

## 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

### An Evaluation of Fatigue Lifetime in Attached Joints of Power Devices by Synchrotron Radiation X-ray Laminography

岡本 佳之<sup>a</sup>, 高柳 毅<sup>a</sup>, 佐山 利彦<sup>b</sup>, 星野 真人<sup>c</sup>, 上杉 健太朗<sup>c</sup>,  
花村 拓哉<sup>d</sup>, 森 孝男<sup>d</sup>

Yoshiyuki Okamoto<sup>a</sup>, Takeshi Takayanagi<sup>a</sup>, Toshihiko Sayama<sup>b</sup>, Masato Hoshino<sup>c</sup>, Kentaro Uesugi<sup>c</sup>,  
Takuya Hanamura<sup>d</sup>, Takao Mori<sup>d</sup>

<sup>a</sup> コーセル(株), <sup>b</sup> 富山県工業技術センター, <sup>c</sup>(公財)高輝度光科学研究センター, <sup>d</sup> 富山県立大学  
<sup>a</sup>Cosel Co., Ltd., <sup>b</sup>Toyama Industrial Technology Center, <sup>c</sup>JASRI, and <sup>d</sup>Toyama Prefectural University

チップ抵抗やダイアタッチ接合などのパワーデバイスに特有な平板構造を有する接合部を対象とし、Spring-8 における放射光光源を利用した X 線ラミノグラフィを適用して、熱サイクル負荷による疲労き裂進展過程を完全な非破壊で観察することを試みた。その結果、ラミノグラフィ画像を基にき裂表面積を計測し、疲労に対する信頼性(余寿命)を評価することが可能となった。

**キーワード：** パワーデバイス、ダイアタッチ接合、疲労破壊、非破壊検査、  
放射光 X 線ラミノグラフィ

#### 背景と研究目的：

近年、グリーンイノベーション、すなわち低炭素化社会の実現を目的として、省エネルギー機器の開発、特に社会基盤としての電源等のパワーモジュールの小型効率化が求められている。しかし、自己発熱するパワーデバイスの小型化高出力化により放熱が困難となり相対的に発熱の影響が増大している。具体的には、パワーデバイスの接合部において熱疲労破壊が発生して、機器の信頼性が低下するという問題にパワーエレクトロニクス業界が直面している。一方、著者らは、電子基板の形状的な特徴(面積は広いが薄い)を考慮し、ビームを板面に対して斜め方向から入射させ、その透過画像から断面画像を再構成する放射光 X 線ラミノグラフィ技術を開発してきた[1][2](2011A1198)。さらに、パワーデバイスのダイアタッチ接合と呼ばれるチップ等の板状部材の積層接合構造に対して、放射光 X 線ラミノグラフィを適用し、その接合部に発生した熱疲労き裂の検出技術を確立した(2014A1521)。本研究は、これまでの成果を踏まえ、放射光 X 線ラミノグラフィをパワーデバイス接合部に適用して得られた画像を定量化し、疲労き裂の進展速度を評価することによって疲労による接合部の破断寿命を十分な精度で推定する技術を確立することを目的とする。

#### 放射光 X 線ラミノグラフィの概要：

放射光 X 線ラミノグラフィは、放射光 X 線マイクロ CT と同様に、放射光 X 線を試料に照射して透過画像を撮影し、断層画像を再構成する。ただし、回転ステージの回転軸を X 線の照射方向に対して傾斜させ、X 線が常に基板と平行な向きからわずかに傾いた方向から照射される状態で 360°分の透過画像を撮影する点が異なる。これにより、常に X 線が十分に透過する状態で撮影を行うことができる。

さらに、透過画像の撮影においては、屈折コントラスト法を併用している。屈折コントラスト法は、放射光 X 線のコヒーレントな特性を利用し、フレネル回折によってエッジを強調させて撮影する手法である。き裂や物質界面における X 線のわずかな屈折および干渉を利用してエッジを強調するため、マイクロ CT の空間分解能程度の微細き裂も撮影することが可能となる。

