

# 摩擦攪拌継手部のレーザーピーニングによる高強度化

## 高機能表面形成

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科  
准教授 政木清孝  
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007013)

キーワード：摩擦攪拌接合，レーザーピーニング，疲労特性

### 1. 研究の目的と背景

アルミニウム合金は溶接変形が大きい，表面の酸化膜が高融点のため前処理が必要である，などの理由から難溶接材として知られている．しかし，英国の溶接研究所(The Welding Institute, TWI)によって摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding, FSW)が開発され，アルミニウム合金の FSW 継手が各種産業分野に適用されはじめた<sup>1)3)</sup>．FSW 継手の適用が試みられている車両，船舶，航空機器などの機械構造物では繰り返し負荷が生じるため，FSW 継手の疲労特性に関する調査が重要である．溶接などに代表される金属材料接合部の疲労強度は，一般に母材よりも低下することから，疲労特性改善が重要な課題となっている．FSW 継手の疲労特性に関しても例外ではなく，FSW 継手の軸荷重疲労限度が母材に比べて低下することが植松らによって調査されている<sup>4)</sup>．

そこで本研究では，FSW 継手の疲労特性改善を目的として，表面改質処理のひとつであるレーザーピーニング処理(LP 処理)に着目した．レーザーピーニング処理はショットピーニングと同じピーニング技術の一種であるが，ほぼ同時期に米国と日本において開発された新しいピーニング技術である<sup>5)</sup>．本研究では日本式のレーザーピーニング処理に注目し，Al-Mg-Si 系展伸用アルミニウム合金 A6061-T6 の FSW 継手の平板曲げ疲労特性の改善を試みる．さらに接合部(摩擦攪拌部)の疲労き裂進展経路調査手法として，放射光断層撮影技術の援用の可能性について調査したので併せて報告する．

また研究計画立案時には LP 処理による機能性表面の生成も目的としていたが，FSW 接合の条件出しおよび平板曲げ疲労試験方法の習得に時間を要してしまい，検討するまでには至らなかった．今後の検討課題としたい．

### 2. 供試材及び実験方法

#### 2・1 供試材

供試材は板厚 3mm の Al-Mg-Si 系展伸用アルミニウム合金 A6061P-T6 圧延材である．ミルシートに記載された化学成分を表 1 に示す．二枚の供試材を圧延方向で突き

表 1 供試材の化学成分 [wt.%]

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 FSW 接合条件

	ツール先端形状	ツール角度	ツール送り速度
条件①	Straight pin	3 deg	41 mm/min
条件②			267 mm/min
条件③			507 mm/min
条件④	Taper pin		41 mm/min

合わせて FSW 継手を作成した．FSW 接合には静岡鐵工所製の汎用フライス盤 (SV-CH) を使用し，ツール回転速度を 1400rpm (時計回り) と設定して，①逆ねじの切られた接合ツール先端形状 (円筒形状 (straight)/テーパ形状 (taper)) ②ツール進行方向に対する角度 (前進角 0/3deg) ③ツール送り速度 (41/267/507mm/min) を基本パラメータとして設定した．これらを組合せた条件で FSW 接合を行い，外観検査から接合部分に欠陥の生じなかった表 2 に示す組合せを FSW 接合条件として選定した．

#### 2・2 引張試験による FSW 接合条件決定

表 2 に示す条件で作成した FSW 継手より，JIS No.5 試験片形状に準拠した図 1 に示す引張試験片を，ワイヤ放電加工により切り出した．供試材の圧延方向と試験片長手方向を一致させ，試験片中央部が FSW 接合部となるようにした．この試験片を用いて引張試験を行い，最も静的強度特性の優れた条件を本研究の接合条件とする．引張試験には油圧式万能試験機 (島津製作所製 UH-F500kNI) を用い，引張速度を 0.5mm/min として行った．なお，試験片枚数は各条件で三枚とした．引張試験結果の引張強さ  $\sigma_B$  と接合条件の関係を図 2 に，伸び  $\delta$  と接合条件の関係を図 3 にそれぞれ示す．FSW 継手の引張強さ，伸びはいずれも母材 (Matrix) に比べて低下し

