

SPring-8利用推進協議会 金属材料評価研究会(第11回)
研究社英語センタービル 地下2階大会議室 2016年2月1日

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-

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

沖縄工業高等専門学校
政木清孝

東芝(現JST)
佐野雄二



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography: CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

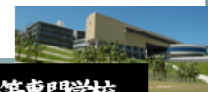
き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography: CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

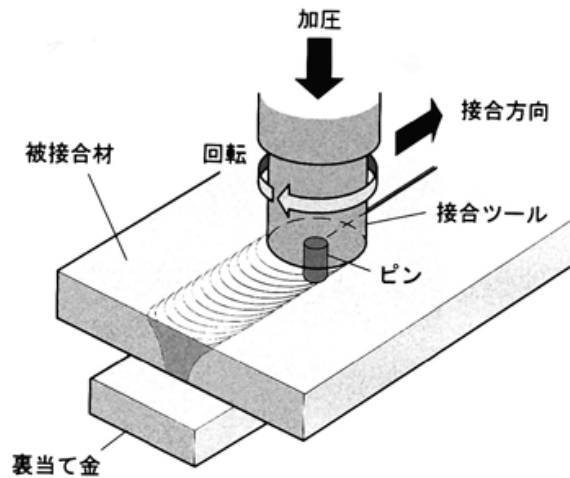
内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW)



攪拌ツール(先端に突起のある円筒状工具)

➡ 回転させながら部材に押し付け

➡ 摩擦熱による母材の軟化

➡ 工具の回転に伴う塑性流動 ➡ 接合

アルミニウム合金, 異種材料の接合方法として注目



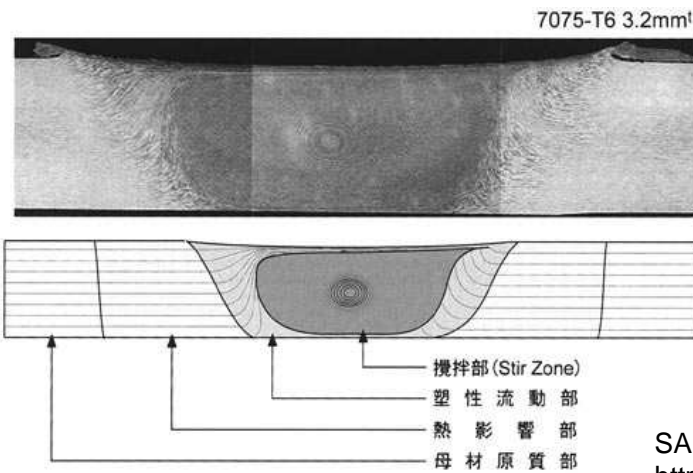
➡ 各種輸送機器, 機械構造物へ適用

FSW継手材の疲労特性評価 ➡ 重要

✦ 疲労き裂進展挙動の解明が必要

非破壊でのき裂進展挙動調査 ➡ 有用

放射光を用いた断層撮影技術の利用に期待



SANPO web 情報記事 | Q&A溶接入門講座 | FSW (摩擦攪拌溶接) 第1回
http://www.sanpo-pub.co.jp/omoshiro/qanda/fsw_1.html



Okinawa National College of Technology



国立沖縄工業高等専門学校

講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography: CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

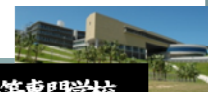
き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

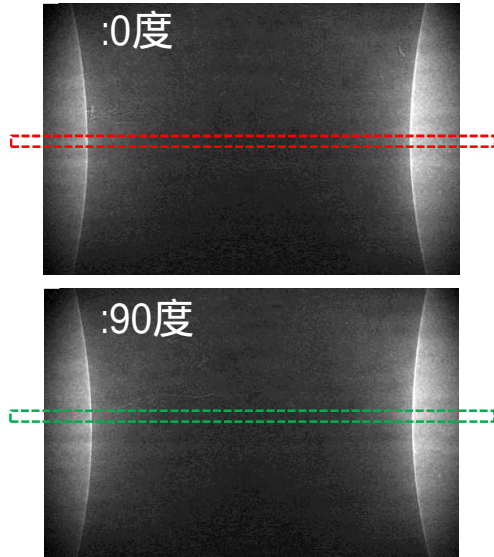
内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ

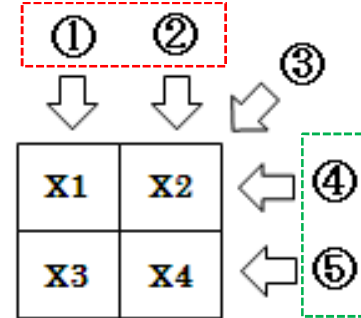


断層撮影技術 (Computing Tomography:CT)



➡ X線透過像からの再構成

ラインプロファイル



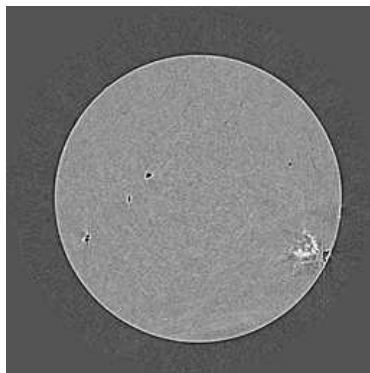
$$\begin{aligned} X1+X3=C1 & \dots(1) \\ X2+X4=C2 & \dots(2) \\ X2+X3=C3 & \dots(3) \\ X1+X2=C4 & \dots(4) \\ X3+X4=C5 & \dots(5) \end{aligned}$$

ラインプロファイル

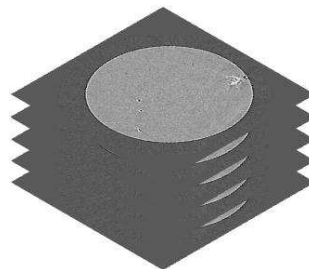
X_n : 線吸収率

連立方程式を解く

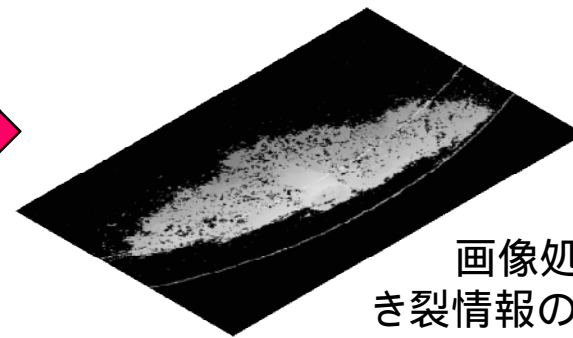
➡ 各部位の線吸収率が求まる



任意の断層撮影像 (スライス) の作成



スライスの積層 三次元化

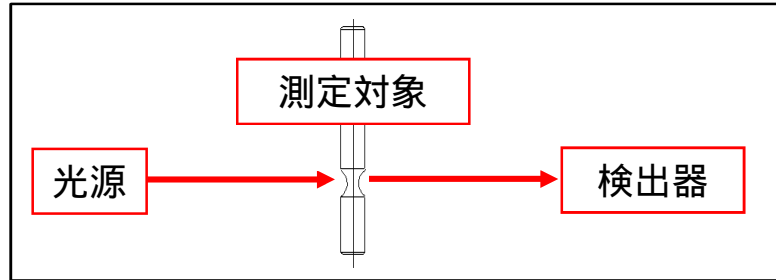


画像処理
き裂情報の可視化

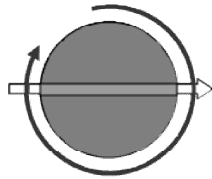


断層撮影技術とFSW継手材

✧丸棒試料

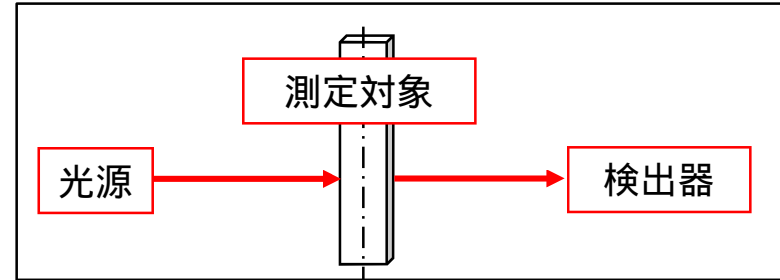


X線透過距離

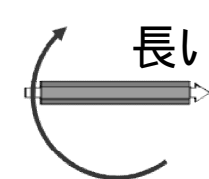
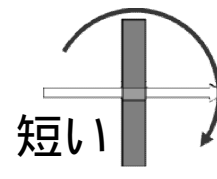


