

ラミノグラフィによる産業用構造材料接合部の疲労き裂の評価

佐野雄二

東芝 電力・社会システム技術開発センター 〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8
(現所属：科学技術振興機構 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町)

政木清孝

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 〒905-2192 沖縄県名護市辺野古905

梶原堅太郎

高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding; FSW) は長尺で薄肉の金属材料の接合方法として注目されており、航空機や車両などへの適用が広がっている。疲労特性は構造物の健全性において最も重要な評価項目の一つであり、FSW 接合部の疲労特性を評価するためには複雑な攪拌組織の中を成長する疲労き裂の三次元的な挙動を把握する必要がある。我々は、SPring-8 を光源としたラミノグラフィを代表的な構造材料であるアルミニウム合金の FSW 接合部に適用し、疲労き裂の可視化を試みた。その結果、攪拌組織中の微細な疲労き裂の観察が可能であり、組織に依存した特徴あるき裂の成長挙動を示すことが明らかとなったので、その概要を紹介する。

1. はじめに

疲労き裂や応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) は構造物の破壊の主要因となることが多く、き裂の成長挙動は構造物を安全に設計・建設・維持するうえで必要不可欠な情報である。このため、き裂の三次元的な形状を把握することが重要であるが、疲労き裂や SCC はその開口幅が小さいため、目視ではき裂の有無すら判別できない場合がある。また通常は、材料内部のき裂の形状を非破壊でとらえることは困難である。このため、多数の試験片に様々な疲労負荷を与えてき裂を成長させ、試験片を急速に破断させたあとの破面の様相から破断前のき裂の三次元的な形状を推定する、あるいは疲労試験中に変動荷重を与え、破面上の痕跡 (ビーチマーク) をもとにき裂の形状を推定する、といった方法が採られている。これらの方法は金属材料に対して広く用いられており、材料が均質で等方的な場合にはき裂は半楕円形状を保ちながら主応力に垂直な平面内を連続的に成長していくため、有効な方法と考えられる。一方、非均質で異方性が強い材料の場合には、き裂発生位置や結晶方位によってき裂の成長の様子が異なり、複雑な三次元形状となることがある。このため、何らかの非破壊的な方法で個々のき裂に対して一連のデータを取得し、その成長を評価する必要がある。

近年注目されている金属材料の接合技術のひとつに、摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding; FSW) がある^{1,2)}。FSW は棒状のツールを材料の接合部に押し当てて回転さ

せることによって材料を加熱・軟化させ、ツールの回転によって組織を攪拌して接合する技術である。接合時の温度を材料の熔融温度以下に抑えることができるため、機械的強度の低下や接合後の変形が小さいという特徴があり、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) への適用が進んでいる。しかしながら、FSW 接合部は攪拌による異方性の高い塑性流動組織 (オニオンリングなどと呼ばれる) となり、疲労き裂の発生やその成長は組織に強く影響されるため、従来の材料とは全く異なる挙動を示すことが知られている³⁾。従って、FSW 接合部に従来の知見を適用することは困難である。このため、何らかの非破壊的な方法で FSW 接合部を三次元的に観察することができれば、疲労き裂の発生とその成長挙動の把握、さらには FSW 接合部および構造物の信頼性向上のための有用な情報となる。

2. ラミノグラフィ

疲労き裂の発生および成長挙動を非破壊で観察するため、我々は SPring-8 において CT (Computed Tomography) およびラミノグラフィ (Laminography) の適用を進めてきた⁴⁻⁹⁾。放射光を光源とすることにより、①単色 X 線の使用が可能となり、ビームハードニングに起因するアーチファクト (虚像) が発生しない。②高い平行度の X 線による屈折コントラストが利用できるため、

