

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 14 日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420741

研究課題名(和文) 光を用いた摩擦攪拌接合継手の疲労信頼性向上と断層撮影技術による破壊機構解明

研究課題名(英文) Improvement of fatigue property by laser peening and investigation of fatigue fracture mechanism with synchrotron radiation on friction stir welding joints

研究代表者

政木 清孝 (MASAKI, KIYOTAKA)

沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：30323885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：各種輸送機器などへ適用されるAl合金の摩擦攪拌接合(FSW)継手について、疲労破壊メカニズムとピーニングによる疲労信頼性向上について調査した。まずFSW継手内部の疲労き裂進展挙動を非破壊で調査するため、放射光ラミノグラフィ技術を確立した。これによりFSW継手内部の疲労き裂は、荷重軸方向に投影すると半楕円形状であり、その進展速度が母材よりも高速であることを明らかとした。また、異材FSW継手では、組織の攪拌状況も同時に可視化できることを示した。レーザピーニングにより、FSW継手の疲労強度を母材程度まで改善でき、表面近傍のみを処理するような条件にすれば、より高い疲労特性改善となることを提唱した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the fatigue fracture mechanism of the friction stir welding (FSW) joints of aluminum alloy, which had been applied to various types of transportation equipment, were investigated. And, in order to improve the plane bending fatigue property on FSW joints of aluminum alloy, the laser peening without coating treatment and the shot peening treatment with zirconia shot were applied to FSW joints. At first, we established the laminography technique with synchrotron radiation of SPring-8 for observation of the fatigue crack in FSW joints. The three-dimensional shape of the fatigue crack and the friction stirred microstructure in the FSW joints were visualized by the laminography technique. Furthermore, we indicated that the fatigue property of the FSW joints of aluminum alloy was able to improve by the laser peening without coating or the shot peening. In addition, we suggested that mild peening conditions were suitable in order to obtain a high fatigue improvement effect.

研究分野：工学

キーワード：摩擦攪拌接合 放射光ラミノグラフィ 疲労き裂進展 応力拡大係数 レーザピーニング ショットピーニング

1. 研究開始当初の背景

英国溶接研究所(TWI)により開発された摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding :FSW)は、図1に示すようにピンを有するツールを接合部材に押しつけ、摩擦熱で組織を軟化して攪拌し、固相接合する新しい接合技術である。難接合材であるアルミニウム合金の接合技術として注目され、車両や航空機などの機械構造部材の製造技術として利用が進められている。このような機械構造部材などでは、機器の使用中に生じる負荷応力の繰返しが原因で、疲労破壊を生じる可能性があり、その防止と信頼性向上が重要となっている。疲労破壊は特に接合部が原因となりやすく、FSW 継手部も例外ではない。そのため国内外問わず、疲労特性の研究と信頼性向上に関する研究が行われている。

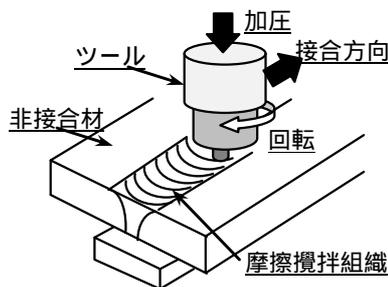


図1 摩擦攪拌接合の概略

疲労破壊を未然に防ぐためには、疲労き裂の発生と進展の抑制が重要である。しかし、摩擦攪拌組織中のき裂進展挙動に関しては不明な点が多く、学術的な観点からもき裂進展メカニズムの把握と現象の解明が急務となっている。このとき、FSW 継手内部の疲労き裂を非破壊で観察することができれば、現象の解明は大きく進展する。申請者は、放射光/産業用 X 線を利用した断層撮影技術(Computed Tomography : CT)を用いて、丸棒形状試験片の疲労き裂の進展挙動解析を行ってきた。しかし、平板形状を対象とする場合には十分な解像度が得られないという欠点があり、き裂観察のためには新たな観察技術の構築が必要となっている。