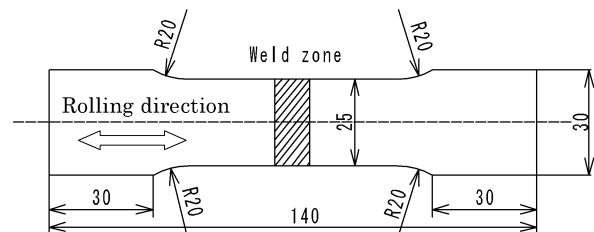


図 1 引張試験片形状

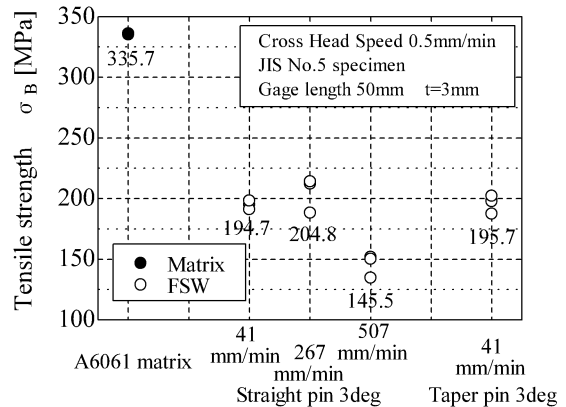


図 2 引張試験結果 (引張強さと FSW 条件)

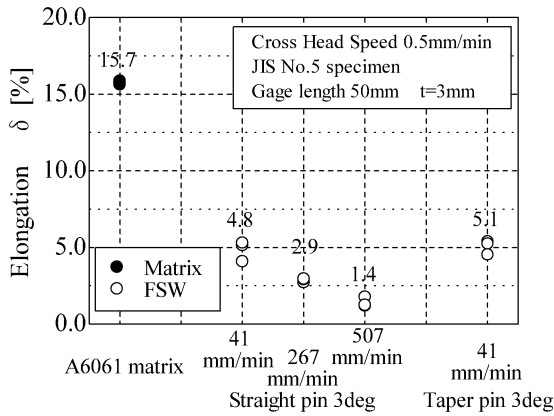


図3 引張試験結果 (伸びとFSW条件)

ており、母材に比べて引張強さは約60%、伸びは30%となった。FSW継手同士を比較すると顕著な差ではないが、Straight pin / 41mm/min / 3degの条件とTaper pin / 41mm/min / 3degの条件が引張特性に優れているようである。しかし、Taper pinを用いた接合においては、加工時に比較的マクロな欠陥が生じやすい傾向があったことから、本研究ではStraight pin / 41mm/min / 3degの条件を採用することとした。

### 2・3 疲労試験片および試験方法

Straight pin / 41mm/min / 3degの条件により接合したFSW継手を対象として、LP処理による平板曲げ疲労試験の改善について検討する。疲労試験片形状を図4に示す。試験片採取方向や採取位置は引張試験片と同一とし、試験片中央部にFSW接合部分が位置するようにワイヤ放電加工機により採取した。試験片採取後、全ての試験片側面部について、エメリ研磨およびバフ研磨を施して鏡面仕上げとした。試験片表面については圧延材のFSW接合状態のままとし、特に研磨加工等を施していない。疲労試験には変位制御の平板曲げ疲労試験機(東京衡機製PBF-30型)を用い、応力比 $R=-1$ 、室温・大気中、負荷繰り返し速度1300cpmの条件で疲労試験を実施した。疲労破面については実体顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察を行った。

