

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

**Sequential Monitoring of Fatigue Crack Propagation in the Joints of
Cyclically Energizing Power Devices by means of
Synchrotron Radiation X-ray Laminography**

岡本 佳之^a, 高柳 毅^a, 釣谷 浩之^b, 佐山 利彦^b,
星野 真人^c, 上杉 健太朗^c, 東方 浩紀^d, 大井 純也^d, 森 孝男^d
Yoshiyuki Okamoto^a, Takeshi Takayanagi^a, Hiroyuki Tsuritani^b, Toshihiko Sayama^b,
Masato Hoshino^c, Kentaro Uesugi^c, Hiroki Higashikata^d, Junya Ooi^d, and Takao Mori^d

^a コーセル(株), ^b 富山県工業技術センター, ^c(公財)高輝度光科学研究センター, ^d 富山県立大学
^aCosel Co., Ltd., ^bToyama Industrial Technology Center, ^cJASRI, and ^dToyama Prefectural University

電子基板の実際の使用状況に近い負荷形態、すなわち繰返し通電を受けるダイアタッチ接合部に対して、放射光 X 線ラミノグラフィによる熱疲労き裂進展過程のモニタリングの可能性を検討した。通電により発熱した基板において、温度が安定した状態であれば、モニタリングが十分に可能であった。加えて、はんだ接合部における熱疲労き裂の進展過程の定量的な評価も可能であった。

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

1. 背景と研究目的：

近年、電子基板の高熱密度化に起因して、その接合部の熱疲労損傷が、電子基板の信頼性にますます大きな影響を与えるようになってきている。このため、接合部の微細な欠陥や損傷を、非破壊で検出、評価する技術の開発が急務となっている。一方、SPring-8 においては、上杉らを中心として、放射光光源を用いた高分解能の放射光 X 線マイクロ CT 装置(以下、SP- μ CT)が開発されている^[1]。加えて、SP- μ CT による観察対象の寸法制約を大幅に緩和するために、星野らを中心として放射光 X 線ラミノグラフィが開発されている^[2]。著者らは、これまで、これらの手法をフリップチップはんだ接合部やチップ抵抗接合部の熱疲労き裂の進展過程の非破壊評価などに適用してきた(2014A1521、2015B1566)^[3]。これらの研究においては、試験体に対して、冷熱衝撃試験機を用いた加速熱サイクル試験を実施することで、熱疲労き裂の進展過程を評価してきた。しかし、現実の電子基板の使用状態においては、その温度分布や変化が加速熱サイクル試験とは異なっているため、熱疲労き裂の進展過程も異なったものになると考えられる。本研究は、電子基板上のダイアタッチ接合部に対して、実装したチップ抵抗に繰返し通電による熱負荷を加え、熱疲労き裂のモニタリングの可能性を検証し、さらに通電加熱による熱疲労き裂の進展過程を評価しようとした試みである。

2. 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。加えて、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。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。

3. 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、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 鉛フリー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。

熱疲労き裂の進展過程を観察するために、繰返し通電による熱サイクル試験を実施した。すなわち、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す繰返しを行った。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低下する。

3.2 ラミノグラフィの透過画像の撮影および再構成

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交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、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 μm/pixel であり、撮影領域は 1024 μm × 1024 μm 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^[2]。

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

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、 θ 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交座標系における座標であり、次式により表される。

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

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

ここに φ は、鉛直方向からの回転軸の傾斜角である。

4. 実験結果：

4.1 繰返し通電状態でのモニタリング

繰返し通電状態にあるはんだ接合部において、熱疲労き裂のモニタリングが可能であることを確認するため、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、通電後に温度が安定した状態で撮影を実施した。図 1 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 1(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、 Ag_3Sn 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、繰返し通電状態においても、その場観察が十分可能であった。しかし、固定状態を変えていないにもかかわらず、基板の各部材の位置がわずかに変化していた。図 1 において、試験体の同じ部材の位置を比較したところ、通電状態において回転軸方向に約 5 μm セラミック基板側へ変位していた。これは、通電発熱により生じる FR-4 基板の熱変形に起因するものと考えられる。

4.2 疲労き裂の進展過程の観察

はんだ層における疲労き裂の進展過程を観察するために、試験体の実装されたチップ抵抗への

繰り返し通電により、熱サイクル負荷を加え、任意のサイクル数においてラミノグラフィ撮影を行った。図 2 は、サイクル数に応じたダイアタッチ接合部におけるはんだ層の変化をラミノグラフィ画像で示す。図 2(a)、(b)、および (c) は、同一試験体において基板と平行な同一断面であり、各々 500、2000、および 4750 サイクルにおけるものである。一回で観察可能な視野に対して接合部の寸法が大きいので、接合部におけるコーナー部の一部分のみを示す。500 サイクルで観察された空隙は、ほとんどが初期ポイドとみられる。2000 サイクル、4750 サイクルと繰り返し負荷が進むに従い、500 サイクルでは見られなかった微小なき裂が、接合部のコーナー部とは反対側の画像右上付近において、顕著に増加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る。さらに、サイクルの進展に伴い、はんだ層の表面形状も一部に変形が生じているのが確認できる。通常、疲労き裂は応力が集中する接合部のコーナー部付近から発生、進展するものと予想されるが、今回観察した部分では、コーナー部から離れた箇所において、微小なき裂が増加しており、観察していない接合部の反対側のコーナー部から疲労き裂が進展している可能性がある。

疲労き裂の進展過程を定量化するために、図 2 のラミノグラフィ画像を基に、疲労き裂とポイドを含む空隙の断面積を計測した。撮影範囲が、サイクル数ごとにやや異なるため、図 2(a) に示