一方で著者らは、機械構造物の疲労信頼性向上方法として、日本式レーザピーニング(LP)の適用に関する研究も行っている。日本式 LP とは、図2に示すように水中で金属表面にパルス状のNd:YAG レーザを照射して

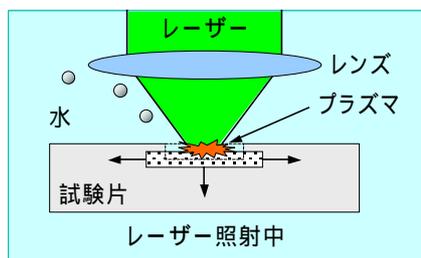


図2 レーザピーニング概要

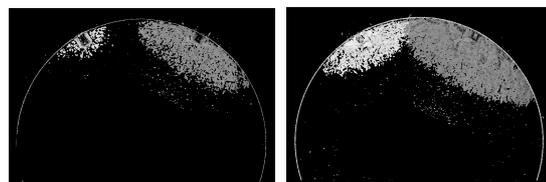
金属プラズマを発生させ、衝撃波のエネルギーでピーニング処理を行う技術である。このLP 処理を FSW 継手に適用した研究は、世界的に見ても申請者らの先行研究のほか、アメリカ航空宇宙局 NASA の O. Hatamleh らのものしかない。O. Hatamleh らの LP 処理は、光源に赤外線大出力レーザーを利用する欧米式と呼ばれるものであり、日本式のものとは一般的に区別されている。このため、FSW 継手に対して日本式 LP 処理を適用した知見は無く、産業利用のためにはデータの蓄積が必要不可欠である。

2. 研究の目的

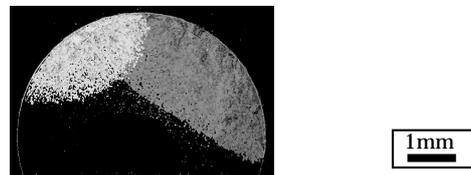
本研究では、上述の社会的、学術的背景をふまえ、FSW 継手材に生じた疲労き裂の非破壊的な三次元可視化技術を確立し、FSW 継手の摩擦攪拌組織中の疲労き裂進展機構の解明を目的とする。また日本式 LP 処理を FSW 継手材に適用し、疲労信頼性向上についての知見を得ることを目的とする。

(1) 放射光ラミノグラフィ技術の確立と疲労き裂の観察(学術的目標)

これまでの一連の研究で、放射光/産業用 X 線を用いた CT 技術により、丸棒試験片に発生した疲労き裂を非破壊で三次元的に可視化する技術を確立した(図3)。しかし、本手法は板幅と板厚が大きく異なる平板状試験片に対しては、き裂観察のための十分な解像度を得ることができない。そこで本研究では、電子基板などの検査技術として開発された「ラミノグラフィ技術(Laminography)」に着目した。一般には、試料を固定して X 線発生器を回転させるため、光源には産業用 X 線が利用されることが多い。本研究では、疲労き裂の僅かな開口を捉えるため、大型放射光施設 SPring-8 の放射光を利用した「放射光ラミノグラフィ技術」の確立を目指した。



(a)  $5.0 \times 10^4$  cycles (b)  $5.5 \times 10^4$  cycles



(c)  $7.0 \times 10^4$  cycles

図3 二本のき裂の干渉挙動 (マイクロCTによる可視化(軸方向投影))

(2) 日本式 LP による FSW 継手の疲労信頼性向上の実現と、その信頼性向上メカニズムの解明。(社会的(産業的)目標)

FSW 継手に関しては、疲労特性データが十

分蓄積されているとは言えないため、まず基礎的な平面曲げ疲労特性データの蓄積を行う。これに併せて、摩擦攪拌組織中の疲労き裂進展挙動を調査するため、上記で確立する放射光ラミノグラフィを用いてき裂の可視化を行い、破壊力学的パラメータによる定量的評価を行う。その後、日本式 LP 処理のほか、従来技術であるショットピーニング (SP) 処理を適用し、FSW 継手材に対する疲労信頼性向上効果を調査するとともにデータの蓄積をおこなう。この結果をふまえて、ピーニング処理による疲労信頼性向上のための指標を提唱する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 放射光ラミノグラフィ技術の確立と疲労き裂の観察

