

レーザーピーニング処理した摩擦攪拌接合継手疲労き裂の  
放射光ラミノグラフィによる非破壊観察  
**Nondestructive Observation of Fatigue Cracks in Laser-peened Friction  
Stir Welded Joints by Synchrotron Radiation Computed Laminography**

佐野 雄二<sup>a</sup>, 政木 清孝<sup>b</sup>, 木村 聖光<sup>b</sup>, 比嘉 良鳳<sup>b</sup>, 梶原 聖太郎<sup>c</sup>,  
佐野 智一<sup>d</sup>, 足立 隆史<sup>e</sup>, Omar Hatamleh<sup>f</sup>  
Yuji Sano<sup>a</sup>, Kiyotaka Masaki<sup>b</sup>, Masamitsu Kimura<sup>b</sup>, Ryoho Higa<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>,  
Tomokazu Sano<sup>d</sup>, Takafumi Adachi<sup>e</sup>, Omar Hatamleh<sup>f</sup>

<sup>a</sup>(株)東芝, <sup>b</sup>沖縄工業高等専門学校, <sup>c</sup>(公財)高輝度光科学研究センター,  
<sup>d</sup>大阪大学, <sup>e</sup>富士重工業(株), <sup>f</sup>NASA - Johnson Space Center  
<sup>a</sup>Toshiba Corporation, <sup>b</sup>Okinawa National College of Technology, <sup>c</sup>JASRI,  
<sup>d</sup>Osaka University, <sup>e</sup>Fuji Heavy Industries Ltd., <sup>f</sup>NASA - Johnson Space Center

摩擦攪拌接合(FSW)で作成したアルミニウム合金 A6061-T6 と A2024-T3 の異材継手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を施して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によりき裂を進展させ, その様子をラミノグラフィにより非破壊で観察した. 材料の密度差により, 攪拌の様子が再構成像に明確に現れた. レーザー走査痕により表面はき裂の判別が難しいが, 内部ではき裂の進展を明確に捉えることができた.

**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, 溶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, 継手効率がよ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]. 今回は前回(2013B)[16]に引続き, レーザーピーニング処理した FSW 継手の疲労き裂の進展を観察し, 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

供試材には厚さ 3 mm の Al-Mg-Si 系アルミニウム合金 A6061-T6 と Al-Cu-Mg 系合金 A2024-T3 圧延材を使用した. 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. 表裏面のツール走査痕はフライス加工によって除去し, エメリ研磨とバフ研磨により側面を含め鏡面に仕上げた. 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

設け、平板曲げ疲労試験機を使用して応力振幅 120 MPa, 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/mm<sup>2</sup> の照射パルス密度で処理した後に裏面を 27 pulse/mm<sup>2</sup> で処理し, 試験片の反りを抑えた[9]。

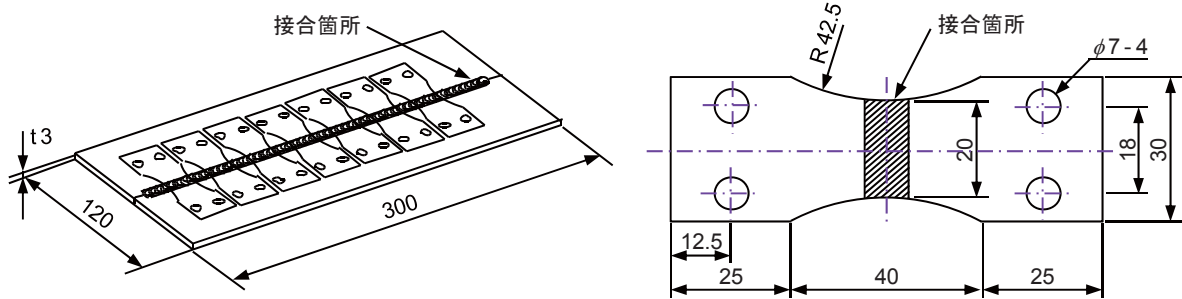


図 1. 疲労試験片の採取位置(左)および疲労試験片の寸法・形状(右)

