

レーザーピーニング処理した摩擦攪拌接合継手における
疲労き裂進展のラミノグラフィによる非破壊観察
**Nondestructive Observation of Fatigue Crack Propagation in
Laser-peened Friction Stir Welded Joints by Laminography**

佐野 雄二^a, 政木 清孝^b, 西銘 一貴^b, 木村 聖光^b, 梶原 聖太郎^c,
佐野 智一^d, 柏原 亮太^d, 岩田 匠平^d, 足立 隆史^e, Omar Hatamleh^f
Yuji Sano^a, Kiyotaka Masaki^b, Kazuki Nishime^b, Masamitsu Kimura^b, Kentaro Kajiwara^c,
Tomokazu Sano^d, Ryota Kashiwabara^d, Shohei Iwata^d, Takafumi Adachi^e, Omar Hatamleh^f

^a(株)東芝, ^b沖縄工業高等専門学校, ^c(公財)高輝度光科学研究センター,
^d大阪大学, ^e富士重工業(株), ^fNASA - Johnson Space Center

^aToshiba Corporation, ^bOkinawa National College of Technology, ^cJASRI,
^dOsaka University, ^eFuji Heavy Industries Ltd., ^fNASA - Johnson Space Center

アルミニウム合金 A6061-T6 摩擦攪拌接合(FSW)継手試験片に曲げ疲労により予き裂を導入し、レーザーピーニング処理により表面に圧縮残留応力を導入した。ビームライン脇に仮設した曲げ疲労試験機を使用してき裂を進展させ、その様子をラミノグラフィにより非破壊で観察することにより、レーザーピーニング処理した FSW 継手の疲労初期から破断直前までのき裂進展挙動を調査した。

キーワード： 摩擦攪拌接合, レーザーピーニング, 疲労, き裂進展, ラミノグラフィ

背景と研究目的：

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding; FSW)は従来の溶接と異なり、熔融温度以下で軟化した材料を局部的に攪拌して接合する新しい接合法である[1]。FSW は接合温度が低く入熱が少ないため、継手効率が高く接合後の変形が小さいという特徴がある。このため、アルミニウム合金を中心として長尺薄肉構造物(鉄道車両のボディ, 航空機の胴や翼など)への適用が広がっている[2,3]。FSW 接合部は攪拌の状況を反映した特異な組織となり、疲労き裂の発生や進展がその組織に影響されるため、従来の溶接継手とは異なる複雑なき裂進展挙動を示すことが知られている[4]。

レーザーピーニングは、出力密度の高いレーザーパルスを材料に照射したときの衝撃力を利用して表面を強化する技術である。金属材料の疲労強度の向上および疲労寿命の延長に高い効果を示すことが知られており[5]、FSW 継手に対しても有効である[6-11]。

本研究は、放射光を光源としたラミノグラフィにより FSW 継手に生じた疲労き裂を非破壊で観察し、その進展挙動を明らかにすることを目的としている。2011A・B ではラミノグラフィの原理を確認するとともに、深さが異なる一連のスライス像を再構成することにより継手表面および内部のき裂形状が再現できることを確認した[12,13]。2012A・B では小型の平板曲げ疲労試験機をビームライン脇に仮設し、疲労き裂の進展の様子を非破壊で観察した [14,15]。今回(2013B)はレーザーピーニングを適用した FSW 継手の疲労き裂進展を観察し、レーザーピーニングによるき裂進展の抑制効果を確認することを目的とした。

実験方法：

1. 試験片の作製

前回までと同様に、供試材には厚さ 3 mm の Al-Mg-Si 系展伸用アルミニウム合金 A6061-T6 圧延材を使用した[16-20]。FSW 継手は汎用フライス盤と M4 の逆ネジが切られた長さ 3 mm のピンを有する φ10 mm のツールを使用して作製した。接合条件はツール回転数 1400 rpm, 前進角 3 度, 送り速度 41 mm/min である。

疲労試験片は FSW 継手からワイヤ放電加工により図 1 に示すように採取した。ツール走査痕はフライス加工によって除去し、表面と側面をエメリ研磨とバフ研磨により鏡面に仕上げた。接合

部中心(試験片中心)には直径 0.3 mm, 深さ 0.3 mm のドリル穴をあけ, 平板曲げ疲労試験機を使用して応力振幅 120 MPa, 完全両振り(応力比 $R = -1$), 室温・大気中, 負荷繰り返し速度 22 Hz の条件で疲労負荷を与え, 長さ約 3 mm の疲労予き裂を付与した。