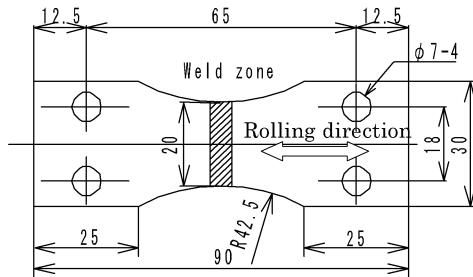


図4 疲労試験片形状 t=3

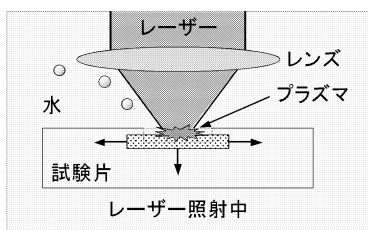


図5 LP処理概略

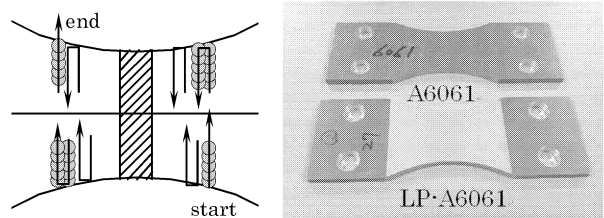
### 2・4 LP処理条件

試験片へのLP処理は、日本式LP処理を開発した(株)東芝に依頼した。LP処理とは図5に示す概略図のように、パルス状のレーザーを水などの透明媒質中で金属表面に照射し、発生する高圧プラズマの成長を媒質の慣性力で抑制することで生じる衝撃波を利用した、材料表面のピーニング処理技術である。ショットピーニングと同様に材料表面近傍の組織に高い圧縮残留応力を発生させ、組織硬さを向上させることが可能である。また、ショットピーニングと比較して材料の深い領域まで圧縮残留応力を付与できるという特徴がある。LP処理条件は、主としてパルスエネルギー(1パルスあたりのエネルギー量)、スポット直径、パルス密度(単位面積あたりの照射パルス数)の3条件があるが、本研究ではA6061材と同じAl-Si-Mg系で铸造アルミニウム合金AC4CHに対するLP処理の影響を調査した過去の研究から、パルスエネルギー:60mJ、スポット直径:0.7mmのLP処理条件とした。ただし、パルス密度に関しては、表面、裏面同一処理条件でLP処理を行ったところ試験片に顕著な反りが生じたため、LP処理後の試験片反りが小さくなるように表面18pulse/mm<sup>2</sup>、裏面27pulse/mm<sup>2</sup>と表面と裏面で異なる条件とした。LP施工パターンと処理後の試験片外観を図6に示す。以下ではFSW、LP処理のいずれも施していない試験片をA6061材、LP処理を施したA6061材をLP-A6061材、FSW継手をFSW材、FSW材にLP処理を施した試験片をLP-FSW材と称す。

## 3. 平板曲げ疲労特性

### 3・1 疲労試験結果

疲労試験結果(S-N特性)を図7に示す。「●」で示したA6061材の10<sup>7</sup>回疲労限度は110MPaであるのに対し、「○」で示したFSW材の10<sup>7</sup>回疲労限度は90MPaとな



(a)施工パターン (b)疲労試験片外観

図6 LP処理試験片

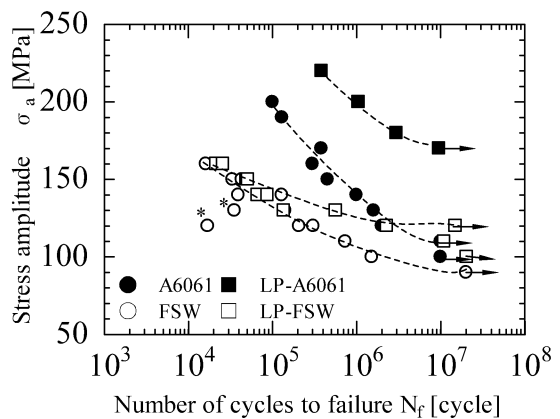


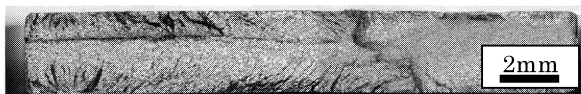
図7 疲労試験結果

った。両者の  $10^7$  回疲労限度の差はわずか 20MPa であり、約 140MPa の差があった引張特性に比べて、FSW 材の疲労限度の低下は僅かであった。また、FSW 材においては図 7 中 \*印で示すように、他の試験片よりも短寿命となる試験片が存在した。この試験片について破断後に破面観察を行ったところ、試験片接合部付近には内部に大きな欠陥が存在していた。これは摩擦攪拌時に塑性流動異常、入熱不足などが原因で生じた欠陥と推測される。

