

アルミニウム合金摩擦攪拌接合継手に生じた
疲労き裂のラミノグラフィによる非破壊観察
**Nondestructive Observation of Fatigue Cracks in Friction
Stir Welded Joints of Aluminum Alloy by Laminography**

佐野 雄二^a, 政木 清孝^b, 梶原 堅太郎^c, 大島 朋美^a, Omar Hatamleh^d, 足立 隆史^e
Yuji Sano^a, Kiyotaka Masaki^b, Kentaro Kajiwara^c, Tomomi Oshima^a,
Omar Hatamleh^d, Takafumi Adachi^e

^a(株)東芝, ^b沖縄工業高等専門学校, ^c(財)高輝度光科学研究センター,
^dNASA - Johnson Space Center, ^e富士重工業(株)
^aToshiba Corporation, ^bOkinawa National College of Technology, ^cJASRI,
^dNASA - Johnson Space Center, ^eFuji Heavy Industries Ltd.

疲労き裂を導入した摩擦攪拌接合(FSW)継手にラミノグラフィを適用し、き裂の全体像を再構成した。光学顕微鏡による観察結果と比較することにより、き裂の表面形状・寸法が正しく再現されていることを確認した。また、深さの異なる一連のスライス像により、内部のき裂形状を確認した。CTの適用が困難な平板状のFSW継手に対しても、ラミノグラフィにより疲労き裂の3次元的な画像化が可能と考えられる。

キーワード： 摩擦攪拌接合, アルミニウム合金, 疲労き裂, 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、継手効率が高く接合後の変形が小さい。このため、柔らかく攪拌が容易なアルミニウム合金製の長尺薄肉構造物(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挙動を示すことが破壊試験により知られている[4]。しかしながら、破壊試験では疲労き裂の進展の様子を連続的に確認することは不可能である。

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。前回(2011A1685)、疲労き裂の画像化が原理的に可能であることを確認した[5]。2011Bでは、検出器(CCD)露光時間の最適化による画質の改善、部分的なスライス像の繋ぎ合わせによる疲労き裂全体の再現、深さの異なる一連のスライス像による継手内部のき裂形状の確認を行った。

実験方法：

1. 試験片の作製

供試材には2011Aと同様に厚さ3mm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[6-8]。化学組成を表1に示す。FSW継手の作製には汎用フライス盤とM4の逆ネジが切られた長さ3mmのピンを有するφ10mmのツールを用いた。接合条件はツール回転数1400rpm, 前進角3度, 送り速度41mm/minとした。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。

き裂は片持ち平板曲げ疲労負荷により導入した。き裂の発生位置を制御するため、試験片中央の接合中心および摩擦攪拌組織と母材との境界に直径0.3mm, 深さ0.3mmのドリル穴を設けた。疲労負荷は室温・大気中で完全両振り(応力比 $R = -1$)で与え、その条件は応力振幅100MPa, 負荷繰り返し速度22Hzとした。

表 1. 供試材(6061-T6)化学組成 [重量%]

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

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

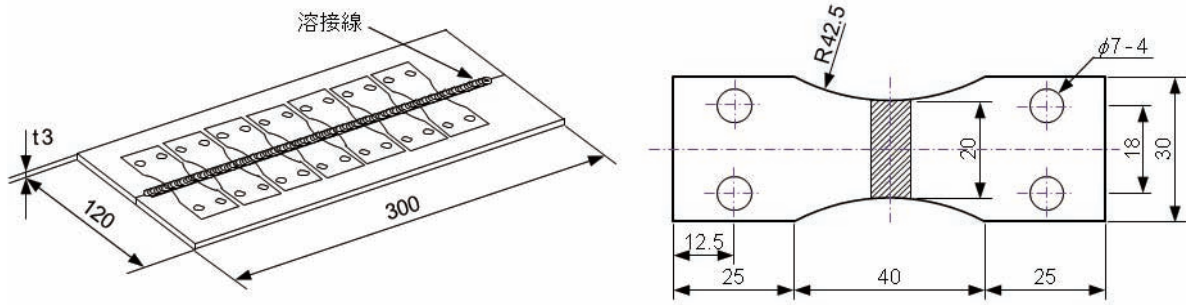


図 1. 疲労試験片の採取位置(左)および疲労試験片の寸法・形状(右)