レーザーピーニング処理は試験片 R 部の表面および裏面の約 40 mm 幅について実施した。処理条件はパルスエネルギー 60 mJ, 照射スポット径 0.7 mm とし, 表面(ツール側)を 18 pulse/mm² の照射パルス密度で処理した後に裏面を 27 pulse/mm² で処理し, 試験片の反りを抑えた[9]。

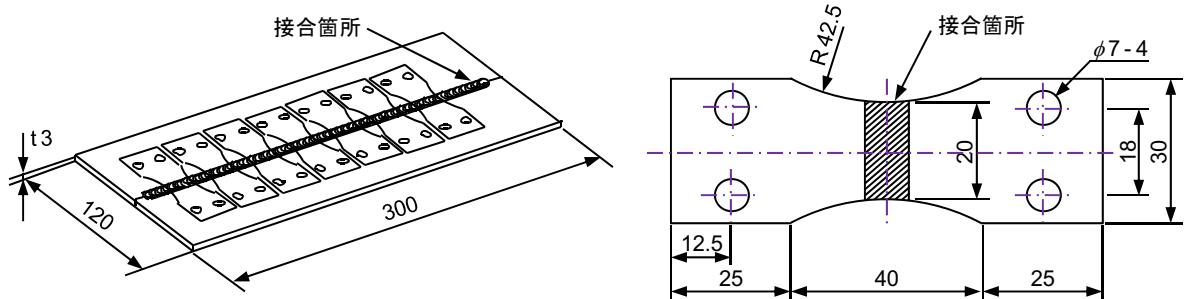


図 1. 疲労試験片の採取位置(左)および疲労試験片の寸法・形状(右)

2. き裂の可視化試験

ラミノグラフィによる疲労き裂の可視化試験は産業用ビームライン BL19B2 の第 1 ハッチで行った。測定レイアウトを図 2 に示す。試験片の回転軸を鉛直から 30 度傾けることを除けば, CT と同一のレイアウトである。レーザーピーニング処理による圧縮残留応力により表面の疲労き裂は強く閉口しているため, 図 3 に示す試験片ホルダーにより試験片に曲げ負荷を与えた[16-20]。X 線エネルギーは 28 keV, 試験片と X 線カメラの距離は 0.8 m, 検出器の実効的なピクセルサイズは 5.6 μm, 視野は水平方向 11.2 mm, 垂直方向 4.7 mm とした。微細な疲労き裂を観察するためには高い解像度が必要であり, ラミノグラフィの視野は限られる。このため, 図 3 右に示すように分割した測定を繰り返し, き裂全体を観察した。

ビームライン脇には図 4 に示す平板曲げ疲労試験機(PBF-30X)を仮設し, 試験片に応力振幅 120 MPa の曲げ疲労負荷を与えてき裂を進展させた。き裂進展の途中でラミノグラフィによる観察を繰り返すことにより, き裂の進展を非破壊で観察した。疲労負荷により試験片に加わる応力は図 3 右の Y 方向(試験片の長手方向)であり, 組織が均質な場合き裂は X 方向に進展する。

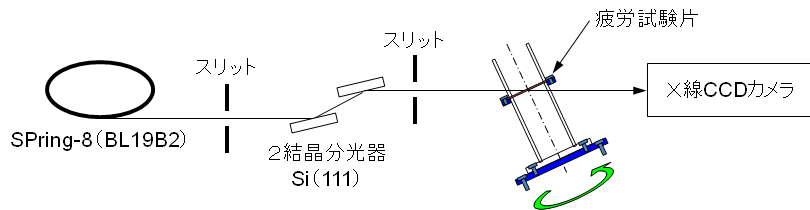


図 2. ラミノグラフィ測定レイアウト(BL19B2 第 1 ハッチ)

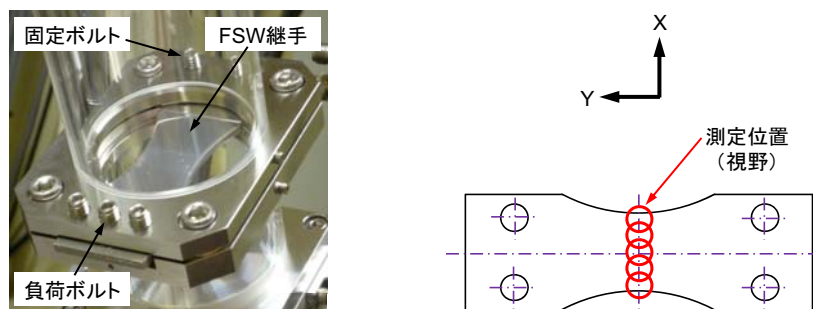


図 3. 試験片ホルダー(左)と試験片の測定位置(右)