A6061 材、FSW 材に LP 処理を施したものが、LP-A6061 材 (■) と、LP-FSW 材 (□) である。LP 処理により、両材ともに疲労特性が向上した。LP 処理による疲労特性の改善効果は、LP-A6061 材の  $10^7$  回疲労限度が 170MPa となっており、A6061 材に比べて 60MPa の向上である。一方の LP-FSW 材の  $10^7$  回疲労限度は 120MPa となり、FSW 材に比べて 30MPa の向上となった。A6061 材では疲労寿命、疲労強度とも、LP 処理による疲労特性改善が顕著である。これに対して FSW 材では、高応力域では疲労寿命に差がほとんど認められないが、疲労限度に近い低応力振幅域では疲労寿命が顕著に改善している。また FSW 材の  $10^7$  回疲労限度は LP 処理を施すことで母材 (A6061 材) を上回る結果となった。高応力域における疲労寿命改善については検討の余地があるが、A6061 材と FSW 材に対する LP 処理は疲労限度向上について有効と判断される。

### 3・2 破面観察結果

疲労破面は、実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。疲労破面のマクロ様相は図 8 に示すように全て表面起点型の疲労破壊であった。また、LP-A6061 材と LP-FSW 材においては、LP 処理条件 (パルス密度) が表面と裏面で異なるにもかかわらず、表面/裏面のどちらかに疲労破壊起点が偏る傾向も認められなかった。唯一、疲労破面に明瞭な特徴が認められたのは、FSW 材と LP-FSW 材の疲労破面において、ツールショルダー部で破断した場合と、摩擦攪拌部で破断した場合のものであった。図 9 に疲労破断位置の違う破面例を示す。ツールショルダー部を起点とする図 9(a)の破面は、



(a)A6061 ( $\sigma_a=200\text{MPa}$ ,  $N_f=1.36 \times 10^5$  cycles)



(b)LP-A6061 ( $\sigma_a=220\text{MPa}$ ,  $N_f=3.38 \times 10^5$  cycles)



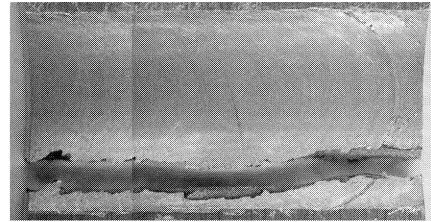
(c)FSW ( $\sigma_a=160\text{MPa}$ ,  $N_f=1.61 \times 10^4$  cycles)



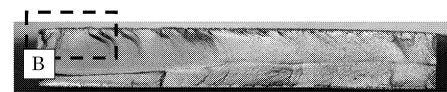
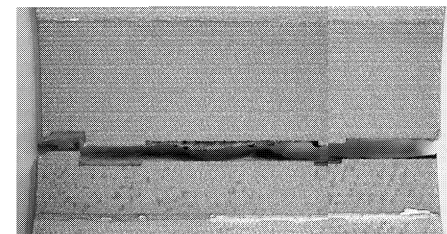
(d)LP-FSW ( $\sigma_a=160\text{MPa}$ ,  $N_f=2.14 \times 10^4$  cycles)

図 8 疲労破面マクロ写真

比較的粗く、粒状となっているのに対し、攪拌部を起点とする図 9(b)の破面は平坦であることが分かる。起点付近を SEM によって観察したものが図 10 であるが、その差は明確である。これは摩擦攪拌によって組織が微細化したことに起因する現象と考えられる。



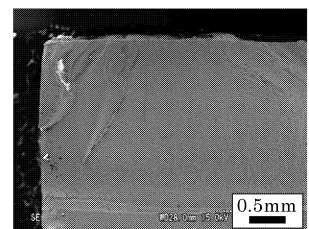
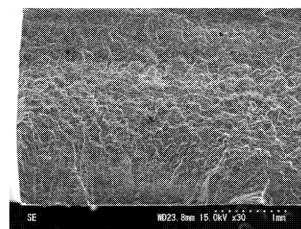
(a) ツールショルダー部近傍での破面例  
FSW ( $\sigma_a=120\text{MPa}$ ,  $N_f=3.05 \times 10^5$  cycles)