エッジ（形状が不連続に変化する部分）が強調され、き裂の観察が容易となる。といった利点が生じる¹⁰⁾。

CTに関わる実験では、丸棒試験片に導入した疲労き裂の三次元非破壊観察を行うとともに、ビームライン脇に小型の疲労試験機を仮設してCTと疲労負荷を交互に繰返すことにより、き裂の成長や複数のき裂の合体の観察、レーザーピーニング¹¹⁻¹³⁾などの表面処理材におけるき裂成長の評価などにおいて、有益な知見を得てきた。一方平板試験片では、板の厚さ方向と幅方向でX線透過距離が極端に異なるため、X線検出器のダイナミックレンジ不足などの問題が生じ、CTの適用は難しい。ラミノグラフィは、このような板状の試験片を観察する手段として優れ、電子基板などの非破壊検査に用いられている¹⁴⁾。また、放射光を光源とすることにより、微細な三次元構造を高い精度で再構成できることが知られている¹⁵⁾。

ラミノグラフィは、CTと同様に試験片を回転させながら二次元の透過像を多数測定し、バックプロジェクションにより断層像を再構成する技術である。ラミノグラフィとCTでは試験片まわりの配置が異なり、CTでは試験片の回転軸がX線の光軸と直交するのに対し、ラミノグラフィでは回転軸を傾けて配置する（Fig. 1）。このような配置とすることにより、試験片の回転によらずX線透過距離がほぼ一定の値となるため、前述の問題（ダイナミックレンジ不足など）を回避することができる。

ラミノグラフィで画像再構成が可能な領域をFig. 2に示す。コマ状の領域の再構成が可能であり、試験片に平行なスライス像の大きさは表面からの距離によって変化する。このため、観察したい領域が大きなスライス像に含まれる

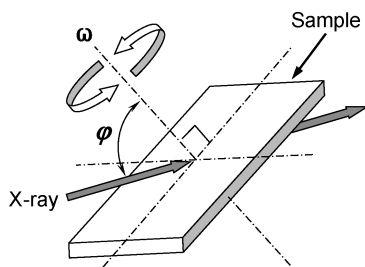


Fig. 1 Setup of laminographic experiment with synchrotron radiation for a plate sample.

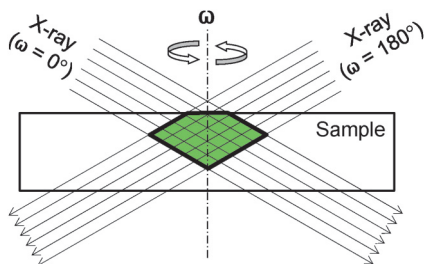


Fig. 2 (Color online) Relation among sample, x-ray and reconstructed area in laminography at synchrotron facilities.

よう、試験片の位置（高さ）を調整することが望ましい。

3. 実験方法

3.1 供試材および試験片

供試材には市販の厚さ3mmのAl-Mg-Si系アルミニウム合金A6061-T6とAl-Cu-Mg系アルミニウム合金A2024-T351を使用した。Fig. 3に示すように2枚の供試材を突合せ、汎用のフライス盤でツールを押し当てながら回転させることにより接合を行った¹¹⁾。ツールの直径は10mmとし、先端にM4の逆ネジが切られた長さ3mmのピンを備えたものを使用した。供試材の組合せは、共材（A6061とA6061）と異材（A6061とA2024）の二通りとした。接合条件はツール回転数1400rpm、前進角（ツールの傾斜角）3度、送り速度41mm/minである。

疲労試験片は、ワイヤ放電加工によりFig. 4に示すようなパターンで採取した。試験片形状および寸法をFig. 5に示す。接合したままの状態ではFSW接合部にツール痕が残る、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。そこで、ツール痕をフライス加工によって除去し、さらに試験片の表面（表と裏）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。また、試験片中央の接合中心に直径0.3mm、深さ0.3mmの微小なドリル穴を設け、疲労き裂がFSW接合部で発生するよう配慮した。

初期き裂は、平面曲げ疲労試験機（Fig. 6）を使用して試験片に繰返し負荷を与えることにより、導入した。疲労

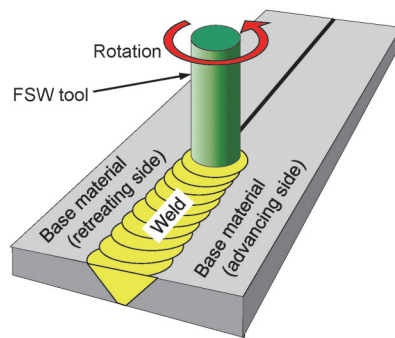


Fig. 3 (Color online) Schematic of friction stir welding (FSW).