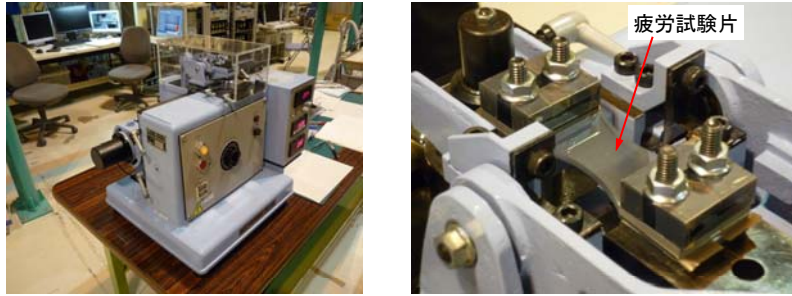


図4. 曲げ疲労試験機 PBF-30X(左)と試験片の取付け状況(右)

3. スキャン方法の改善

前回(2012B)までの実験では、回転ステージを 0.5 度毎に静止させて 360 度にわたる投影データを取得していた(ステップスキャン方式). その間、10 度毎にステージを上下させてアクリルパイプのみの投影データを取得し、アクリルパイプによる X 線の減衰を補正していた. 今回(2013B)は、ステージを一定速度で回転させながら 360 度にわたる投影データを連続的に取得した(連続スキャン方式). また、アクリルパイプの投影データの取得は、連続回転スキャンの前後にのみ実施する方法に変更した. これにより、データ取得時間の大幅な短縮が期待できる.

実験結果：

1. スキャン方法改善の効果

ステップスキャン方式と連続スキャン方式でラミノグラフィを行い、再構成画像を比較した. 使用した試験片および撮影条件は同等である. 試験片表面から約 0.36 mm 深さのスライス像の一例を図 5 に示す. 両者の結果に有意な差は認められなかったため、その後の実験は連続スキャン方式で行った. 一連の測定時間(1 視野)はステップスキャンが約 40 分、連続スキャンが約 7 分であり、スキャン方式の変更により測定時間が大幅に短縮された.

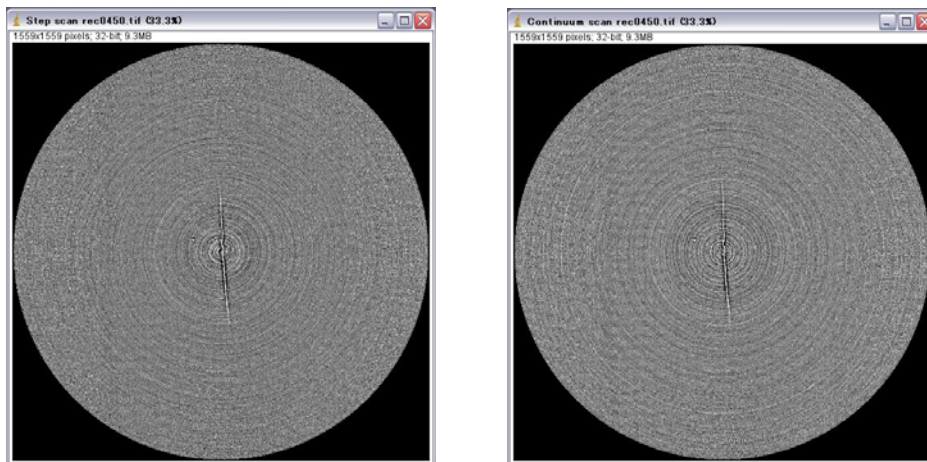


図5. ステップスキャン(左)および連続スキャン(右)による再構成スライス像

2. き裂進展試験の結果

ラミノグラフィにより得られた試験片のほぼ表面の再構成スライス像を図 6 に示す. 両画像とも試験片表面の規則的なレーザー走査痕が確認でき、中心付近には疲労予き裂を導入するためのドリル穴(直径 0.3 mm)が確認できる. 疲労負荷回数は左が 1.250×10^5 cycle, 右が 2.375×10^5 cycle であり、き裂が進展している.

図 3 に示す通り、試験片は固定ボルトによりホルダー片側で固定され、負荷ボルトにより曲げ荷重が与えられている. このため、試験片は回転軸に垂直な平面から僅かに傾いて固定されている. 従って、図 6 の各再構成スライス像の右側は試験片表面より僅かに内側(試験片の内部)に対応し、左側のレーザー走査痕が明確に現れている部分が試験片の表面に対応すると考えられる.