(b) 摩擦攪拌部での破面例

LP-FSW ( $\sigma_a=120\text{MPa}$ ,  $N_f=2.28 \times 10^6$  cycles)

図 9 破断位置と疲労破面 (マクロ観察像)



(a) 図 9(a)の A 点

(b) 図 9(b)の B 点

図 10 破断位置と疲労破面 (SEM 観察像)

### 3・3 LP 処理によるピーニング効果

LP 処理はショットピーニングと同じピーニング処理の一種であるため、ショットピーニングと同様のピーニング効果 (表面組織の硬さ向上、圧縮残留応力付与、表面粗さの増大など) を生じる。本研究では、粗さの増加と硬さの向上について調査を行った。

**3・3・1 表面粗さの増加** まず、疲労き裂発生に影響を与える表面粗さの増加について調査した。LP 処理条件 (パルス密度) が表面と裏面で異なるため、両面について  $R_a$ : 中心線平均粗さ,  $R_y$ : 最大粗さ,  $R_z$ : 十点平均粗さをそれぞれ測定した。LP 処理によって生じる試験片 (試料) 表面のピーニング痕は、ランダムに生じるショットピーニングとは異なり、図 6 に示す LP 施工パターンに従った規則正しい処理痕となる。そのため表面粗さ

も測定方向によって異なることから、試験片長手方向、試験片幅方向について粗さ測定を行った。粗さ測定結果を表3に示す。表面と裏面の表面粗さ測定値を比較すると、試験片横方向では同程度であるが、試験片縦方向でパルス密度の高い表面側の粗さ測定結果が僅かに高い値となっている。表面粗さが増加すると応力集中を生じるため、疲労き裂が発生しやすくなる。これは図9(b)に示したように、LP処理痕に沿ってき裂が進展していることから明らかである。ただし、疲労試験後の破面観察の結果から、破壊起点位置の表面／裏面に関する偏りが認められなかったことから、LP処理条件の違いによる表面／裏面の表面粗さの相違は、疲労特性に顕著な影響を与えるものではないと考えられる。

**3・3・2 組織硬さの変化** 続いて代表的なピーニング効果である硬さの向上について調査した。アルミニウム合金は本来、加工硬化性の低い金属であるが、過去のアルミニウムに対するピーニング処理に関する研究結果から、ピーニング処理による硬さの向上が明らかとなっている<sup>6),7)</sup>。そのLP処理に伴う硬さの向上について、FSW材について調査を行った。硬さ測定はマイクロピッカース硬さ試験機を使用し、試験片表面、裏面、そして試験片断面の中央部について行った。図11にFSW材(LP処理未施工)の硬さ測定結果を示す。攪拌部(ショルダー部)は、ツールのショルダー部分(φ10mm)が接している領域を示している。母材の組織硬さは115HV程度であり、攪拌部に近づくにつれて低下(軟化)していることが分かる。これは摩擦攪拌時の熱影響によるものである。摩擦攪拌部の硬さは母材と比べて約1/2であり、A6061材に対するFSW材の引張強さの低下割合とよく一致する。しかし疲労特性の低下はごく僅かであることから、この組織の軟化が疲労特性に及ぼす影響は僅かであると考えられる。なお、硬さ分布には若干のバラツキが認められるが、測定部位によらずひとつのバンドに収まるようである。

FSW材にLP処理を施したLP-FSW材の硬さ測定結果が図12である。LP処理の影響をほとんど受けない試験片板厚中央の硬さ分布は、FSW材の硬さ分布範囲とほぼ一致している。これに対し、試験片の表面/裏面では、摩擦攪拌部の硬さ向上が認められる。試験片表面で約25HV、試験片裏面で約10HVの向上であった。しかし、摩擦攪拌部の硬さ向上の結果として、摩擦攪拌部と母材の境界層付近で局所的に組織硬さの低い箇所が存在する結果となった。

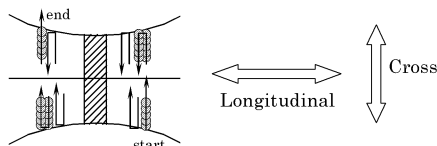
表3 表面粗さ測定結果

(a)試験片縦方向 (Longitudinal direction)