放射光ラミノグラフィ技術の確立には、大型放射光施設 SPring-8 の産業用ビームライン BL19B2 の第 1 ハッチを利用する。過去に確立した放射光マイクロ CT 技術の測定体系を参考として、図 4 に示すように X 線エネルギーを 28keV とし、試験片から X 線検出器までの距離を約 800mm と設定した。この距離は屈折コントラストの効果によって試験片のエッジが適度に強調される距離である。基本的な原理は通常の CT のそれと類似しており、様々な回転角度における試料の透過像を元にして、コンピュータ内に三次元画像を再構成する。ただし、FSW 継手のような平板を観察するためには、試料回転角度によらず X 線透過距離が常に一定となるよう配慮しなければならない。そこで、測定に先立ち、疲労試験に使用する平板状試験片を保持するためのサンプルホルダーを作製した (図 5)。このホルダーは平板状試験片に僅かに曲げ荷重を負荷できる構造となっている。このホルダーを設置する試料回転ステージの回転軸を光源側に 30 度傾斜させることで、回転角度によらず X 線透過距離が常に一定となる。この観察体系での実効的な分解能は約 11.4  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。

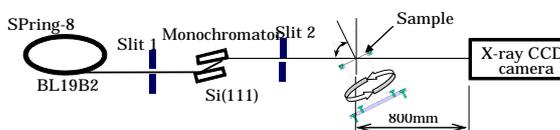


図 4 放射光ラミノグラフィ観察体系

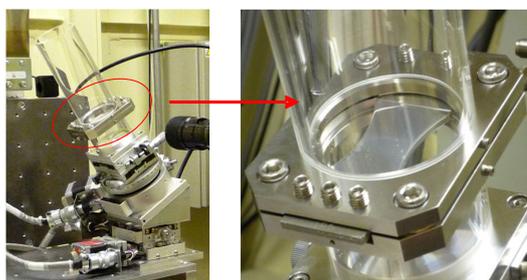


図 5 サンプルホルダー

#### (2) 日本式 LP による FSW 継手の疲労信頼性向上の実現と、その信頼性向上メカニズムの解明。

供試材として、A6061 材と、A2024 材の二種類のアルミニウム合金平板を用意した。ともに板厚は 3mm である。これらの板から、A6061 を用いた共材 FSW 継手と、A2024/A6061 の異材 FSW 継手を作成した。接合には、先端に M3 の逆ネジの切られたピンを有するショルダ直径 10mm の接合ツールを用い、汎用フライス盤を使用した。各 FSW 継手から平面曲げ疲労試験片を採取するが、このとき、試験片中心線が接合中心と一致するようにした。試験片採取後には、それぞれの接合材について基礎的な疲労特性 (平面曲げ疲労特性、応力比  $R=-1$ ) を調査し、放射光ラミノグラフィによる疲労き裂の観察と応力拡大係数を用いたき裂の進展評価を行った。その後、日本式 LP 処理による疲労特性改善効果を調査した。LP 処理の施工条件は、先行研究のものを参考とした。

### 4. 研究成果

#### (1) 放射光ラミノグラフィ技術の確立と疲労き裂の観察

疲労試験片の中心 (接合中心) に微小ドリル穴を付与し、疲労予き裂を発生させた A6061 共材 FSW 継手を対象として、放射光ラミノグラフィによるき裂観察を行った。結果の一例を図 6 に示す。ラミノグラフィの原理より、コンピュータ内での再構成領域が算盤玉形状となるため、再構成スライス像の大きさは再構成位置によって異なっている。試験片表面から深くなるに従って再構成領域が大きくなり、ある深さから徐々に小さくなっていく。しかし、いずれの再構成スライス像においても、ドリル穴から発生した疲労き裂を明瞭に確認することができる。なお、疲労き裂長さが十分長い場合には、一度の観察ではすべての範囲を可視化できないため、測定範囲を移動させながら観察を繰返し、得られた複数の再構成像を合成することによりき裂全体像を観察する。き裂長さが 10mm 程度のき裂を観察した結果を図 7 に示す。参考のために光学顕微鏡画像と比較しているが、表面き裂がよく再現されている。本研究により、SPring-8 での放射光ラミノグラフィ技術が

