

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
**Application of Synchrotron Radiation Laminography Monitoring to
Cyclically Energizing Power Devices for
Thermal Reliability Test with Appropriate Loading Conditions**

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 健太郎^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, ^dToyama Prefectural University

ダイアタッチ接合部を有する実装基板の試験体に対して、通電による繰返し熱負荷を含む種々の熱負荷条件下における接合部付近での破壊の発生、進展状況を、放射光ラミノグラフィを適用した逐次モニタリングによって評価した。通電加熱による熱サイクル試験では、はんだ層内部における疲労き裂の進展を明確に可視化することができ、そのき裂進展過程を定量化することに成功した。

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、
放射光ラミノグラフィ

1. 背景と研究目的：

高熱密度化が著しいパワーデバイス等においては、信頼性向上のため、その接合部に発生する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。そこで、SPRING-8においては、放射光光源を用いた高分解能の放射光マイクロ CT 装置(以下、SP- μ CT)が開発され^[1]、さらに、その観察対象を電子基板等に拡張すべく、星野らを中心として放射光ラミノグラフィが開発された^[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、熱的な繰返し負荷に対する信頼性(余寿命)を短時間で評価するために、冷熱衝撃試験機を用いて実際の使用条件よりも厳しい熱負荷条件(最高最低温度、温度変化範囲、負荷時間など)での加速試験(熱衝撃試験)を行ってきた。しかし、現実のパワーデバイス等においては、適切でない熱負荷条件で加速試験を行った場合、評価すべき対象と異なる破壊モードが発生するなどにより、信頼性を適切に評価ができない可能性がある。本研究は、パワーモジュールを模擬した試験体(ダイアタッチ接合試験体)に対して、放射光ラミノグラフィを適用し、通電による繰返し熱負荷を含む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、進展状況を、逐次モニタリングによって評価しようとする試みである。

2. 放射光ラミノグラフィの概要：

放射光ラミノグラフィは、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°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。

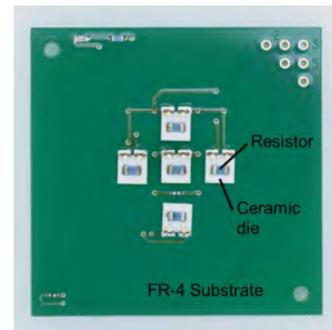


Fig. 1 Overall image of the specimen.

3. 実験方法：

3.1 試験体および熱サイクル試験

Fig. 1 は、試験体の外観を示す。試験体は縦 2 mm × 横 1.25 mm のチップ抵抗が実装された縦 3 mm × 横 3 mm のセラミック基板が Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu 鉛フリーはんだによって、縦 40 mm × 横 40 mm の FR-4 基板にダイアタッチ接合されたものである。FR-4 基板には、チップ抵抗が実装されたセラミック基板 5 個が 2 mm の間隔を空けて、十字に配置されている。

この試験体に、通電による熱サイクル試験 2 種類、冷熱衝撃試験機を用いた熱サイクル試験 1 種類の合計 3 種類の熱サイクル試験を実施した。通電による熱サイクルは、セラミック基板上に実装したチップ抵抗に通電することで加熱するもので、1 つは 10 min 通電加熱し、その後 10 min 非通電状態で室温近くまで温度が下がる 1 サイクルあたり 20 min の熱サイクルであり、もう 1 つは同様に 30 min 通電加熱し、その後 30 min 非通電とする 1 サイクルあたり 60 min の熱サイクルである。このとき、どちらの熱サイクルでもはんだ層における高温側のピーク温度は約 110°C、低温側の最下点温度は室温である。比較のため、高温と低温の温度差およびさらし時間を揃えて冷熱衝撃試験機を用いた熱サイクルを実施した。温度プロファイルは、通電による試験の室温を 20°C と仮定し温度差が 90°C となるよう、高温側 90°C、低温側 0°C、それぞれの温度でのさらし時間 30 min とした。

