

2012B1740

BL19B2

摩擦攪拌接合継手における疲労き裂進展挙動の  
ラミノグラフィによる非破壊観察  
Nondestructive Observation of Fatigue Crack Propagation Behavior  
in Friction Stir Welded Joints by Laminography

佐野 雄二<sup>a</sup>, 政木 清孝<sup>b</sup>, 西銘 一貴<sup>b</sup>, 梶原 堅太郎<sup>c</sup>, 佐野 智一<sup>d</sup>,  
柏原 亮太<sup>d</sup>, 松山 法央<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>, Kazuki Nishime<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>, Tomokazu Sano<sup>d</sup>,  
Ryota Kashiwabara<sup>d</sup>, Norihiro Matsuyama<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

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。更に、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、その様子を非破壊で観察した。FSW の使用が期待される大型の板状構造物の場合には CT の適用は困難を伴うが、ラミノグラフィの適用は原理的に可能であり、微細な疲労き裂やその進展を非破壊で観察することができた。また、FSW 組織に特有と思われるき裂の屈曲などの現象を確認した。

キーワード： 摩擦攪拌接合, アルミニウム合金, 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2,3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。

本研究は、放射光を光源としたラミノグラフィにより FSW 継手に生じた微細な疲労き裂を非破壊で可視化し、その進展挙動を明らかにすることを目的としている。2011A 期および 2011B 期の実験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<sup>[5,6]</sup>。2012A 期の実験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<sup>[7]</sup>。今回は、前回と同一の試験片を使用して破断寸前まで疲労試験を継続し、一連のき裂進展試験を完了した。

#### 実験方法：

##### 1. 試験片の作製

供試材には厚さ 3 mm の Al-Mg-Si 系展伸用アルミニウム合金 A6061-T6 圧延材を使用した<sup>[8-14]</sup>。供試材の化学組成を表 1 に示す。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  $\phi 10$  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。A6061-T6 母材と FSW 継手の機械的性質を表 2 に示す。

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。試験片表面の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。FSW 接合部の中心(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 の条件で試験片に  $2 \times 10^5$  回の疲労負荷を与え、長さ約 3.2 mm の疲労予き裂を付与した。

表 1. 供試材(A6061-T6)の化学組成 [重量%]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.65	0.2	0.30	0.06	1.04	0.13	0.04	0.02	Bal.

表 2. A6061-T6 母材および FSW 継手の機械的性質

	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	伸び [%]
母材	336	318	15.7
FSW 継手	195	-	4.8

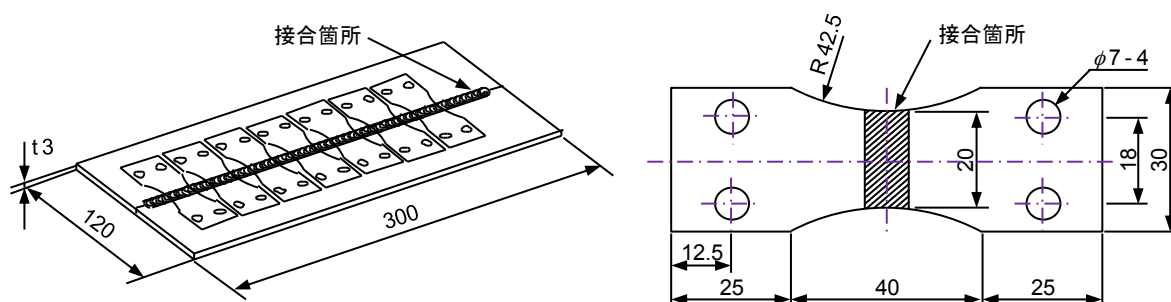


図 1. 疲労試験片の採取位置(左)および疲労試験片の寸法・形状(右)

## 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 SPring-8 の産業利用 I ビームライン BL19B2 の第 1 実験ハッチで行った。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。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 とした。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 4.3 mm である。

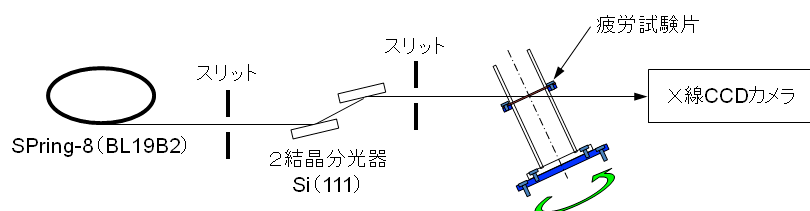


図 2. ラミノグラフィ測定レイアウト(BL19B2 第 1 実験ハッチ)

疲労き裂は通常では閉口しているため、図 3 に示す試験片ホルダーにより試験片に曲げ荷重を与え、き裂をわずかに開口させた<sup>[11-14]</sup>。投影データは 0.5 度刻みで全周にわたって取得した。10 度毎にステップ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 線の減衰を補正した。