試料の回転中
ほぼ一定

✧平板試料(FSW継手) ➡ 不向き

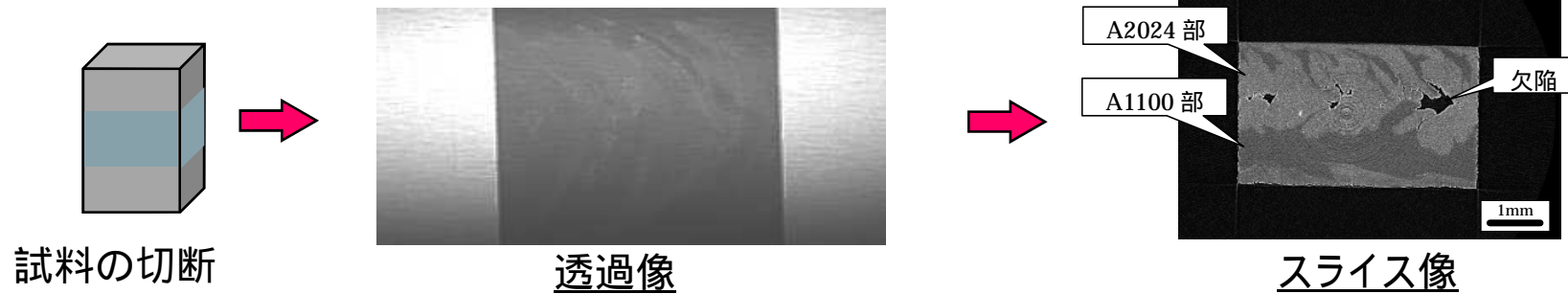


X線透過距離



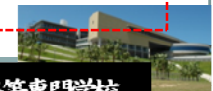
➡ 透過情報量
不足

FSW材のCT観察の試み(初期)



✧ FSW材の内部情報を非破壊で知る有力なツールとなる

✧ 小寸法試験片ではFSW材のき裂進展挙動を評価できない



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



ラミノグラフィ (Laminography)

X線ラミノグラフィ (X-ray Laminography)

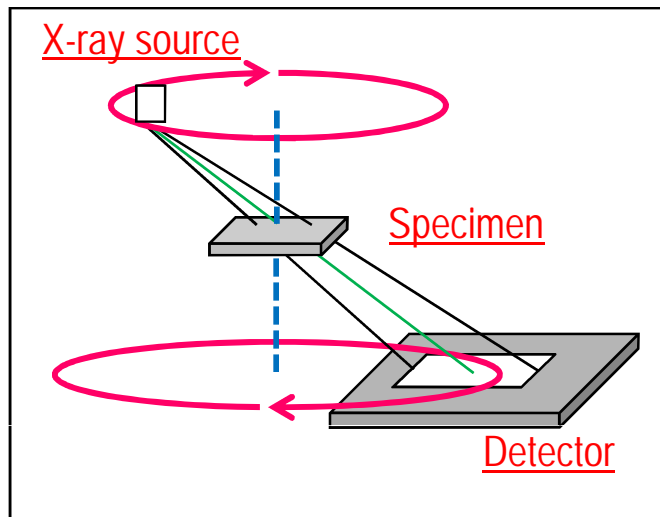
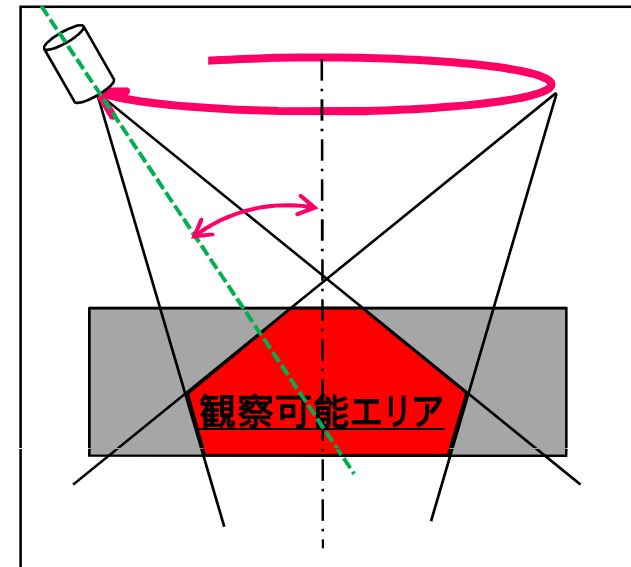


