

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
Nondestructive Observation of Fatigue Cracks in Friction Stir Welded
Plates of Aluminum Alloy

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.

アルミニウム合金の摩擦攪拌接合(FSW)継手試験片に生じた疲労き裂にラミノグラフィを適用し、画像再構成により得られた表面近傍のスライス像と光学顕微鏡による観察結果を比較した。その結果、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できることを確認した。通常の断層撮影(CT)の適用が困難な平板状のFSW継手に対しても、ラミノグラフィの適用により疲労き裂の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)は従来の溶接とは異なり、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。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、柔らかくて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、ロケットの胴など）への適用が広がっている。

しかしながら、接合部は攪拌の状況を反映した特異な組織を示すため、疲労き裂の発生や進展が組織に影響され、従来の溶接継手とは全く異なる挙動を示すことが知られている。このため、これまで蓄積してきたデータベースを適用することが困難であり、FSWの実構造物への適用にあたっては疲労強度を確認するための膨大な試験が必要とされている。また、き裂の進展特性が不明なため、実運用後も入念なき裂検査が必要とされ、多大な労力を費やす結果となっている。

本研究は、高輝度で平行度の高いSPRIGN-8の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可視化し、その進展特性を解明することを目的としている。また更には、FSWを適用した構造物の実運用時の信頼性を確保するとともに、FSW継手を採用する場合の設計基準の確立を図ろうとするものである。

実験方法：

1. 試験片の作製

供試材には厚さ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[1]。化学成分を表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のツールを使用した。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。母材および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採取した。疲労試験片の採取位置および疲労試験片の寸法・形状を図1に示す。FSW接合部分にはツールを走査したツール痕が残り、そのツール痕のエッジ部分が応力集中源となって、疲労破壊を生じることが多い。ここでは、FSW接合によって生じる特有の組織が疲労き裂進展に及ぼす影響を評価するため、試験片表面のツール走

査痕をフライス加工によって除去し、更に、試験片表面と側面をエメリ研磨およびバフ研磨により鏡面に仕上げた。

疲労き裂の導入は、試験片中央（接合中心）と摩擦攪拌組織と母材との境界部の2箇所ドリル穴（0.3mmの貫通穴）を付与し、応力比 $R = -1$ 、室温・大気中、負荷繰り返し速度 22Hz、負荷応力振幅 100MPa の条件で片持ち平板曲げ疲労負荷を与えることにより行った。

表 1 供試材(A6061-T6)の化学組成 [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 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

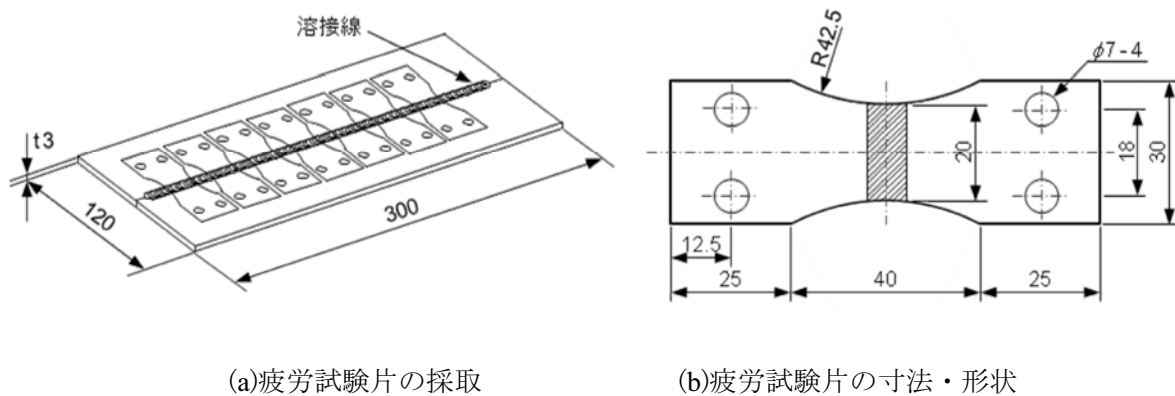


図 1 疲労試験片の作成

2. き裂の可視化試験

ラミノグラフィは 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けることを除けば、CT と同一の測定レイアウトである[2]。X 線エネルギーは 28keV、試験片と X 線 CCD カメラ蛍光面の距離は 800mm とし、全周にわたって 0.5 度ごとに投影データを取得した。

光学系の倍率を含めた実効的なピクセルサイズは $2.85\mu\text{m}$ であるが、データ量が膨大となるため、 4×4 のビニング(Binning)を行ってデータ量を削減した。ビニング後のデータ積算時間は 60ms/frame とした。

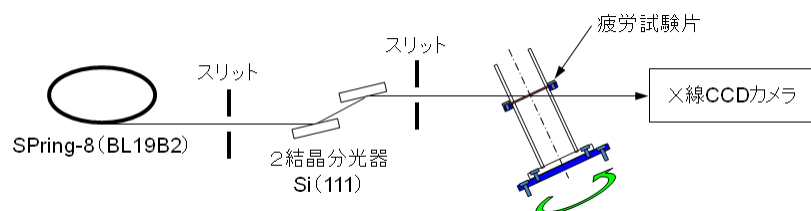


図 2 ラミノグラフィ測定レイアウト (BL19B2 第 1 ハッチ)