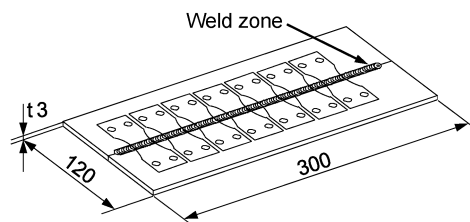


Fig. 4 Sampling pattern of fatigue samples from a friction stir welded joint.

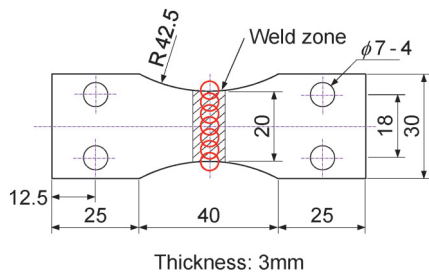


Fig. 5 (Color online) Shape and dimensions of samples. Red circles schematically present the fields of view by laminography.

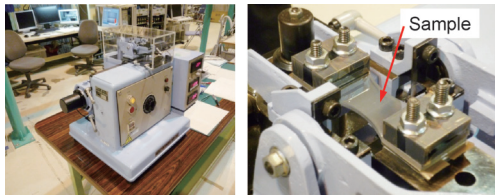


Fig. 6 (Color online) Plane bending fatigue testing machine and sample setup.

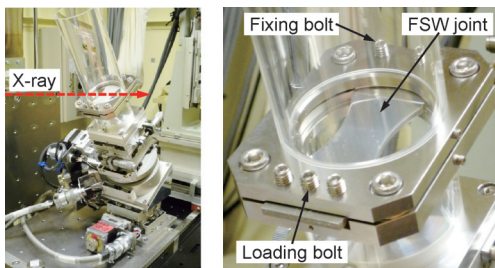


Fig. 7 (Color online) Scanning equipment of laminography and a magnified view of the sample holder.

負荷の条件は、応力比 $R = -1$ 、室温・大気中、負荷繰返し速度 22 Hz とし、試験開始時に所定の応力となるよう試験片に初期変位を与え、変位一定で試験を継続した。

3.2 試験片ホルダー

き裂が完全に閉口している場合には、き裂の観察は困難となるため、き裂をわずかに開口させるための試験片ホルダーを開発した (Fig. 7)。このホルダーは試験片を固定すると同時に、負荷ボルトを使用して試験片に曲げ荷重を与え、き裂を開口させることが可能である。また、試験片が回転しても検出器の視野を妨げることがない形状とした。さらに、支持部材として使用しているアクリルパイプによる X 線の減衰を補正するため、ホルダー上部にも同じアクリルパイプによるダミーを設け、アクリルパイプのみの投影データも取得可能な構造とした。

3.3 SPring-8 における測定

実験は、SPring-8 の産業用ビームライン BL19B2 の第

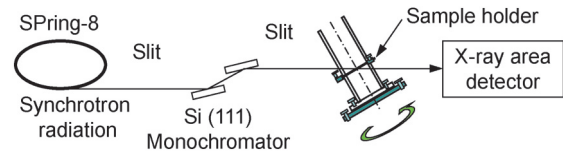


Fig. 8 (Color online) Setup of laminography at BL19B2 of SPring-8.