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、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傾げることを除けば、CT と同一のレイアウトである。X 線エネルギーは 28keV、試験片と X 線カメラの距離は 0.8m、試験片回転軸の傾きは 30 度とした。検出器の実効的なピクセルサイズは 11.4 μ m、視野は水平方向で約 11.3mm、垂直方向で約 4.6mm であった。

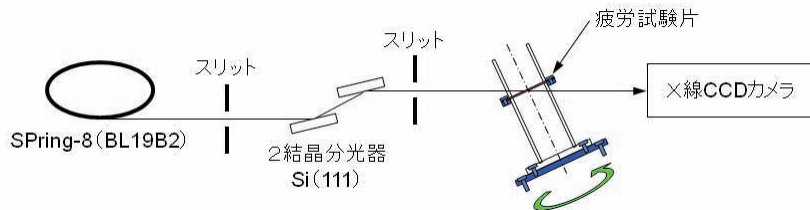


図 2. ラミノグラフィ測定レイアウト(BL19B2 第 1 ハッチ)

疲労き裂は通常では閉口しているため、吸収コントラスト法による観察は困難である[9-11]。き裂をわずかに開口させるために図 3 に示す試験片ホルダーを作製し、負荷ボルトにより試験片に曲げ荷重を与えた。また、試験片ホルダーは、回転により検出器の視野を妨げることがない形状となっている。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 線の減衰を補正した。

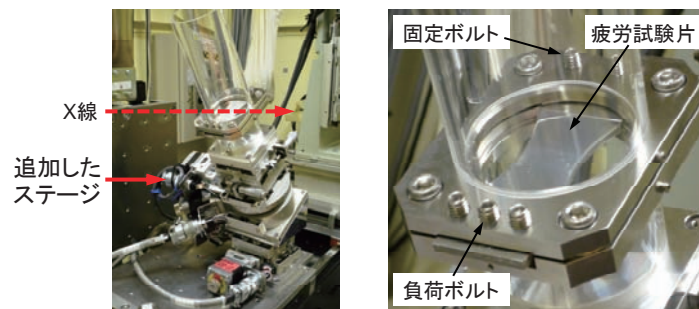


図 3. 試験片ホルダー

2011B では、サンプル像(試験片+アクリルパイプの投影データ)とダイレクト像(アクリルパイプの投影データ)の露光時間を独立に設定できるように、ソフトウェアを改良した。それにより、ダイレクト像の強度で制限されていたサンプル像の露光時間を 60ms から 250ms に延長し、より鮮明な再構成スライス像を得ることを試みた。また、新たにリニアステージを導入して試験片の水平方向の移動を自動化し、視野が限られた複数の再構成スライス像を正確に繋ぎ合わせることで、疲労き裂全体の再現を試みた。

実験結果：

ラミノグラフィにより得られた試験片表面の再構成スライス像を図 4 に示す。左は 2011A の結果であり、サンプル像およびダイレクト像ともに露光時間は 60ms である。右はサンプル像の露光時間を 250ms に延長した今回の結果である。き裂や矢印を付した欠陥部分がより鮮明に表現されている。