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 通電による熱サイクル試験におけるき裂進展過程の評価

疲労き裂の進展過程を評価するために、試験体に実装されたチップ抵抗への通電、非通電により熱サイクル負荷を加え、任意のサイクル数にてラミノグラフィによるモニタリングを実施した。Fig. 2 および Fig. 3 は、通電による熱サイクル試験 (1 サイクル 20 min) を行った試験体について、その接合部における変化をラミノグラフィ画像で示す。Fig. 2 (a) から (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、4750、および 11000 サイクルの通電負荷時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ため、接合部におけるコーナー部の一部分のみを示す。さらに、モニタリングのサイクルごとに、撮影範囲がやや移動するため、同一範囲の矩形領域を設定して、疲労き裂の進展を観察することとした。Fig. 3 は、Fig. 2 (a)に設定した $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ の固定した観察範囲 Area1 において、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。

まず、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 サイクルと繰り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、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る。また、同様の疲労き裂の進展形態は、もう一つの通電による熱サイクル試験 (1 サイクル 60 min) を行った試験体についても観察された。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。

さらに、疲労き裂の進展過程を定量化するために、Fig. 3 のような固定した観察範囲での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。Fig. 4 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、Fig. 2 に示した Area1 に加え、同一の接合部における反対側の角部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る。 $200\ \mu\text{m} \times$

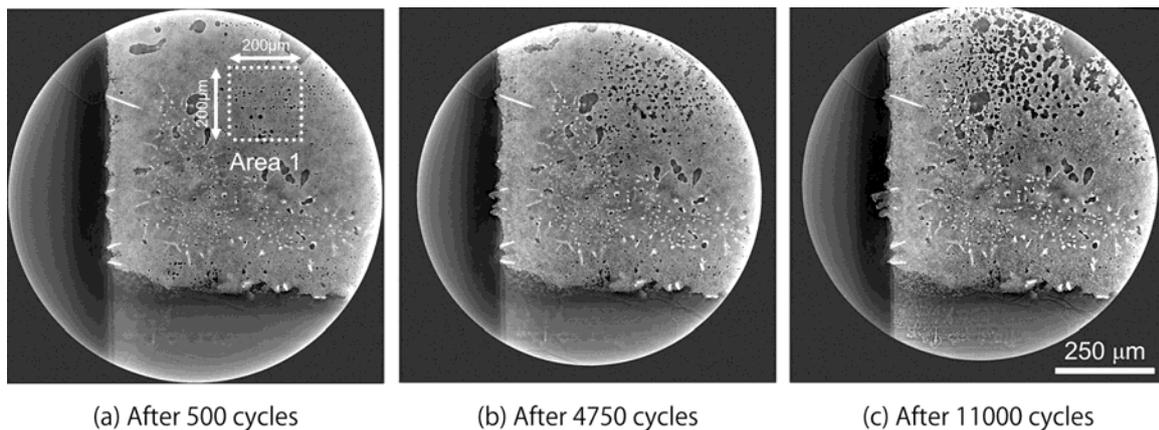


Fig. 2 Laminography images of cracks and voids in the same solder joint, showing the fatigue crack propagation process due to energization heating for 20 minutes per cycle.

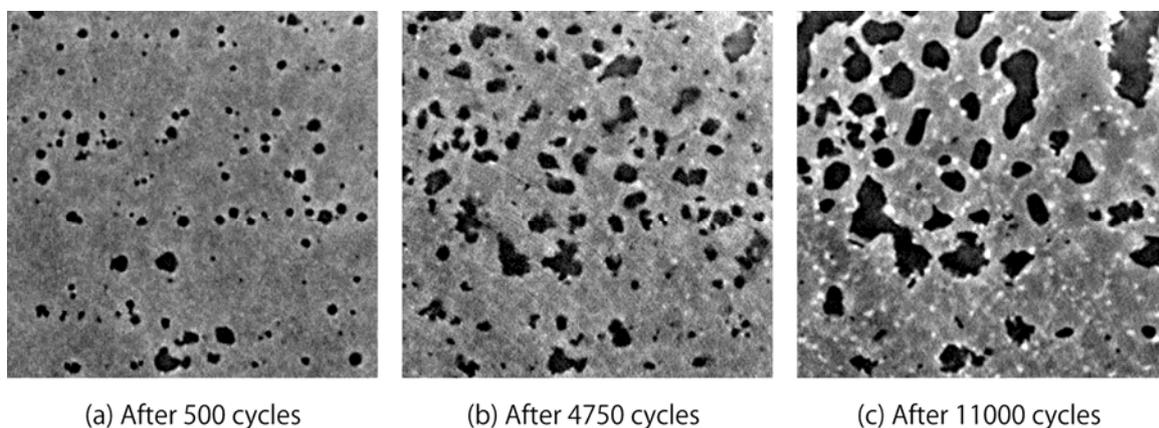


Fig. 3 Laminography images of the zoomed area Area 1 in the same solder joint, showing the fatigue crack propagation process due to energization heating for 20 minutes per cycle.