1 ハッチで行った。典型的な測定レイアウトを Fig. 8 に示す。装置構成は、これまで我々が SPring-8 で実施してきた CT とほぼ同一であるが、ラミノグラフィでは試験片回転テーブルを放射光の上流側に 30 度 ($\phi = 60$ 度) 傾斜させている。観察に使用した X 線のエネルギーは 28 keV であり、屈折コントラストの効果が適切に現れるよう、試験片の後方 0.8 m の位置に X 線検出器を設置した¹⁰⁾。代表的な X 線のビームサイズは水平方向 12.0 mm、垂直方向 4.8 mm であり、11.3 mm × 4.6 mm の範囲でデータ収集を行った。このとき、実効的なピクセルサイズは 11.4 μm である。試験片透過像は 0.5 度刻みで 360 度まで取得し、透過像取得の際の露光時間は 250 ms とした。支持部材として使用しているアクリルパイプによる X 線の減衰を補正するため、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た。

なお、検出器の画素数の制限やデータハンドリングの観点から、大きな視野を高い分解能で観察することは困難である。このため、大きなき裂を観察する場合には観察領域を複数の視野に分割し、各視野の再構成スライス像を正確に繋ぎ合わせることによって、疲労き裂全体を再現した。

4. 実験結果および考察

4.1 共材継手における疲労き裂の観察

A6061 共材継手試験片について、ラミノグラフィによる疲労き裂の観察を行った。応力振幅 (試験片に与える変動応力の範囲 (最大と最小応力の差) の 1/2) 160 MPa、負荷繰返し 5.8×10^4 cycle で発生させた疲労き裂の再構成像 (試験片表面) と光学顕微鏡写真を比較して Fig. 9 に示す。き裂全体の再構成像は、試験片表面の位置の異なる複数のスライス像を繋ぎ合わせることで作成した。ラミノグラフィによる再構成像は光学顕微鏡による観察結果と良く一致し、長さ約 8 mm に及ぶ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。なお、再構成像および光学顕微鏡写真の中心付近の穴は初期き裂を導入するために設けたドリル穴 (直径 0.3 mm、深さ 0.3 mm) である。

疲労負荷により試験片に作用する応力は試験片の長手方向 (Y 方向) であり、均一な組織の場合にはき裂は X 方向に直線状に成長する。しかし本試験片では、疲労き裂が途中で大きく屈曲しながら成長しており、FSW に伴う特異な塑性流動組織の影響によるものと考えられる。

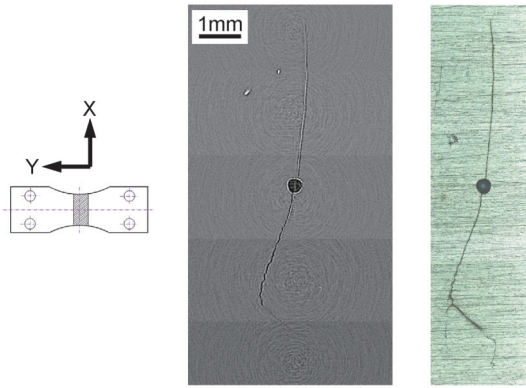


Fig. 9 (Color online) Comparison between the reconstructed image of a fatigue crack at sample surface by laminography and the corresponding image by optical microscope.

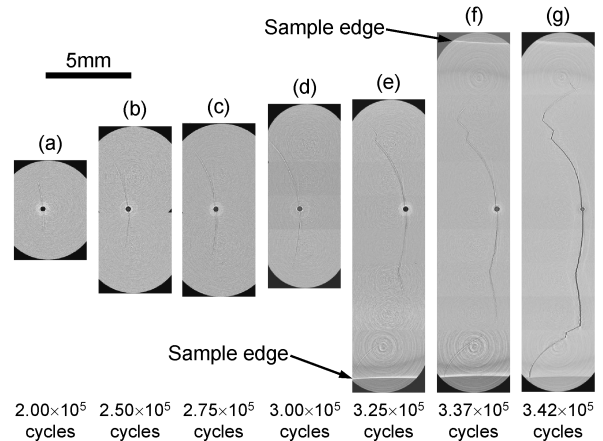


Fig. 11 Propagation of a fatigue crack in an FSW joint.