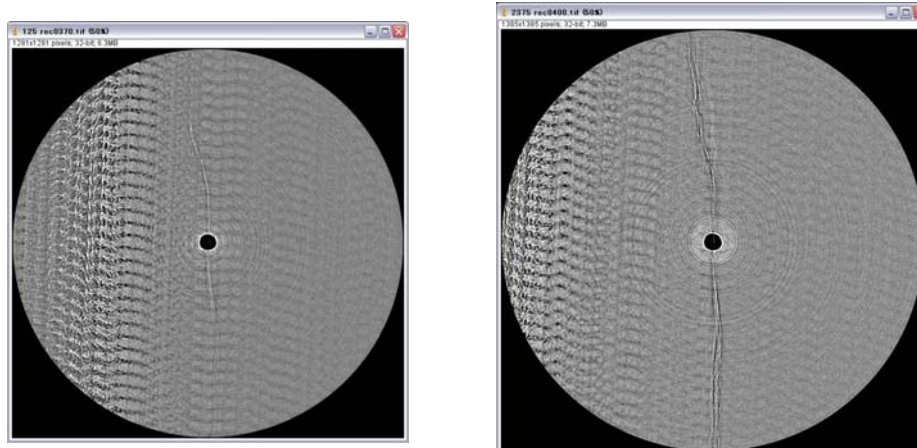


図 6. FSW 継手試験片表面の再構成像(左 : 1.250×10^5 cycle, 右 : 2.375×10^5 cycle)

結論および今後の課題 :

アルミニウム合金 A6061-T6 の摩擦攪拌接合(FSW)継手試験片に曲げ疲労によりき裂を導入し、その形状をラミノグラフィにより可視化した。試験片にはレーザーピーニングを施し、圧縮残留応力を導入した。ビームライン脇に曲げ疲労試験機を仮設し、疲労負荷によるき裂進展とラミノグラフィを交互に繰り返すことにより、疲労き裂の進展を非破壊で観察した。また今回(2013B)は、試験片のスキャン方式をステップスキャンから連続スキャンに変更することにより、測定時間の大幅な短縮を達成した。研究期間の短縮と自由度の増大が期待できる。

今回、表面に高い圧縮残留応力が生じている試験片についてもラミノグラフィによる疲労き裂の可視化が可能であることを確認した。今後はデータ解析を進めてき裂の三次元的な形状を把握し、レーザーピーニングのき裂進展への影響を確認する。また、き裂進展に及ぼす残留応力や表面粗さの影響を検討するとともに、き裂の進展を抑制するための接合条件や残留応力分布、レーザーピーニングなどの表面処理の効果などについて検討を行う。

参考文献 :

- [1] R.S. Mishra and Z.Y. Ma: *Mater. Sci. Eng. R*, **50**, 1-78 (2005).
- [2] 森久史 他、*軽金属*, **57**, 506-510 (2007).
- [3] 武久浩之、*軽金属*, **56**, 178-183 (2006).
- [4] O. Hatamleh, et al.: *Mater. Sci. Eng. A*, **519**, 61-69 (2009).
- [5] Y. Sano, et al.: *Mater. Sci. Eng. A*, **417**, 334-340 (2006).
- [6] 山城研二 他、日本機械学会 2010 年度年次大会, S305-1-5, (2010).
- [7] K. Yamashiro, et al.: Technical digest of 3rd Int. Conf. on Laser Peening and Related Phenomena (2011). <http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/3rdLP/img/digest.pdf>
- [8] 山城研二 他、日本材料学会高温強度・破壊力学合同シンポジウム, (2011).
- [9] Y. Sano, et al.: *Mater. Des.*, **36**, 809-814 (2012).
- [10] K. Masaki, et al.: Proc. 4th Int. Conf. on Laser Peening and Related Phenomena, (2013).
- [11] K. Masaki, et al.: Proc. Int. Joint Symp. on Join. Weld. (IJS-JW 2013), Osaka, (2013).
- [12] 佐野雄二 他、平成 23 年度 重点産業利用課題成果報告書 (2011A), 2011A1685.
- [13] 佐野雄二 他、平成 23 年度 重点産業利用課題実施報告書 (2011B), 2011B1861.
- [14] 佐野雄二 他、平成 24 年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書 (2012A), 2012A1274.
- [15] 佐野雄二 他、平成 24 年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書 (2012B), 2012B1740.
- [16] 政木清孝 他、日本機械学会 2012 年度年次大会, G030051, (2012).
- [17] 政木清孝 他、日本材料学会第 31 回疲労シンポジウム, (2012).
- [18] 政木清孝 他、日本機械学会 2013 年度年次大会, (2013).
- [19] 政木清孝 他、日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, (2013).
- [20] 政木清孝 他、日本材料学会信頼性・破壊力学合同シンポジウム, (2013).