微細な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、き裂が進展すると単一の視野ではき裂全体を捉えることができない。そこで、図 3 右に示すように分割した測定を繰り返し、再構成後の画像を繋ぎ合わせるにより、き裂の全体像を作成した。

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(テークスグループ社製)を仮設し、試験片に応力振幅 120 MPa の曲げ疲労荷重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、疲労き裂の進展を非破壊で観察した。疲労荷重により試験片に作用する応力は図 3 右の Y 方向であり、均質な組織の場合にはき裂は X 方向に成長することが知られている。

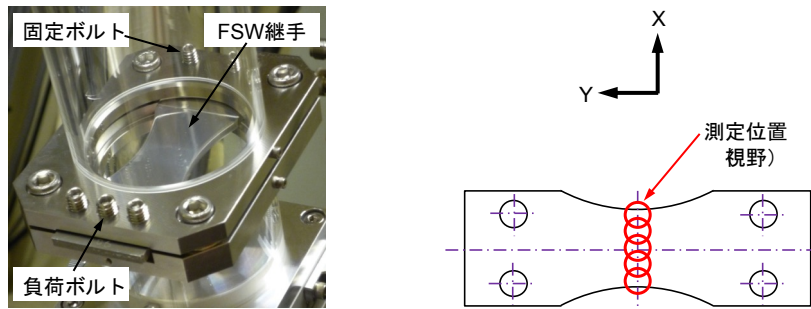


図3. 試験片ホルダー(左)と試験片の測定位置(右)

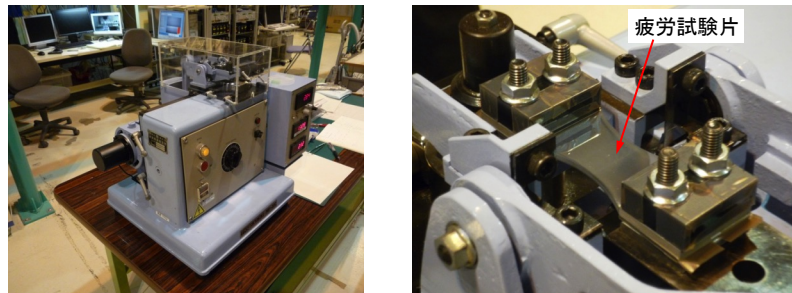


図4. 平板曲げ疲労試験機 PBF-30X(左)と試験片の取付け状況(右)

#### 実験結果：

ラミノグラフィにより得られた試験片表面のき裂像を図5に示す。(b)~(g)は複数の視野の再構成像を繋ぎ合わせることで作成した。疲労負荷回数は左から(a) $2.00 \times 10^5$ 回, (b) $2.50 \times 10^5$ 回, (c) $2.75 \times 10^5$ 回, (d) $3.00 \times 10^5$ 回, (e) $3.25 \times 10^5$ 回, (f) $3.37 \times 10^5$ 回, (g) $3.42 \times 10^5$ 回であり、(a)~(c)が2012A期の結果、(d)~(g)が今回の結果である。各々の画像から算出したき裂長さは光学顕微鏡で観察したき裂の長さとはほぼ一致した。従って、ラミノグラフィによる画像再構成および複数視野の繋ぎ合わせは適切に行われたと考えられる<sup>[5,6]</sup>。なお、各画像の中心付近の穴は初期き裂を導入するためのドリル穴(直径0.3 mm)である。

(a)から(d)のき裂進展初期においては、疲労負荷を与えるに従ってき裂は試験片表面をほぼ円弧状に進展していることがわかる。その曲率半径は7 mm程度であり、FSW ツール(半径5 mm)の回転による材料の塑性流動の範囲に関連すると思われる。(e)以降はき裂が大きく屈曲しながら進展し、(f)では試験片の端面から進展してきたき裂と合体している。

#### 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。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、FSW 継手の疲労き裂進展の様子を非破壊で観察した。FSW 継手では、疲労き裂の進展はその組織に依存して複雑な挙動を示すと言われている。2012A 期の実験では緩やかな円弧状のき裂進展が観測され、均質な母材で一般的な直線状のき裂進展とは異なる様子が観察されていた。今回は2012A 期と同一の試験片に対して破断寸前まで試験を継続した。その結果、複雑な屈曲を示す特異なき裂進展の様子が観察され、本実験の目的を達成した。

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するとともに、組織とき裂進展との関係の把握、複数の試験片に対する再現性の確認などを行い、FSW 継手におけるき裂進展のメカニズムを検討する計画である。また、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も検討を行う。