#### 実験方法：

##### 3.1 試験体および熱サイクル試験

実験に用いた試験体は、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ものの 2 種類である。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。

### 3.2 ラミノグラフィの透過画像の撮影および再構成

図 1 は、放射光 X 線ラミノグラフィ装置の構成を示す。放射光 X 線ラミノグラフィでは、試験体を回転ステージに固定し、これを 360° 回転させて 3600 枚の透過画像を撮影した。試験体は、基板の板面が回転軸と直角するように固定した。X 線は水平方向に照射され、鉛直方向からの回転軸の傾斜角は 30° とした。透過画像の撮影には、scientific CMOS(sCMOS)カメラ(浜松ホトニクス製 ORCA Flash4.0)を用いた。X 線検出器のピクセルサイズは、0.5  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  であり、撮影領域は 1024  $\mu\text{m} \times 1024 \mu\text{m}$  である。また、透過画像一枚あたりの X 線の露光時間は、200 ms とした。なお、X 線エネルギーは、Sn の K 吸収端よりもやや低い 29.0 keV を選択した。

再構成には、次式で表わされる逆投影を用いた[1]。

$$F(X', Y', Z') = \int_0^{2\pi} P(X, Z, \theta) d\theta \quad (1)$$

ここに、 $F(X', Y', Z')$  は、再構成画像、 $P(X, Z, \theta)$  はフィルタ関数をかけた透過画像である。 $X, Z$  はそれぞれ透過画像の水平および垂直方向の座標であり、 $\theta$  は試験体の回転角である。 $X', Y', Z'$  は、 $Z'$  を回転軸と平行な軸とする直角座標系における座標であり、次式により表される。

$$X = X' \cos\theta + Y' \sin\theta \quad (2)$$

$$Z = X' \sin\theta \sin\phi - Y' \sin\theta \cos\theta + Z' \cos\phi \quad (3)$$

ここに  $\phi$  は、鉛直方向からの回転軸の傾斜角である。

## 実験結果：

### 4.1 チップ抵抗はんだ接合部における疲労き裂進展

チップ抵抗の大きさが放射光 X 線ラミノグラフィの撮影領域よりも大きいため 3 回に分けて撮影を行った。図 2 は、チップ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。さらに、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。次に、図 3 は、疲労き裂の表面積を計測した結果を示す。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かる。図より、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。

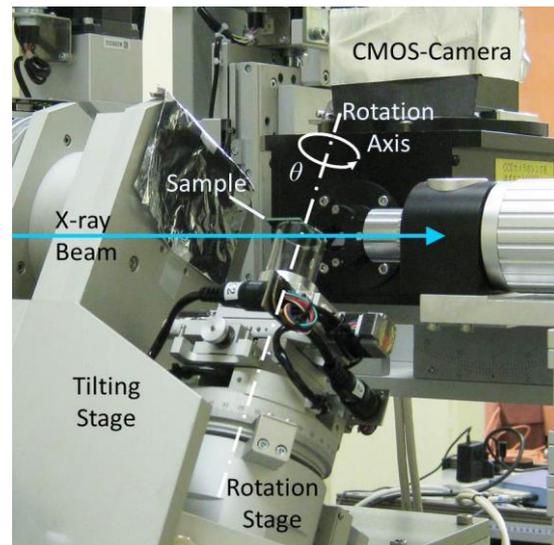
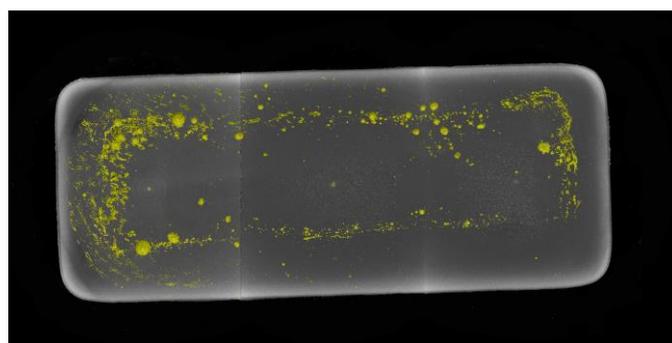
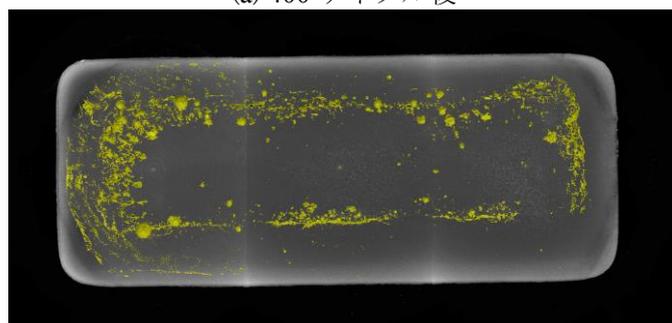