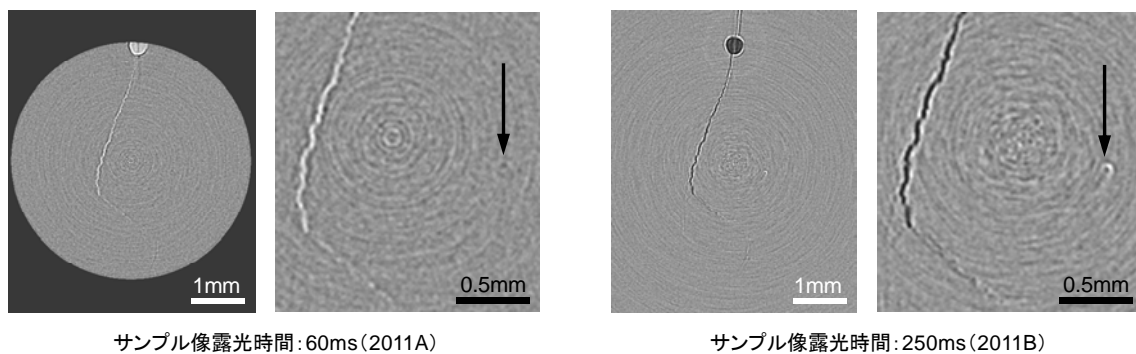


図 4. 露光時間の最適化による画質の改善

再構成した疲労き裂の全体像と、光学顕微鏡による観察結果を比較して図 5 に示す。再構成像は、ラミノグラフィで得られた試験片表面の複数のスライス像を繋ぎ合わせることで求めた。両者の観察結果は良く一致し、長さ約 8mm に及ぶ疲労き裂の表面形状および寸法がラミノグラフィにより正しく再現されることがわかった。

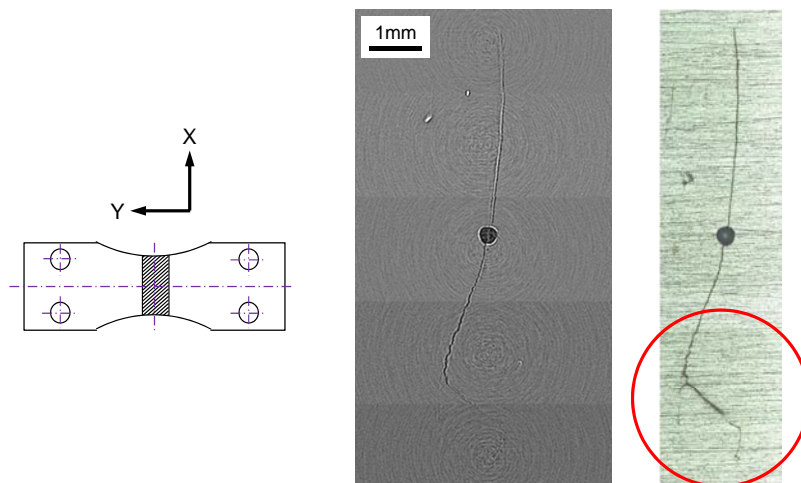


図 5. 試験片表面の再構成像(中央)と顕微鏡観察の結果(右)

この疲労き裂は、試験片中央の摩擦攪拌接合部の中心に設けたドリル穴から発生したものである。疲労負荷により試験片に作用する応力は図中の Y 方向であり、均一な組織の場合き裂は X 方向に成長する。しかしながら図 5 の円で囲った部分では、き裂が複雑に屈曲しており、摩擦攪拌組織の影響によるものと思われる。

エレベーション(試験片表面からの深さ)を変えたときの再構成スライス像の変化を図 6 に示す。試験片内部では表面ほどき裂は成長しておらず、0.684mm 以上の深さ(図 6 下段)ではき裂の屈曲は始まっていないように思われる。

