

パワーデバイス接合部における疲労き裂進展評価のための
放射光 X 線ラミノグラフィの応用
**Application of Synchrotron Radiation X-ray Laminography to
the Evaluation of Fatigue Crack Propagation in
Attached Joints of Power Devices**

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, 花村 拓哉^d, 森 孝男^d
Yoshiyuki Okamoto^a, Takeshi Takayanagi^a, Hiroyuki Tsuritani^b, Toshihiko Sayama^b,
Masato Hoshino^c, Kentaro Uesugi^c, Takuya Hanamura^d, 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

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、パワーデバイスのダイアタッチ接合部を対象として、熱サイクル負荷による疲労き裂進展過程を観察した。その結果、疲労き裂を可視化しその進展過程を明瞭に捉えることが可能となった。将来的には、ラミノグラフィを適用して、疲労に対する信頼性(余寿命)を評価することも可能である。

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、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)。そこで、本研究では、パワーモジュールの信頼性を大きく左右するパワーデバイス接合部における熱疲労破壊の過程に、この放射光 X 線ラミノグラフィの適用を試みる。非破壊で接合部内の疲労き裂を検出する技術を確立し、疲労き裂の進展過程の時系列的なモニタリングを行って、パワーデバイスの健全性を評価しようという研究である。

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。しかし、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。こうすることで、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開口量を有する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、縦 3.0 mm×横 3.0 mm の Al₂O₃ セラミックチップが、FR-4 基板に、Sn-3.0 wt%Ag-0.5 wt%Cu はんだによって接合されたものである。この接合部は、一般のパワーデバイスの接合部と同様に、ダイアタッチ構造と呼ばれるチップ等の板状部材の積層接合構造(図 1)となっている。

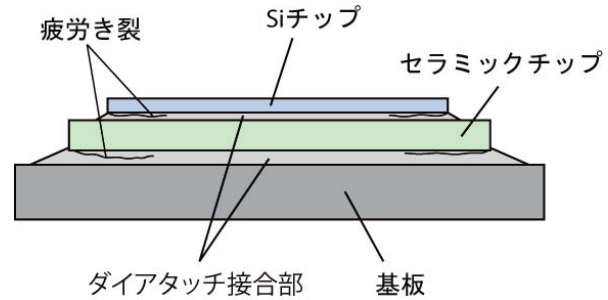


図 1. ダイアタッチ接合構造

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

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、150 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、 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。

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

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

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 ラミノグラフィによる断層画像

図 2 は、試験体のラミノグラフィ画像の一例を示す。図 2(a)は、基板に平行な断面(はんだ層)のラミノグラフィ画像を示す。全体に細かなノイズがあるものの、鮮明な画像が得られている。また、図 2(b)、および図 3 に示す基板に垂直な断面においては、断面上側から順に、セラミックチップ、はんだ層、Cu パッド、基板といった部材を確認できる。しかし、各層の界面は不明瞭であり、画像全体に斜め 30°方向に流れるような筋としてラミノグラフィ特有の偽像が現れている。これは、ラミノグラフィにおいては、透過画像データがどうしても欠損してしまうので、再構成における原理上の限界といえる。一方、はんだ層の内部においては、疲労き裂あるいはボイドは明瞭に確認できており、き裂の進展を評価するには十分な画質が得られている。また、やや不鮮明ではあるが、Ag₃Sn 相が明るい小さな点としてはんだ層全体に広がっているのも確認できる。

4.2 疲労き裂の進展状況

疲労き裂進展過程を評価した。図 3 は、同一はんだ接合部に対して、400 および 600 サイクル熱負荷後における基板に垂直な断面の画像を示す。400 サイクルの時点では、主となる疲労き裂は確認できず、セラミックチップ下の薄いはんだ接合部層の端部付近において、約 10 から 20 μm の長さの微小き裂あるいはボイドが発生している。さらに、600 サイクルの時点では、これらの微小き裂が互いに連結して主となる疲労き裂を形成し、電極下はんだ層に広がっていることが分