パルス密度	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>v</sub> (μm)	R <sub>z</sub> (μm)
表面側	18	4.27	18.33
裏面側	27	3.28	15.88

(b)試験片横方向(Cross direction)

パルス密度	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>v</sub> (μm)	R <sub>z</sub> (μm)
表面側	18	3.03	15.24
裏面側	27	3.33	15.72



### 3・4 FSW材へのLP処理の効果と疲労特性

FSW材へLP処理を施すことにより、平板曲げ疲労特性は改善し、10<sup>7</sup>回疲労限度に関しては母材のそれを上回る結果となった。A6061材とFSW材のLP処理による疲労特性改善効果を比較すると、FSW材の疲労特性改善効果はA6061材に比べて低く、さらなる疲労強度向上の余地があると思われる。LP-FSW材の組織硬さ値には摩擦攪拌部と母材との境界部で局所的な落ち込みが存在し、この部分がツールショルダー部と概ね一致する箇所となっている。本研究ではFSW接合後に表面研削などの平滑化処理を行っていないため、試験片表面のツールショルダー部には図9に示したようにFSW加工時に発生したバリなどが残存した状態となっている。この加工時のバリなどによる応力集中と硬さの低下によって、疲労強度向上が30MPa程度にしかならなかったと考えられる。そのため、FSW接合後に表面を平滑化することが、疲労強度の更なる向上に有効と思われる。この件に関しては今後も引き続き検討を実施する。また、本研究ではFSW材の残留応力分布測定するまでに至らなかったが、FSW材にはFSW接合に伴う引張、圧縮の残留応力が存在している<sup>8)</sup>。顕著な組織硬さの低下にもかかわらず疲労限度の低下が僅かであった理由は、この残留応力の存在と組織の微細化によるき裂発生・進展の抑制であると考えられる。この残留応力分布についてはLP処理によって再配分を生じると考えられ、残留応力の分布は疲労特性に大きな影響を及ぼすため、今後も検討を行っていく。

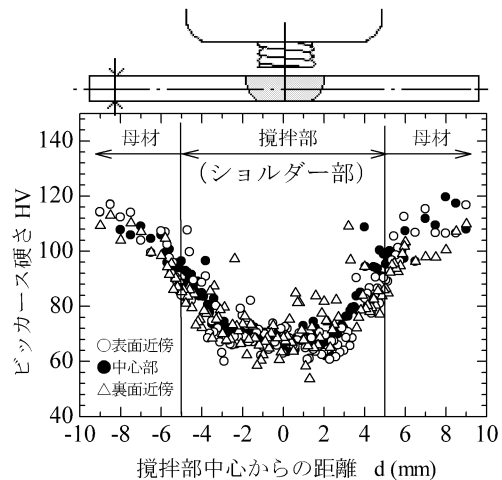


図11 硬さ分布 (FSW材)

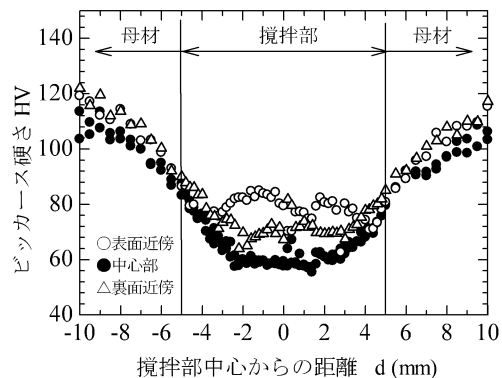


図12 硬さ分布 (LP-FSW材)