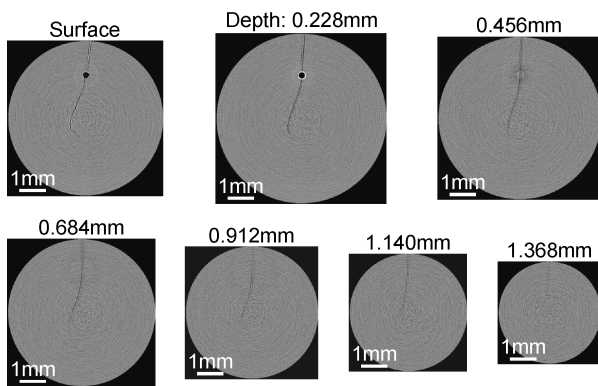


Fig. 10 Reconstructed slice images of the fatigue crack with various elevations.

試験片内部の疲労き裂の形状を確認するため、異なる深さの一連のスライス像を再構成した。代表例を Fig. 10 に示す。疲労き裂の屈曲は表面から約0.7 mm の範囲で生じ、より深いところでは、き裂はほぼ直線状に成長している。また、内部ではき裂の長さは短いことがわかる。

4.2 き裂成長の観察

A6061共材試験片における疲労き裂の成長を、ラミノグラフィにより観察した。試験片表面の再構成像を Fig. 11 に示す。疲労負荷回数は図中に示すとおりであり、応力振幅は120 MPa である。なお、ここでは前節 (4.1) とは異なる試験片を使用している。各々の再構成像から算出したき裂の長さは光学顕微鏡観察で求めたき裂の長さとはほぼ一致し、ラミノグラフィによりき裂の成長を正しく評価できることを確認した。

疲労き裂は Fig. 11(a)~(d) で試験片表面をほぼ円弧状に成長し、(e)以降で大きく屈曲した後、(g)で試験片の端面から成長してきた別のき裂と最終的に合体した。初期段階の円弧状のき裂の曲率半径は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

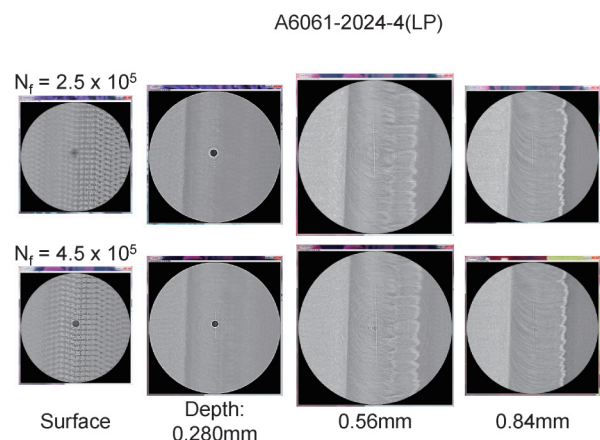


Fig. 12 (Color online) Reconstructed slice images of an FSW dissimilar joint between A6061 and A2024.

に関連していると思われる。

4.3 異材継手の観察

FSW によって作成した A6061 と A2024 の異材継手のラミノグラフィ観察結果を Fig. 12 に示す。各スライス像の右側が A6061 (密度2.70)、左側が A2024 (密度2.77) に対応する。スライス像には供試材の密度の違い (約2.5%) が明暗として現れ、材料を区別することができた。表面については明瞭でないが、試験片の内部では A2024 と A6061 の混合領域と、A2024 (左側) との間で直線状の境界が明確に現れている。また、深さ0.56 mm と0.84 mm のスライス像には FSW 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 側に带状に偏在していることがわかる。

この試験片は FSW の後 (疲労負荷の前) にレーザーピーニング¹¹⁻¹³⁾を施したものであり、表面のスライス像ではレーザーパルス照射による規則正しい窪みが再現されている。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。

き裂の成長については、表面はレーザーの走査痕によりき裂自体の確認が容易でないが、図の上段と下段で試験片内部のスライス像を比較することにより、疲労負荷によるき裂の成長を確認することができる。なお、疲労負荷回数は上段が 2.5×10^5 cycle 下段が 4.5×10^5 cycle であり、応力振幅は120 MPa である。

4.4 き裂の三次元観察

ラミノグラフィにより試験片内部のき裂の形状を非破壊で三次元的に可視化した例を Fig. 13 に示す。この試験片は A6061 と A2024 の異材継手であり、応力振幅 120 MPa で 4.7×10^5 cycle の疲労負荷を与えたものである。また、Fig. 13 の左側半分に対応する表面のスライス像と、A-A' および B-B' における縦断面像を Fig. 14 に示す。