## 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[17-24]。

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  $\mu\text{m}$ , 視野は水平方向 11.2 mm, 垂直方向 4.9 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 右に模擬的に示すようにき裂方向に 2 mm ずつ視野をずらした測定を 9 回繰り返して, き裂全体を観察した。スキャン方式は 2013B と同じく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, アクリルパイプのみの投影データは連続回転スキャンの前後で取得した。

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。

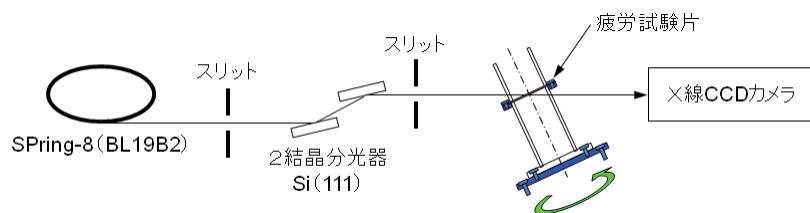


図 2. ラミノグラフィ測定レイアウト(BL19B2 第 1 ハッチ)

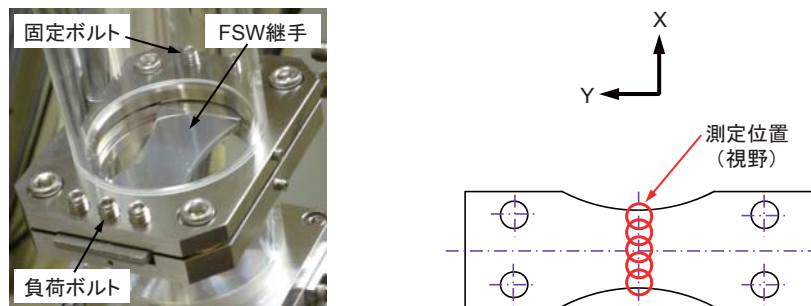


図 3. 試験片ホルダー(左)と試験片の測定位置(右)

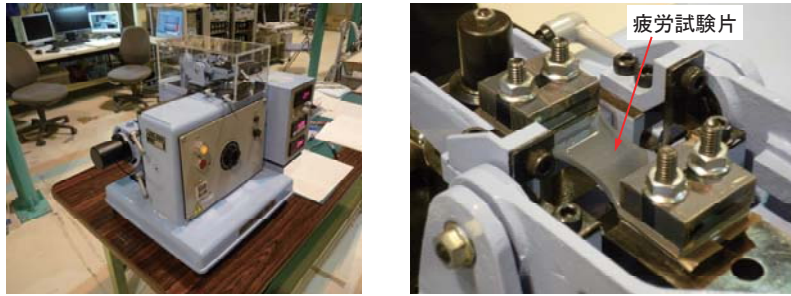


図4. 曲げ疲労試験機 PBF-30X(左)と試験片の取付け状況(右)

**実験結果：**

ラミノグラフィにより得られた試験片ほぼ中央の再構成スライス像を図5に示す。左から、試験片のほぼ表面(rec0250)、表面から0.28mm(rec0300)、0.56mm(rec0350)、0.84mm(rec0400)深さに対応する。疲労負荷回数は上段が $2.5 \times 10^5$ 、下段が $4.5 \times 10^5$  cycleである。再構成像の左側が密度の大きいA2024(Al-Cu-Mg系)であり、右側が密度のより小さいA6061(Al-Mg-Si系)である。

試験片表面には規則的なレーザー走査痕が、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0.3mm)が確認できる。試験片はA6061側を固定ボルトによりホルダーの片側に固定し、A2024側で負荷ボルトによる曲げ荷重を付与した。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、表面の再構成スライス像の左側は試験片表面より僅かに外側に対応し、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。表面についてはレーザー走査痕によりき裂の確認が容易ではないが、試験片内部の再構成スライス像について上段( $2.5 \times 10^5$  cycle)と下段( $4.5 \times 10^5$  cycle)を比較すると、疲労負荷により明らかにき裂が進展していることがわかる。