#### 4. 摩擦攪拌部の放射光マイクロ ( $\mu$ ) CT 観察

##### 4・1 FSW 接合部に対する放射光 $\mu$ CT の適用

FSW 接合部の組織攪拌状況の観察は、主として試料切断面の光学顕微鏡観察によって行われる。摩擦攪拌部に生じるマクロ組織は通称「オニオンリング」と呼ばれる立体構造となっているが、切断面の光学顕微鏡観察ではその全体像を把握することに限界がある。また、き裂進展挙動を調査するため光学顕微鏡観察が行われるが、本手法では試料表面のき裂進展挙動のみしか観察できないため、FSW 継手のオニオンリング中の疲労き裂成長挙動を把握することは難しい。近年になって、X 線（または放射光） $\mu$  CT (Micro Focus Computed Tomography: マイクロフォーカス断層撮影) を採用した材料の非破壊検査が試みられるようになり<sup>9)-11)</sup>、本手法によれば FSW 接合部におけるオニオンリング中での疲労き裂の成長挙動を断続的ではあるが、非破壊で逐次観察できる可能性がでてきた。そこで本研究では、放射光  $\mu$  CT を採用した FSW 材の内部観察の可能性を探った。

##### 4・2 試験片および放射光 $\mu$ CT の観察体系

X 線  $\mu$  CT や放射光  $\mu$  CT による材料内部の観察は、素材の X 線吸収係数の違いによって生じる透過像のコントラストの違いを利用するため、本研究のような同一素材どうしの FSW 継手においては、内在欠陥（接合不良部）の検出は可能と思われるが、オニオンリングの観察は難しいと考えられる。そこで、工業用純アルミニウム系 A1100 と Al-Cu-Mg 系 A2024 の合金元素の異なる二種類の板を FSW 接合したものを用意した。A1100 と A2024 を選択した理由は、A2024 が高密度の金属である Cu を含むため X 線透過率が低く、再構成画像において A1100 部との区別が容易であると推測されるからである。FSW 継手より接合部が長手方向の中心となるように、板幅 5mm×板厚 3mm×全長 30mm の小片を切りだし、観察試料とした。

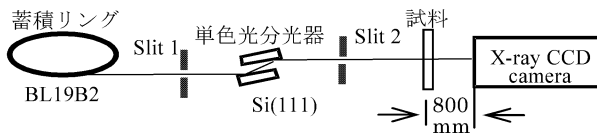


図 13 SPring-8 放射光  $\mu$  CT 観察体系概略

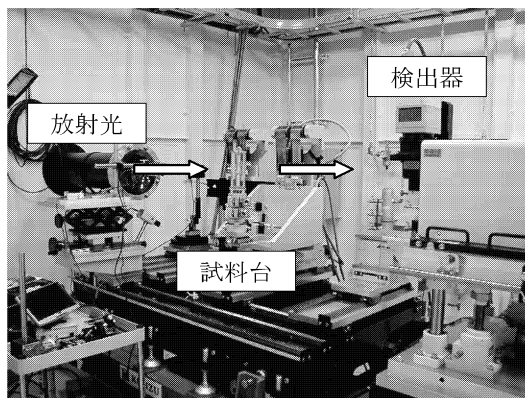


図 14 測定ハッチ内部

この試験片を用いて本研究では大型放射光施設 SPring-8 の高輝度放射光を用いた放射光  $\mu$  CT による観察を行った。SPring-8 のビームラインには BL19B2 (第 1 ハッチ) を利用した。観察体系を図 13 に、ハッチ内の装置のセッティングの様子を図 14 に示す。X 線エネルギーを 28keV、試験片と検出器（冷却 CCD カメラ）の距離を 800mm とした。実効的なピクセルサイズは約 2.85 $\mu$ m/pixel である。透過データは 0~180 度まで 0.5 度ごとに、積算時間 0.5 秒にて取得した。画像再構成にはフィルタード・バックプロジェクションアルゴリズムを使用した。

##### 4・3 FSW 継手の透過像および再構成スライス像

放射光による A1100-A2024 の FSW 継手の中央付近の透過像の例を図 15 に示す。透過像上で明るく見える部分が X 線吸収率の低い A1100 の部分、逆に暗く見える部分が X 線吸収率の高い Cu を含んだ A2024 の部分である。摩擦攪拌によって、組織が攪拌されている様子がよくわかる。この透過像から作成したスライス像 (FSW 接合部の断層撮影像) の例を図 16 に示す。画像中央部に現れているリング状の模様はオニオンリングではなく、リングアーチファクトと呼ばれる画像再構成時に生じる模様である。スライス像には母材の化学組成の違いによるコントラスト差が明瞭に現れており、この画像では明部が A2024 部分、暗部が A1100 部分を示している。また、本観察試料作成時の FSW 条件は必ずしも最適化されたものではないため、材料内部に欠陥が生じていることもわかる。オニオンリングと呼ばれる摩擦攪拌組織は規則的な層状組織を連想させるが、A1100 と A2024 の分布をみると必ずしも規則的ではないことがわかる。断面組織の腐食観察により観察されるオニオンリング模様と、 $\mu$  CT により観察される摩擦攪拌組織との関係については今後も検討を進めるが、いずれにしても摩擦攪拌組織の可視化は可能であり、FSW 接合部の疲労き裂進展挙動について今後も検討を実施していく。