試験片の角部から発生したき裂は、表面では A2024 と A6061 の境界に沿って成長しているが、内部では A-A' 断面に示すとおり組織境界とは無関係に直線状に成長している。一方、ドリル穴から成長してきたき裂は、B-B' 断面に示すとおり試験片の内部でも屈曲し、特に図中の矢印の位置で複雑に屈曲している。ここには画像の明暗に現れる

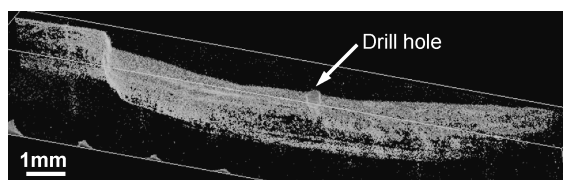


Fig. 13 3D image of a fatigue crack in an FSW joint.

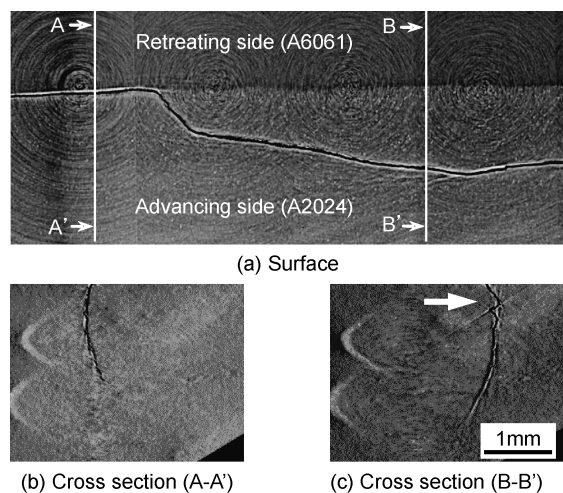


Fig. 14 Fatigue crack inside the FSW dissimilar joint between A6061 and A2024.

ような組織の偏在はなく、攪拌で生じた塑性流動組織の異方性による屈曲と考えられる。

5. おわりに

放射光を光源としたラミノグラフィにより、アルミニウム合金平板試験片 FSW 接合部の疲労き裂の観察を試みた。その結果、き裂の表面形状および寸法を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。試験片内部におけるき裂の三次元的な形状も非破壊で観察可能であり、ラミノグラフィと疲労負荷を交互に繰返すことにより、FSW による特異な材料組織中の疲労き裂の成長を可視化できることを示した。また、異なる組成のアルミニウム合金 (A6061 および A2024) を接合した異材継手の観察では、約 2.5% の密度差を画像として捉えることが可能であり、FSW による組織の混合の様子を知ることができた。

FSW は長尺で薄肉の構造物の接合方法として注目されており、航空機、車両、自動車の製造などへの適用が進められている。しかしながら FSW は比較的新しい技術のため、接合のメカニズムや接合部の信頼性に関する知見は必ずしも十分とは言えない。また、接合部には攪拌に伴う塑性流動組織が形成され、疲労特性をはじめとする機械的な特性が母材とは大きく異なることが知られている。

本報告で示したとおり、ラミノグラフィによれば FSW 接合部に生じた微細な疲労き裂を非破壊で三次元的に観察することが可能であり、き裂の成長を可視化することができる。これらのデータの蓄積および評価は、疲労き裂の成長メカニズムの解明や FSW 接合部の信頼性の向上に大きく寄与するものと考えられる。また、異材継手においては組織の混合の様子が可視化できるため、FSW の接合メカニズムの解明や、接合プロセスおよび条件の最適化において有用な知見をもたらすことが期待できる。

謝辞

放射光を光源としたラミノグラフィによる FSW 試験片接合部の疲労き裂の可視化実験は、(公財)高輝度光科学研究センター (JASRI) 大型放射光施設 (SPring-8) の産業用ビームライン (BL19B2) で実施した (課題番号: 2011A1685, 2011B1861, 2012A1274, 2012B1740, 2013B1863, 2014A1700, 2014B1927)。また本研究は JSPS 科研費 25420741 の助成を受けた。