表面については、A2024とA6061の混合領域(中央)とA2024(左側)との境界が明瞭でないが、内部ではその境界が明瞭に現れている。また、0.56mm(rec0350)および0.84mm(rec0400)深さでは、攪拌接合時の塑性流動によって生じた模様が観察され、A2024の組織がA6061側で帯状に偏在している。

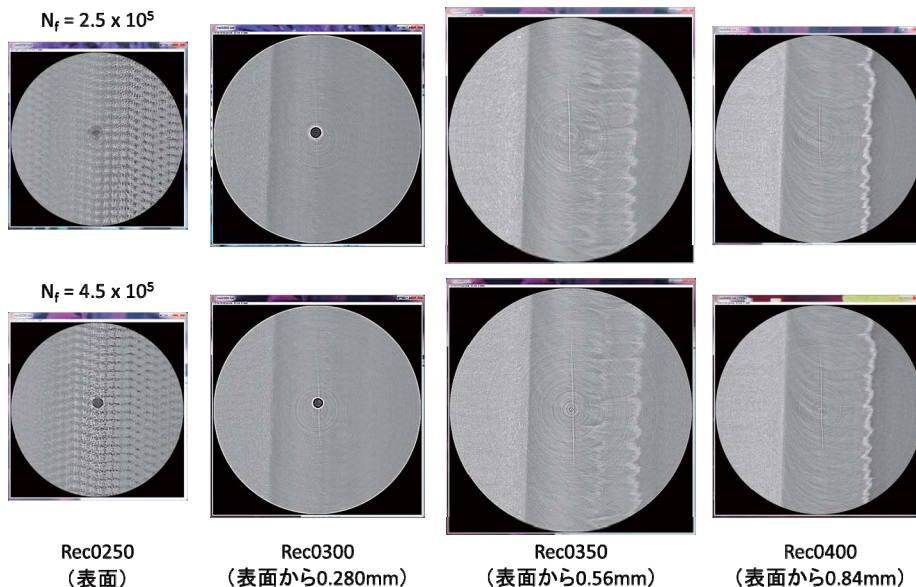


図5. レーザーピーニング処理したFSW継手の疲労き裂像(A6061とA2024の異材継手)

**結論および今後の課題：**

アルミニウム合金A6061-T6とA2024-T3の摩擦攪拌接合(FSW)継手試験片にレーザーピーニングを施し、曲げ疲労負荷を与えると同時に、ラミノグラフィによりき裂の進展を非破壊で観察した。疲労き裂の三次元像は作成中であるが、レーザーピーニングの有無で再構成スライス像を比

較すると、レーザーピーニングによりき裂の進展が抑制されていることが明らかである。また今回、接合(FSW)時の継手内部における材料の流動と思われる模様も観察されたことから、き裂の発生および進展、あるいは機械的な特性との関係を調べることにより、本研究が FSW プロセスの改善や最適化にも寄与すると考えられる。

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処理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、組織流動との関係など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予定である。

#### 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 3<sup>rd</sup> 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. 4<sup>th</sup> 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、SPring-8 利用研究成果集(査読中), 2012B1740.
- [16] 佐野雄二 他、平成 25 年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2013B), 2013B1863.
- [17] 政木清孝 他、日本機械学会 2012 年度年次大会, G030051, (2012).
- [18] 政木清孝 他、日本材料学会第 31 回疲労シンポジウム, (2012).
- [19] 政木清孝 他、日本機械学会 2013 年度年次大会, (2013).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] Y. Sano et al., *Proc. 1<sup>st</sup> Conf. on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment*, (2014).
- [23] 政木清孝 他、日本材料学会第 63 期日本材料学会学術講演会, (2014).
- [24] 政木清孝 他、日本材料学会第 32 回疲労シンポジウム, (2014).