疲労試験片はラミノグラフィ用に試作した試験片ホルダー(図 3)に固定した。疲労き裂は通常では閉口しているために、吸収コントラスト法では観察が難しい[2]。そこで、より鮮明な像を得る

ためのき裂の開口方法を検討し、図中の負荷ボルトを調整することで試験片に曲げ荷重を付与することとした。

試験片回転軸の鉛直からの傾斜角は、試験片ホルダーの開口などを勘案して 30 度とした。また、試験片ホルダーの亚克力パイプによる X 線の減衰を補正するため、試験片が 10 度回転するごとにステージを上下させて亚克力のみの透過データを取得した。

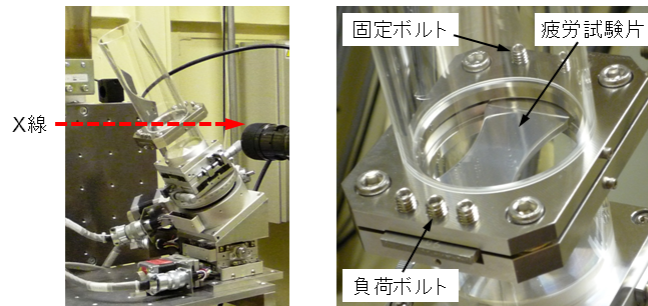


図 3 試験片ホルダー

試験結果：

ラミノグラフィによる疲労き裂の再構成スライス像と、光学顕微鏡による表面のき裂観察結果を図 4 に比較して示す。ラミノグラフィの再構成位置は試験片の最表面である。両者の観察結果は良く一致し、き裂の屈曲も再現されている。

き裂は、試験片中央の摩擦攪拌接合の中心に設けたドリル穴から発生したものである。試験片に作用する負荷応力は図中の Y 方向であり、通常の場合き裂は図中の X 方向に成長する。しかしながら、FSW 接合部では摩擦攪拌組織の影響によりき裂が大きく屈曲していることがわかる。また、円で囲った部分では表面き裂が途中で分断されており、この部分では試験片の内部でき裂が複雑に進展していることが推測される。このように FSW 接合部では、試験片表面だけでなく内部においても複雑なき裂成長挙動を示すことが知られている。

なお、同一の試験片を用いて通常の CT レイアウトによるき裂観察も試みたが、試験片板幅が 20mm と大きいため、断層像を再構成できる条件を見いだすことはできなかった。

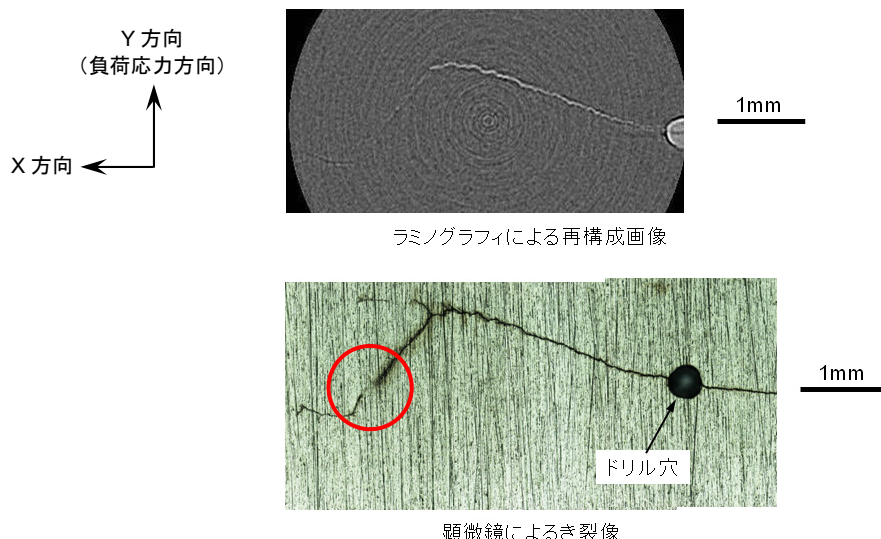


図 4 ラミノグラフィによる再構成像と顕微鏡観察結果との比較

今後の課題：

ラミノグラフィによる試験片表面近傍のスライス像と光学顕微鏡観察の結果を比較した。その結果、微細な疲労き裂の形状および寸法がラミノグラフィにより正しく再現できることを確認し

た．直接的な比較は試験片の表面に限られるが，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 次元的な画像化が原理的に可能であることを確認した．特に，疲労き裂の成長挙動が 3 次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法となりうることを示した．

今回(2011A)の測定では，試験片ホルダーの制約により視野の大きさが十分ではなく，疲労き裂の 3 次元像全体を把握することはできなかった．今後は，試験片ホルダーに改良を加えて視野の拡大を図るとともに，解像度の確認やデータ収集時間の最適化を行い，再構成画像の高品位化を図る予定である．

参考文献：

- [1] 山城研二, 政木清孝, 屋嘉部求, 具志孝, 佐野雄二, 日本機械学会 2010 年度年次大会, S305-1-5.
- [2] 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎, 材料, **57**, 395 (2008).