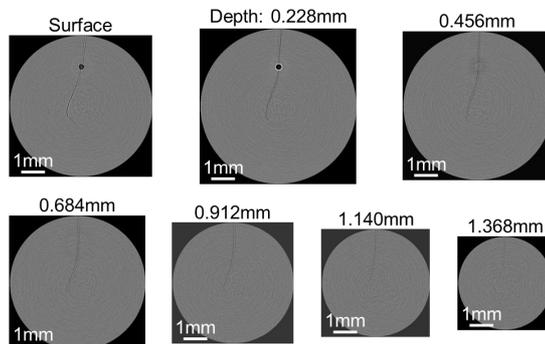


図 6 再構成スライス像の例

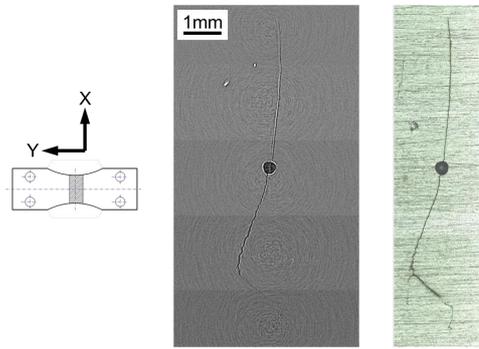


図7 表面き裂観察結果の比較

確立され、本技術は様々な試料に対する非破壊検査手法として期待される。また、疲労き裂の観察技術も確立した。

(2) 日本式 LP による FSW 継手の疲労信頼性向上の実現と、その信頼性向上メカニズムの解明。

FSW 継手材のき裂進展挙動について

A6061 共材 FSW 継手、ならびに A6061/A2024 異材 FSW 継手を対象に、摩擦攪拌領域を進展する疲労き裂の成長挙動を放射光ラミノグラフィにより調査した。いずれの試料においても、疲労き裂は三次元的に複雑に屈曲しながら成長することを明らかとした。しかし、き裂を可視化し、荷重軸方向への投影形状を調査したところ、両材とも綺麗な半楕円形状を維持していることがわかった(図8:A6061共材 FSW 継手の例)。この可視化されたき裂形状を元に、表面き裂先端と試験片内部におけるき裂先端の応力拡大係数をそれぞれ調査し、母材のそれと比較した(図9)。縦軸