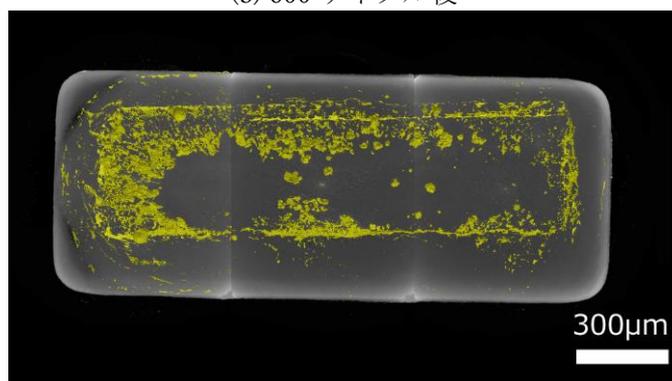
図 1. 放射光 X 線ラミノグラフィ装置の構成



(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の 3 次元画像

#### 4.2 ダイアタッチはんだ接合部における疲労き裂進展

基板にはんだ接合してあるセラミックチップの大きさが縦 3 mm×横 3 mm であるのに対し、放射光 X 線ラミノグラフィの撮影領域が約 1 mm×1 mm であるので、チップの一边を 5 つの領域に分けて場所をずらしながら撮影を実施した。断層画像からき裂とボイドを抽出し、表面積を計測した。図 4 は、1200 サイクル実施した時点での疲労き裂の一例を 3 次元画像で示す。図は 5 つに分けて撮影した画像を元にそれぞれ 3 次元画像を作成しそれらを合成したものであり、試験体の上方から見た画像である。パッドを灰色で、疲労き裂およびボイドを黄色で示す。なお、画像を見やすくするため、セラ