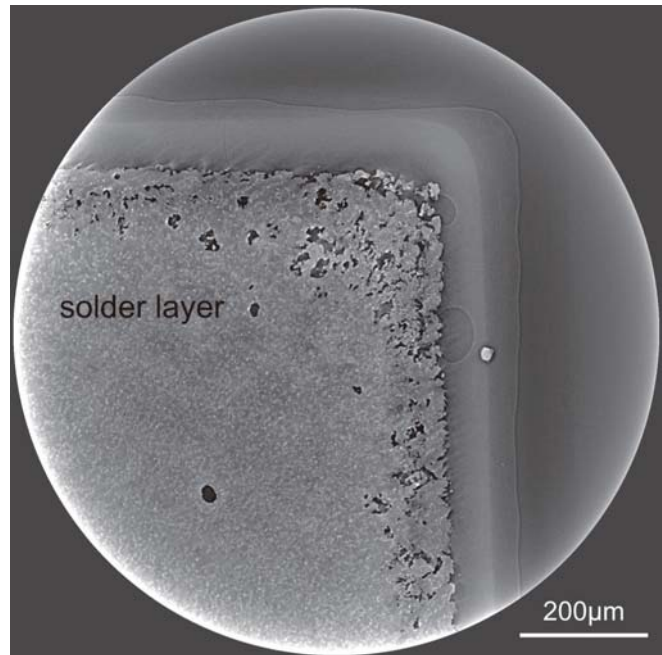
かる。すなわち、セラミックチップと基板との熱膨張差に起因してはんだ層が繰返しのせん断変形を受けるが、このときはんだ層の端部から疲労き裂が漸次進展していく訳ではなく、主き裂の形成に先立って多くの微細なき裂が形成され、これらが連結するという疲労破壊機構を推定できる。しかし、この破壊機構に基づいて、ダイアタッチ接合部における疲労寿命を推定するには、疲労き裂の3次元的な進展状況を解析すること、およびさらに広い熱サイクル範囲において試験データを蓄積していくことが必要である。

5. まとめおよび今後の課題：

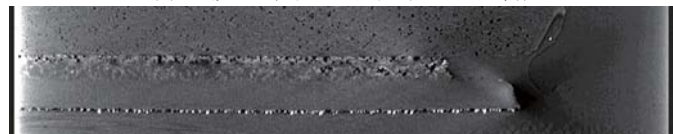
パワーデバイスのダイアタッチ接合部に発生する熱疲労き裂の進展過程について、放射光 X 線ラミノグラフィを用いて完全な非破壊での観察を試みた。その結果、疲労き裂やその進展過程を明瞭に捉えることが可能であった。今後、疲労き裂の3次元的な進展状況を解析し、さらに広い熱サイクル範囲において試験データを蓄積して、疲労寿命の推定を行う。

参考文献：

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

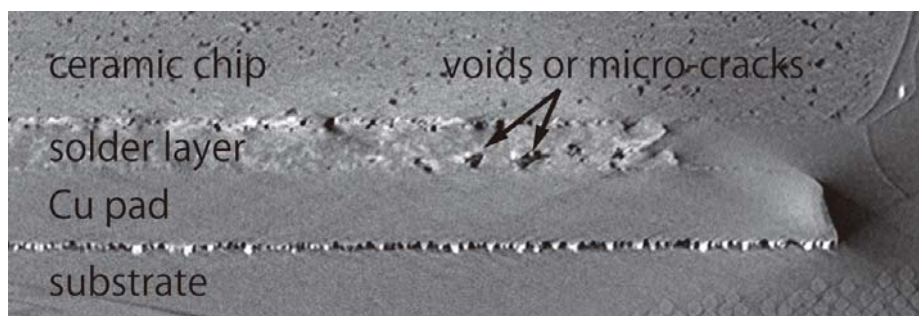


(a)基板と平行な断面(はんだ層)

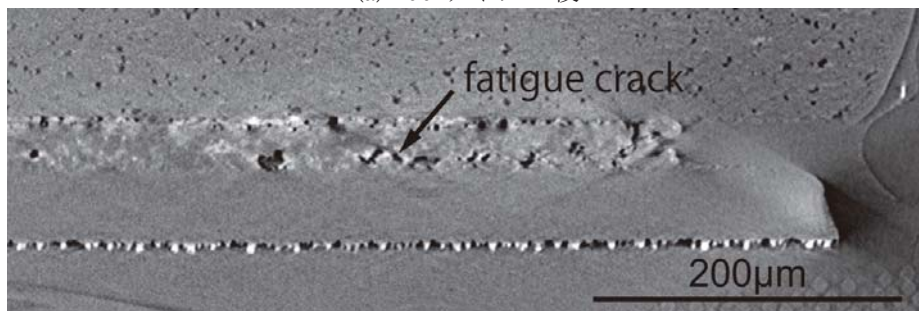


(b)基板と垂直な断面

図2. ラミノグラフィによる断層画像の一例



(a) 400 サイクル後



(b) 600 サイクル後

図3. 接合部における疲労き裂進展状況の一例