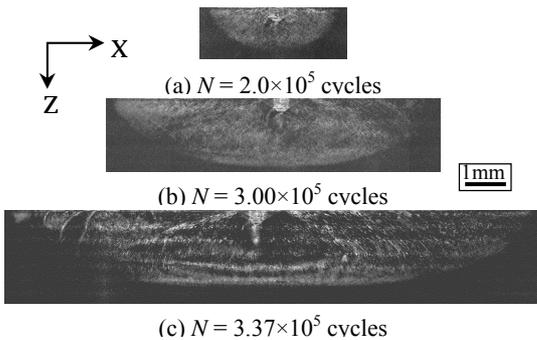


図8 荷重軸方向へのき裂投影像

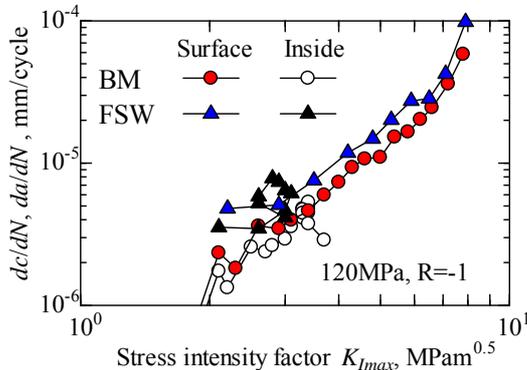


図9 き裂進展特性の比較

にき裂進展速度、横軸に応力拡大係数を示しているが、き裂進展速度が母材のき裂進展速度に比べて加速側にあることが明らかである。この傾向は、異材 FSW 継手においても同様であった。特に A2024/A6061 の異材 FSW 継手については、図10に示すようにき裂形状のみならず摩擦攪拌組織と疲労き裂の同時可視化に成功した。FSW 接合原理に関する研究では、組織の攪拌状況の把握が重要な情報源となるため、本手法が FSW 接合原理の解明に対する有用な手法となりうる。また、疲労き裂の進展挙動調査技術を確立したことにより、FSW 継手の疲労破壊メカニズムの解明に大きく寄与する。

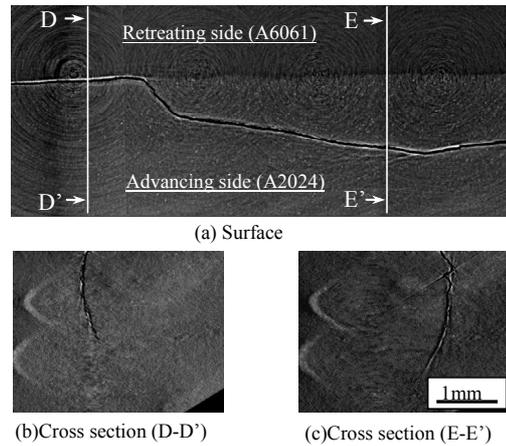


図10 き裂と攪拌組織の同時可視化

ショットピーニング (SP) ならびにレーザーピーニング (LP) による疲労特性改善について

FSW 継手に対して2種類のピーニング処理 (SP 処理、日本式 LP 処理) を適用し、疲労特性改善効果を調査した結果、得られた成果は以下の通りである。まず A6061 共材 FSW 継手に日本式 LP 処理と SP 処理を施し、それぞれの疲労特性を調査し、まず基礎的な疲労データを蓄積した。本研究で採用した処理条件下では、以下の事が明らかとなった。日本式 LP 処理では、母材の疲労特性を顕著に向上させることが可能であるが、FSW 継手材の疲労特性については顕著に向上させることができない。特に有限寿命域の疲労特性は、未処理材よりも短寿命化する傾向にある。一方の SP 処理では、母材の有限寿命特性を顕著に改善できるが、疲労限度の向上は僅かである。FSW 継手材の有限寿命特性も改善することができ、さらに疲労限度も向上できる。日本式 LP 処理と SP 処理の疲労特性に及ぼす効果の違いは、ピーニング効果の調査結果から、き裂の発生挙動の違いを生じたためであることを明らかにした。次に同一の処理条件で A6061/A2024 の異材 FSW 継手に日本式 LP 処理を適用したところ、A6061 共材 FSW 継手と同様に、疲労特性の改善には至らないことを明らかとした。これは、日本式 LP 処理を施すことによって得られる正の因子 (組織硬さ

の向上、圧縮残留応力の付与)よりも負の因子(表面粗さ増加)が大きく、特に A6061 側でこの傾向が顕著となることが FSW 継手全体の疲労強度低下の原因であることを明らかとした。これらの結果をふまえて、FSW 継手の疲労特性を改善する方法としては、極最表面のみをピーニングするような処理条件が適切であることを見いだした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

佐野雄二、政木清孝、梶原堅太郎、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、放射光、29 巻、32 頁-37 頁、2016 年、査読有

[学会発表](計 16 件)

政木清孝、FSW 接合材の平面曲げ疲労特性調査と放射光ラミノグラフィの援用、日本材料学会 第 324 回疲労部門委員会、2016 年 3 月 25 日、コベルコ建機(広島県佐伯区)

