2016B1568.pdf) (査読無)

④岡本佳之, 高柳 毅, 佐山利彦, 星野真人, 上杉健太郎, 花村拓哉, 森 孝男: 放射光 X 線ラミノグラフィを用いたパワーデバイス接合部における疲労寿命の評価, 平成 27 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2015B), オープンアクセス: [https://support.spring8.or.jp/Report\\_JSR/PDF\\_JSR\\_27B/2015B1566.pdf](https://support.spring8.or.jp/Report_JSR/PDF_JSR_27B/2015B1566.pdf) (査読無)

⑤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/SACLA 利用研究成果集 Section B: Industrial Application Report, Vol. 3, No. 2 (2015), DOI:10.18957/tr.3.2.497 (査読有)

⑥ Sayama, T., Tsuritani, H., Okamoto, Y., Kinoshita, M. and Mori, T., “Evaluation of Fatigue Crack Initiation and Propagation in Thin Solder Joints by Using Lap-joint Shear Specimen with High Stiffness Fixtures”, *ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems* (2015), pp. V002T02A025, DOI:10.1115/IPACK2015-48605 (査読有)

⑦ Tsuritani, 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”, *ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems* (2015), pp. V002T02 A024, DOI:10.1115/IPACK2015-48553

(査読有)

[学会発表] (計 10 件)

① 森 孝男: 高剛性ラップジョイント試験片によるはんだ接合部の疲労強度特性に及ぼす接合厚さの影響, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, (2017).

② 佐山利彦: 放射光 X 線ラミノグラフィによる繰返し通電を受ける電子基板におけるダイアタッチ接合部の非破壊観察, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, (2017).

③ 釣谷浩之: 放射光 X 線 CT を用いたはんだ接合部の非破壊ひずみ計測, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, (2017).

④ Tsuritani, H., “*In-situ Monitoring via Synchrotron Radiation Laminography of Thermal Fatigue Cracks at Die-attached Joints under Cyclic Energization Loading*”, *ASME 2017 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems InterPACK 2017*, 2017.

⑤ 釣谷浩之: 繰返し通電を受けるダイアタッチ接合部の放射光ラミノグラフィによるその場観察, 第 31 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, (2017).

⑥ 佐山利彦: 放射光 X 線ラミノグラフィによる平板構造を有するはんだ接合部における熱疲労き裂の非破壊観察, 第 30 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, (2016).

⑦ 森 孝男: 高剛性ラップジョイント試験片を用いたはんだ接合部の疲労寿命に及ぼすひずみ速度の影響評価, 日本機械学会 2015 年度年次大会, (2015).

⑧ 佐山利彦: ラミノグラフィによるはんだ接合部における疲労き裂の観察, 第 15 回 X 線マイクロ・ナノトモグラフィ研究会, (2015).

⑨ Mori, T., “*Evaluation of Fatigue Crack Initiation and Propagation in Thin Solder Joints by Using Lap-joint Shear Specimen with High Stiffness Fixtures*”, *ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems InterPACK 2015*, (2015).

⑩ Sayama, T., “*Nondestructive Observation of Thermal Fatigue Crack Propagation in FBGA and Die Attached Solder Joints by Synchrotron Radiation X-Ray Laminography*”, *ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems InterPACK 2015*, (2015).

## 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

研究者番号: 70416147

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 (工学部長)

研究者番号: 30275078

### (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・

主席研究員

研究者番号: 80344399