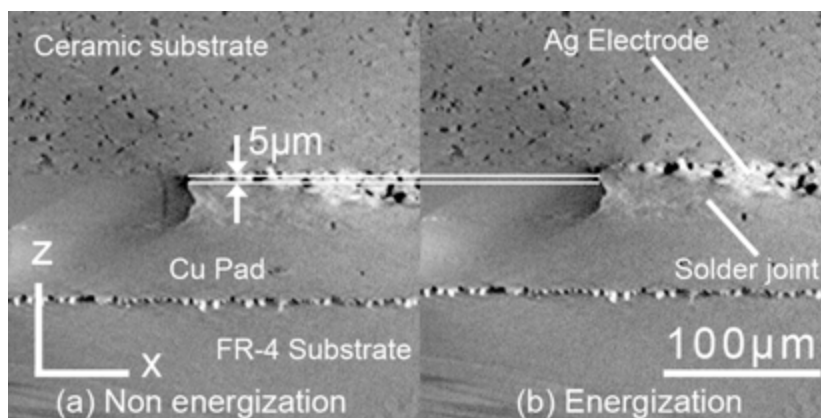
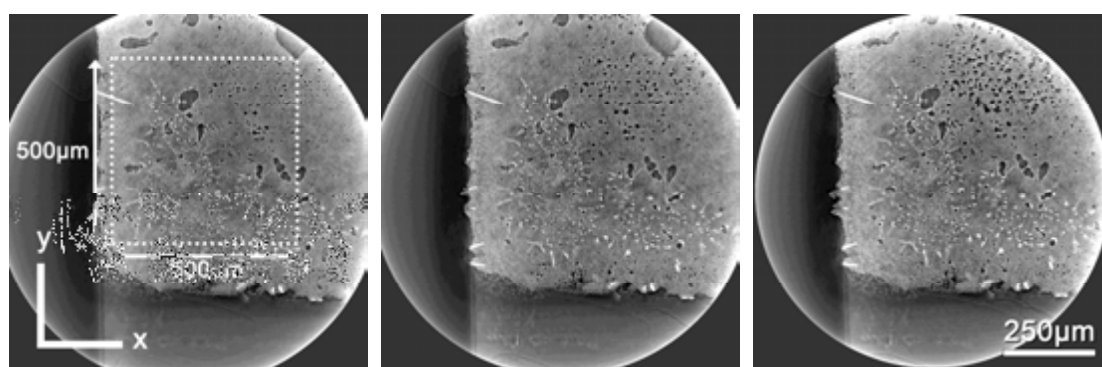


Fig.1. Laminography images of the same die attached solder joint under energization and non-energization states.



(a) 500 cycles

(b) 2000 cycles

(c) 4750 cycles

Fig.2. Laminography images of fatigue cracks in the same solder joints, showing the fatigue crack propagation process.

すように、 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ の同一矩形内で計測を行った。図 3 は、疲労き裂などの空隙の断面積の変化を示す。図 2 で示した領域に加え、同一の接合部における別の観察領域についても同様に

計測し、それぞれを Area1、および Area2 とした。どちらの領域も、サイクル数が進むに従って、き裂断面積が増加しており、ほぼ直線的に変化している。Area1、および Area2 における平均き裂進展速度は、 $1.60 \mu\text{m}^2/\text{cycle}$ であった。

5. まとめおよび今後の課題：

今回、繰返し通電を受けるダイアタッチ接合部に対して、通電により発熱した基板においても温度が安定した状態であれば、得られたラミノグラフィ画像が発熱していない基板と同等の画質を有していることから、放射光 X 線ラミノグラフィによる熱疲労き裂進展過程のモニタリングが可能であることが確認できた。しかし、実際の基板の通電状態と加速試験とでは、熱負荷の違いによって破壊モードが異なる可能性が高く、種々の熱負荷条件下におけるデバイス接合部付近での破壊の発生や進展状況の違いを、逐次モニタリングによって明らかにする必要がある。

参考文献：

- [1] Uesugi, K. *et al.*, *Nucl. Instr. Method., Sec. A*, Vol. 467-468, pp. 853-856, (2001).
- [2] Hoshino, M. *et al.*, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1365, pp. 250-253, (2011).
- [3] 釣谷浩之ほか, 第 30 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集, pp. 94-97, (2016).

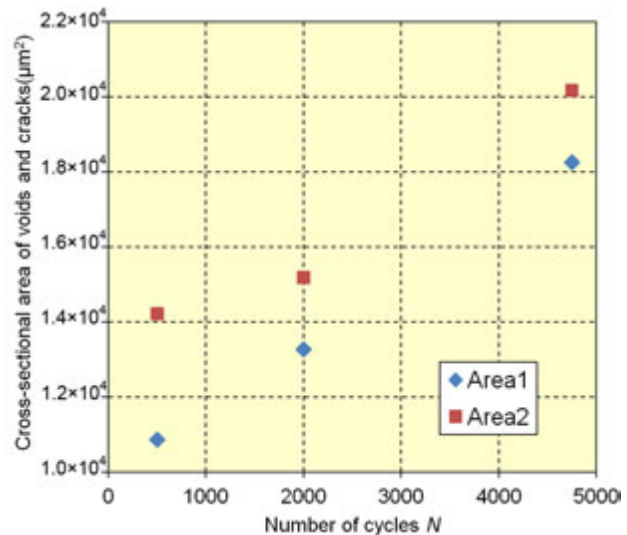


Fig.3 Crack propagation process in a die attached solder joint due to cyclic energization.