政木清孝、放射光ラミノグラフィを利用した異材 FSW 継手材の接合組織と疲労き裂の同時可視化、財団法人高輝度光科学研究センター SPring-8 利用推進協議会 金属材料評価研究会第 11 回 - 溶接部等の最近の注目技術 -、2016 年 2 月 1 日、研究社英語センタービル(東京都新宿区)

政木清孝、アルミニウム合金 A6061 および A2024 の FSW 継手材の平面曲げ疲労特性評価、日本機械学会 材料力学部門カンファレンス(M & M'15)、2015 年 11 月 21 日、慶応大学(神奈川県横浜市)

政木清孝、A2024-T3 の平面曲げ疲労特性におよぼすレーザーピーニング処理の影響、日本材料学会 第 17 回破壊シンポジウム 2015 年 10 月 13 日、京都テルサ(京都府京都市)

政木清孝、放射光ラミノグラフィによる異材 FSW 継手材の接合組織および疲労き裂の可視化、溶接学会全国大会 平成 27 年度秋季大会、2015 年 9 月 4 日、北海道科学大学(北海道手稲区)

政木清孝、ピーニング処理による FSW 継手の平面曲げ疲労特性改善、2014 年度 大阪大学 接合科学研究所 東京セミナー、2014 年 12 月 10 日、田町キャンパスイノベーションセンター(東京都大田区)

政木清孝、アルミニウム合金 FSW 継手材の攪拌部におけるき裂成長挙動、日本材料学会 第 32 回疲労シンポジウム、2014 年 11 月 6 日、高山市文化会館(岐阜県高山市)

政木清孝、A2024/A6061 異材 FSW 継手の疲労特性評価、日本機械学会 2014 年度年次大会、2014 年 9 月 10 日、東京電機大

学(東京都足立区)

政木清孝、欠陥を有する FSW 継手材の放射光ラミノグラフィを援用した疲労破壊メカニズム調査、日本材料学会 第 63 期学術講演会、2014 年 5 月 16 日、福岡大学(福岡県福岡市)

Y. SANO and K. MASAKI、NONDESTRUCTIVE 3D IMAGING OF FATIGUE CRACKS INSIDE ENGINEERING MATERIALS BY SYNCHROTRON RADIATION、The 1st Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment、2014 年 4 月 23 日、横浜国際平和会議場(神奈川県横浜市)

Y. SANO、K. MASAKI and K. HIROTA、IMPROVEMENT IN FATIGUE STRENGTH OF FRICTION STIR WELDED ALUMINUM ALLOY PLATES BY LASER PEENING、11th International Fatigue Congress、2014 年 3 月 2 日 Melbourne (AUSTRALIA)

K. MASAKI、K. YAMASHIRO、Y. SANO、EFFECTS OF LASER PEENING ON PLANE BENDING FATIGUE PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED A6061-T6 ALLOY、The 1st International Joint Symposium on Joining and Welding、2013 年 11 月 8 日、ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田市)

政木清孝、放射光ラミノグラフィによる異材 FSW 継手材の疲労き裂進展挙動調査、日本機械学会 材料力学部門カンファレンス(M & M'13)、2013 年 10 月 12 日、岐阜大学(岐阜県岐阜市)

政木清孝、放射光ラミノグラフィによる FSW 継手材の疲労き裂進展挙動調査、日本機械学会 2013 年度 年次大会、2013 年 9 月 9 日、岡山大学(岡山県岡山市)

政木清孝、A6061 合金 FSW 継手材の疲労特性におよぼすジルコニアピーニングの影響、日本材料学会 第 62 期学術講演会、2013 年 5 月 18 日、東京工業大学(東京都目黒区)

K. MASAKI、EFFECTS OF LASER OR SHOT PEENING ON PLANE BENDING FATIGUE PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED A6061-T6 ALUMINUM ALLOY、The 4rd International Conference on Laser Peening and Related Phenomena、2013 年 5 月 9 日、Madrid (SPAIN)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

政木 清孝 (MASAKI Kiyotaka)  
沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授  
研究者番号：30323885

(2) 研究協力者

佐野 雄二 (SANO Yuji)  
梶原 堅太郎 (KAJIWARA Kentarou)