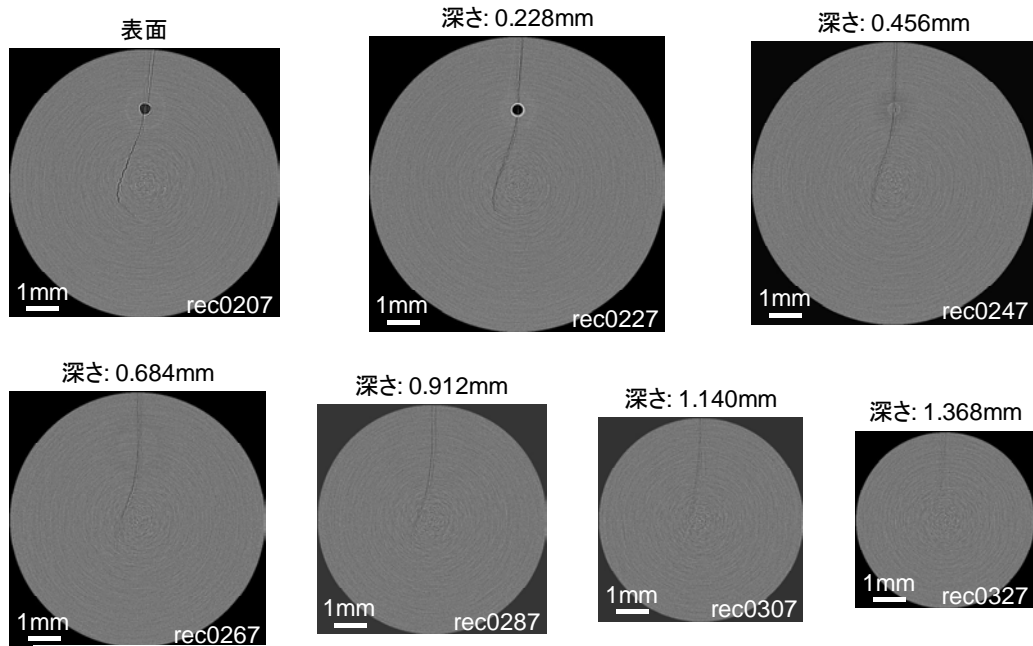


図 6. 各深さにおける疲労き裂の再構成スライス像

結論および今後の課題：

検出器露光時間を最適化することにより，再構成スライス像の画質を改善した．また，複数のスライス像を繋ぎ合わせるにより，試験片表面の疲労き裂全体を再構成した．光学顕微鏡によるき裂の観察結果と比較した結果，疲労き裂の表面形状および寸法が正しく再現されていることを確認した．さらに，各エレベーションにおけるスライス像を比較することにより，試験片内部の疲労き裂の形状を確認した．

ラミノグラフィを用いれば，CT の適用が困難な平板状の試験片における疲労き裂の 3 次元的な進展評価が可能と考えられる．特に，疲労き裂の進展が 3 元的に複雑な挙動を示す FSW 継手に関しては，ラミノグラフィが非常に有力なき裂の観察手段となることがわかった．今後はビームラインへの疲労試験機の導入を図り，き裂進展の様子を非破壊で観察することを試みる．

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.: Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints at elevated and cryogenic temperatures, Mater. Sci. Eng. A, **519**, 61-69 (2009).
- [5] 佐野雄二, 他: 摩擦攪拌接合したアルミニウム合金板材に発生した疲労き裂の非破壊観察, 平成 23 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 (2011A1685).
- [6] 山城研二, 政木清孝, 屋嘉部求, 具志孝, 佐野雄二: A6061 摩擦攪拌接合継手部材の LP 処理による疲労特性改善, 日本機械学会 2010 年度年次大会, S305-1-5.
- [7] K. Yamashiro, K. Masaki, T. Gushi and Y. Sano: Effects of laser peening on plane bending fatigue properties of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy, 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] Y. Sano, K. Masaki, T. Gushi and T. Sano: Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating, Mater. Des., **36**, 809-814 (2012).
- [9] 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎: 放射光を使用したマイクロ CT によるアルミニウム合金疲労き裂の可視化, 材料, **57**, 395-400 (2008).
- [10] 政木清孝, 桑江文幸, 佐野雄二, 梶原堅太郎: 放射光 μ CT による疲労き裂観察結果に及ぼす引張り負荷の影響, 日本機械学会 M&M2011 カンファレンス, OS0510.
- [11] 政木清孝, 桑江文幸, 佐野雄二, 梶原堅太郎: 放射光 CT ならびに産業用 X 線 CT による疲労き裂観察とその比較, 日本機械学会 2011 年度年次大会, G030131.