参考文献

- 1) A. L. Biro, B. F. Chenelle and D. A. Lados: Metall. Mater. Trans. B **43**, 1622 (2012).
- 2) R. S. Mishra and Z. Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R **50**, 1 (2005).
- 3) O. Hatamleh, M. Hill, S. Forth and D. Garcia: Mater. Sci. Eng. A **519**, 61 (2009).
- 4) Y. Sano and K. Masaki: SPring-8 Res. Frontiers 2006, 151.
- 5) K. Masaki and Y. Sano: SPring-8 Res. Frontiers 2010, 138.

- 6) Y. Sano, K. Masaki, K. Akita, T. Kubo, M. Sato and K. Kajiwara: J. Japan Soc. Synchrotron Rad. Res. **21**, 270 (2008).
- 7) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiwara: J. Soc. Mater. Sci. Japan **56**, 1133 (2007).
- 8) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: J. Sol. Mech. Mater. Eng. **2**, 1104 (2008).
- 9) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita, K. Kajiwara and T. Adachi: J. Soc. Mater. Sci. Japan **58**, 975 (2009).
- 10) Y. Sano, K. Masaki, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: J. Soc. Mater. Sci. Japan. **57**, 395 (2008).
- 11) Y. Sano, K. Masaki, T. Gushi and T. Sano: Mater. Des. **36**, 809 (2012).
- 12) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi: Mater. Sci. Eng. A **417**, 334 (2006).
- 13) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata: Nucl. Instrum. Methods B **121**, 432 (1997).
- 14) S. Gondrom, J. Zhou, M. Maisl, H. Reiter, M. Kröning and W. Arnold: Nucl. Eng. Des. **190**, 141 (1999).
- 15) L. Helfen, T. Baumbach, P. Mikulik, D. Kiel, P. Pernot, P. Cloetens and J. Baruchel: Appl. Phys. Lett. **86**, 071915 (2005).

著者紹介



佐野雄二

内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) プログラム・マネージャー

E-mail: yuji.sano@jst.go.jp

専門：レーザー応用工学，原子力工学

【略歴】

1977年東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻修士課程修了，博士(工学)，2006年東芝電力・社会システム技術開発センター技監，2014年より現職。



梶原堅太郎

高輝度光科学研究センター産業利用推進室 副主幹研究員

E-mail: kajiwara@spring8.or.jp

専門：X線回折，X線イメージング

【略歴】

2001年高輝度光科学研究センター産業利用推進室研究員，2002年九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程物質工学専攻修了，博士(工学)，2005年より現職。



政木清孝

沖縄工業高等専門学校機械システム工学科 准教授

E-mail: masaki-k@okinawa-ct.ac.jp

専門：材料強度，表面改質処理，疲労

【略歴】

2000年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了，博士(工学)，電気通信大学大学院電気通信学研究科助手，2007年より現職。

Evaluation of fatigue cracks in FSW joints of industrial structural materials by laminography

Yuji SANO

Power and Industrial Systems Research and Development Center, Toshiba Corporation 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan
Present address: Japan Science and Technology Agency K's-gobancho, 7, Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0076, Japan

Kiyotaka MASAKI

Department of Mechanical Systems Engineering, National Institute of Technology, Okinawa College 905, Henoko, Nago-shi, Okinawa 905-2192, Japan

Kentaro KAJIWARA

Japan Synchrotron Radiation Research Institute 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract Friction stir welding (FSW) is an emerging technology for joining flat and thin metal materials and has been applied in manufacturing in aviation and automotive industries. Fatigue property is one of the most important items to be evaluated for the structural integrity of the products, and therefore, it is necessary to visualize the three-dimensional (3D) behavior of fatigue cracks propagating in the non-homogeneous and anisotropic stirred zone of FSW joints. We have applied laminography with synchrotron radiation of SPring-8 to the FSW joints of aluminum alloy as a typical structural material. The results showed that the fatigue cracks propagated in a unique way depending on the stirred material.