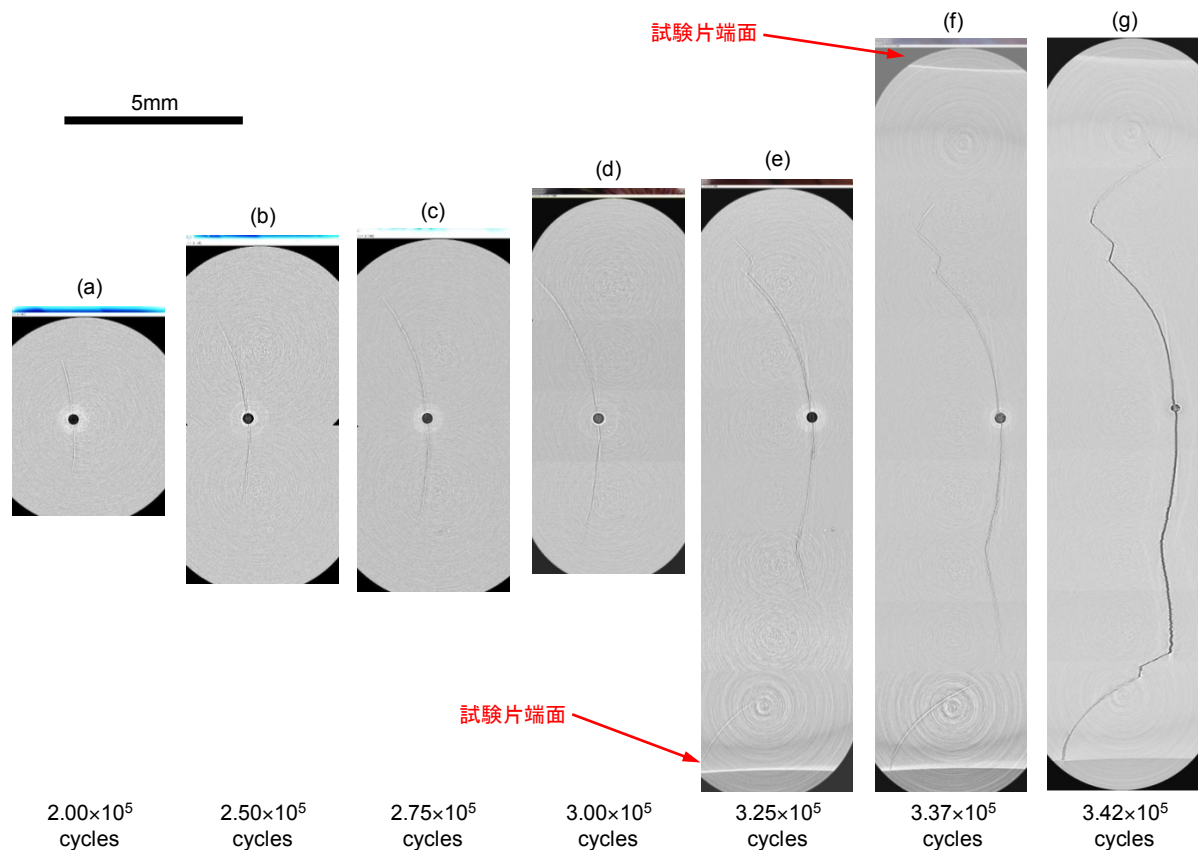


図 5. FSW 継手試験片表面の再構成像

参考文献：

- [1] R.S. Mishra and Z.Y. Ma: Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng. R*, **50**, 1-78 (2005).
- [2] 森久史, 他: 鉄道車両への摩擦攪拌接合の適用の現状, *軽金属*, **57**, 506-510 (2007).
- [3] 武久浩之: 航空機用アルミニウム合金の FSW 技術, *軽金属*, **56**, 178-183 (2006).
- [4] O. Hatamleh, et al.: *Mater. Sci. Eng. A*, **519**, 61-69 (2009).
- [5] 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.
- [6] 佐野雄二, 他: 平成 23 年度 重点産業利用課題成果報告書 (2011B), 2011B1861.
- [7] 佐野雄二, 他: 平成 24 年度 産業利用課題成果報告書 (2012A), 2012A1274.
- [8] 山城研二, 他: 日本機械学会 2010 年度年次大会, S305-1-5, 2010 年 9 月.
- [9] 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>
- [10] Y. Sano et al.: *Mater. Des.*, **36**, 809-814 (2012).
- [11] 政木清孝, 他: 日本機械学会 M&M2011 カンファレンス, OS0510, 2011 年 7 月.
- [12] 政木清孝, 他: 日本機械学会 2011 年度年次大会, G030131, 2011 年 9 月.
- [13] 政木清孝, 他: 日本機械学会 2012 年度年次大会, G030051, 2012 年 9 月.
- [14] 政木清孝, 他: 日本材料学会第 31 回疲労シンポジウム, 2012 年 11 月.

©JASRI

(Received: June 10, 2013; Early edition: April 28, 2015; Accepted: June 29, 2015;  
Published: July 21, 2015)