200 μm の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、固定した観察範囲 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。200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ の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。これには、はんだ層のクリープ変形が影響しているものと考えられる。

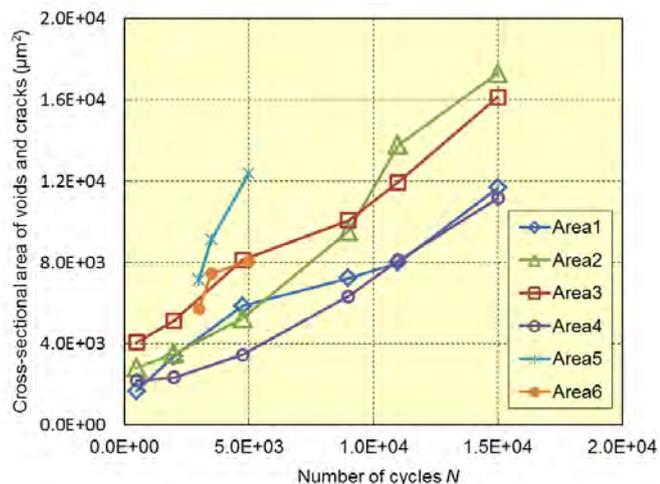


Fig. 4 Crack propagation process in die-attached solder joints due to cyclic energization as shown by the relationship between the area of the cracks and voids and the number of cycles, N .

4.2 冷熱衝撃試験機を用いた熱サイクル試験との比較

これまでの研究で、通電による熱サイクル試験と冷熱衝撃試験機を用いた加速熱サイクル試験とでは、接合部における破壊過程が異なる場合があることが分かっている^[4]。破壊過程の違いに影響を与える要因を明らかにするために、高温と低温の温度差およびさらし時間を通電状態と同様に設定して、試験および接合部のモニタリングを行った。その結果、加速熱サイクル試験の前後において、同一試験体の同一断面のラミノグラフィによる画像を比較したところ、双方の画像にほとんど違いは見られず、はんだ接合部に疲労き裂が進展している形跡は確認できなかった。

この原因としては、モニタリング時において試験体の熱負荷が 2000 サイクルに留まっており、サイクル数が少なかった可能性が第一に考えられる。しかし、事前に実施した有限要素解析からは、基板全体を加熱冷却する加速熱サイクル試験において、はんだ接合部の周辺部で疲労破壊が発生するに十分な非弾性ひずみの変動が予測されていた。可能性としては、加速熱サイクル試験状態と通電状態とで、基板内での温度分布や変化に大きな違いがあり、その結果、破壊する場所や破壊モードに違いが現れるのではないかと推測される。今後は、モニタリングの範囲を広めて、はんだ層以外の他の部分において損傷が発生していないかを確認する必要がある。

5. まとめおよび今後の課題：

パワーモジュールを模擬した試験体（ダイアタッチ接合試験体）に対して、通電による繰返し熱負荷を含む種々の熱負荷条件下における接合部付近での破壊の発生、進展状況を、放射光ラミノグラフィを適用した逐次モニタリングによって評価しようと試みた。通電加熱による熱サイクル試験では、1 サイクルあたり 20 min と 60 min の 2 種類の熱サイクル試験を実施した。いずれの場合も、はんだ層内部における疲労き裂の進展を明確に可視化することができ、そのき裂進展過程を定量化することに成功した。一方、冷熱衝撃試験機を用いた熱サイクル試験では、はんだ接合部に疲労き裂が発生、進展している形跡は確認できなかった。熱負荷形態の違いにより、破壊する場所や破壊モードに違いが現れるのではないかと推測される。今後は、モニタリングの範囲を広めて、はんだ層以外の他の部分において損傷が発生していないかを確認する必要がある。

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).
- [4] 大井純也ほか, 第 31 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. 51-53, (2017).