図 15 A1100-A2024 FSW 材の透過像

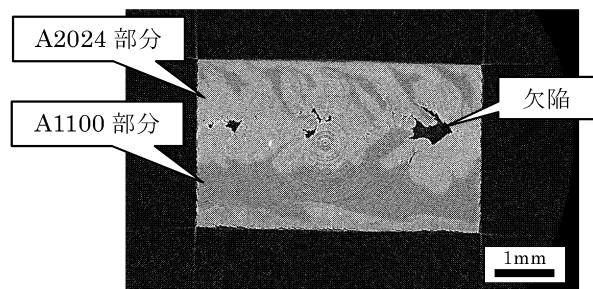


図 16 A1100-A2024 FSW 材の接合部付近の断層像 (スライス像)

## 5. 結論

1. A6061-T6 の FSW 継手材の静的強度は母材に比べて低下する。この低下率は組織硬さの低下と良く対応する。しかし平板曲げ疲労限度の低下は僅かであり、硬さの低下とは良い相関にない。
2. A6061-T6 の FSW 継手に対するレーザーピーニング処理は、平板曲げ疲労限度を改善するのに有効である。LP 処理によって、FSW 継手の疲労限度を母材以上とすることが可能である。
3. 放射光  $\mu$  CT により、FSW 継手材の摩擦攪拌組織の状態を観察することに成功し、摩擦攪拌接合の疲労き裂の進展挙動を非破壊的に調査できる可能性を示した。
4. 摩擦攪拌組織の「オニオンリング」は、必ずしも規則的な層状組織ではないことが分かった。

## 謝 辞

「一般研究開発助成」対象課題に採択していただいた(財)天田金属加工機械技術振興財団の関係各位に謝意を表す。また本研究の一部は(財)高輝度光科学研究センター(JASRI)の大型放射光施設(SPring-8)の産業用ビームライン(BL19B2)で実施した課題番号 2007B1954 の成果の一部である。実験関係者各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 森久史, 野田雅史, 富永誉也: 軽金属, 57(2007), 506-510.
- 2) 後藤智彦, 坂口秀明, 佐藤広明, 山田毅, 田中大助, 原英統: 三菱重工技報, 42-5(2005), 234-237.
- 3) 武久浩之: 軽金属, 56(2006), 178-183.
- 4) 植松美彦, 戸梶恵郎, 戸崎康成, 柴田秀明: 材料, 55(2006), 49-54.
- 5) 向井成彦, 佐野雄二, 依田正樹, 千田格, 上原拓也, 山本哲夫: レーザー研究, 33-7(2005), 444-451.
- 6) 政木清孝, 熊谷洋平, 越智保雄, 松村隆, 浜口達彦: 材料, 54-12(2005), 1255-1261.
- 7) 政木清孝, 越智保雄, 熊谷洋平, 松村隆, 佐野雄二, 内藤英樹: 材料, 55-7(2006), 706-711.
- 8) 萩澤亘保, 大倉一郎, ALST 研究レポート 2, (2007)
- 9) 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎: 材料, 57-4(2008), 395-400.
- 10) 戸田裕之, 大垣智巳, 小林俊郎, I.Sinclair, P. Gregson, J.-Y. Buffiere, E,Marie: 日本材料学会第 11 回破壊力学シンポジウム講演論文集, (2003) 65-70.
- 11) 塩澤大輝, 中井善一, 森影康, 田中拓, 尾角英毅, 宮下卓也: 日本機械学会論文集, A 編, 72-724,(2006) 1846-1852.