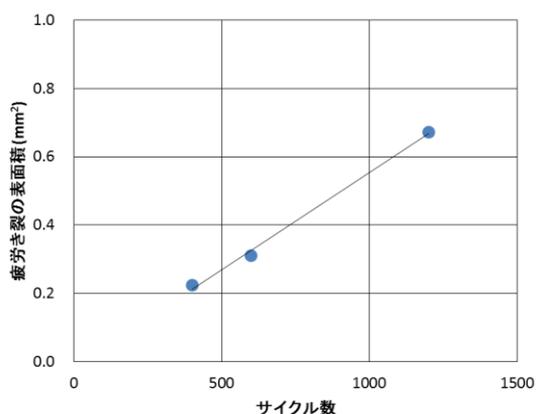


図 3. チップ抵抗のはんだ接合部における疲労き裂の進展過程

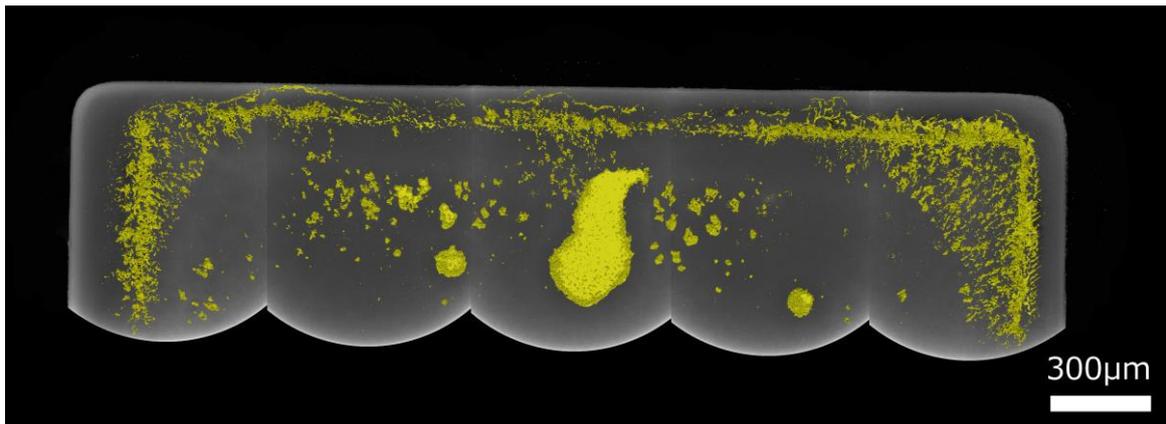


図4. ダイアタッチはんだ接合部における疲労き裂の3次元画像の一例(1200 サイクル負荷後)

ミックチップ、およびFR-4基板は表示していない。3次元画像では、中央にある大きいボイドから細かい疲労き裂までが捉えられており、チップ一辺に対する全体的な3次元のき裂形状を俯瞰することができる。特に、疲労き裂は、はんだ接合部の周辺部のひずみ集中部から発生していることが、明確に捉えられている。さらに、サイクル数が増加するに伴い、はんだ接合部の周辺部から内部に向かって疲労き裂が進展していること、またチップ内部にあるボイドが成長していることも確認できた。次に、図5は、疲労き裂の表面積を計測した結果を示す。初期ボイドの影響があるものの、チップ抵抗のはんだ接合部と同様に、サイクル数が増えると疲労き裂の表面積も直線的に増加している。この場合も、破断寿命の推定が可能であった。

#### まとめおよび今後の課題：

放射光 X 線ラミノグラフィを、チップ抵抗やダイアタッチ接合など、平板構造を有するはんだ接合部へ適用し、その熱疲労き裂進展を完全な非破壊で観察することを試みた。さらに、ラミノグラフィ画像を基にき裂表面積を計測し、き裂進展過程を定量的に評価することが可能となった。実験に使用した基板の試験体は従来の放射光 X 線マイクロ CT では構造上、断層画像の作成が困難であり、このような試験体では放射光 X 線ラミノグラフィが有効であった。今後、さらに広い熱サイクル範囲において試験データを蓄積し、疲労寿命の推定精度を高めていく。

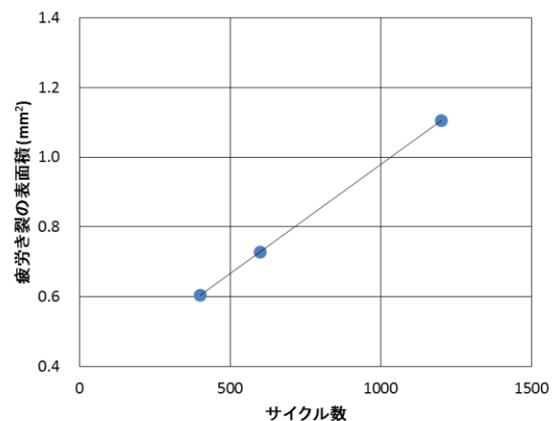


図5. ダイアタッチはんだ接合部における疲労き裂の進展過程

#### 参考文献：

- [1] M. Hoshino et al., *AIP Conf. Proc.*, Vol. **1365**, pp. 250-253 (2011).
- [2] H. Tsuritani et al., *Proc. of ASME InterPACK2013* (2013), InterPACK2013-73091.