Fig. Schematically image of X-ray laminography



X線を利用する場合

観察対象	固定
X線源	} 同期して旋回
検出器	



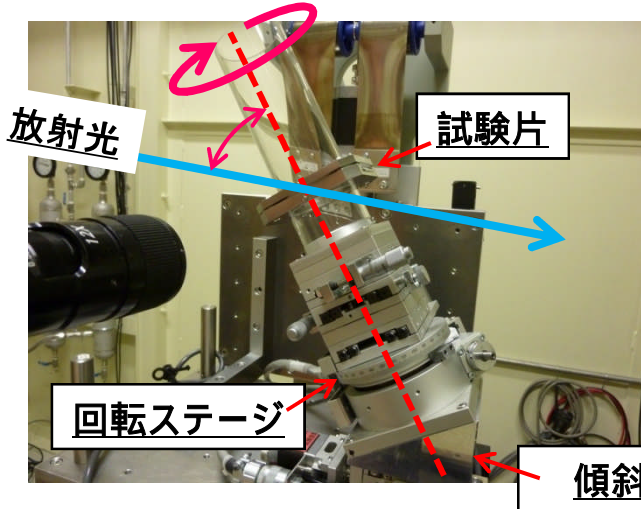
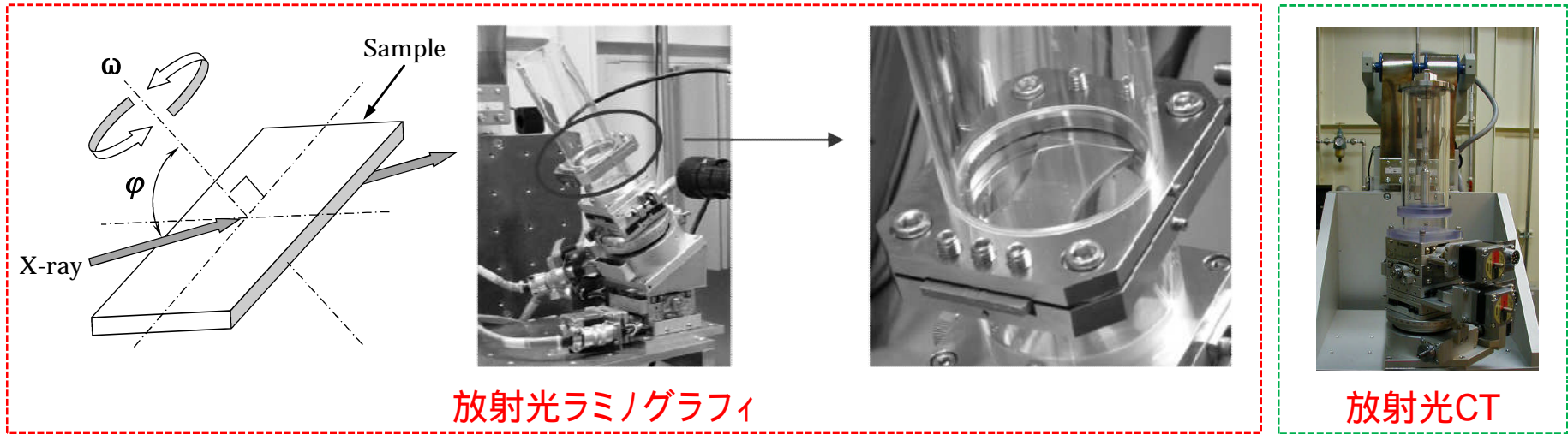
SPring-8 で行うには....

観察対象	光軸に対して__傾斜可能
光源	} 回転させる事は不可能
検出器	

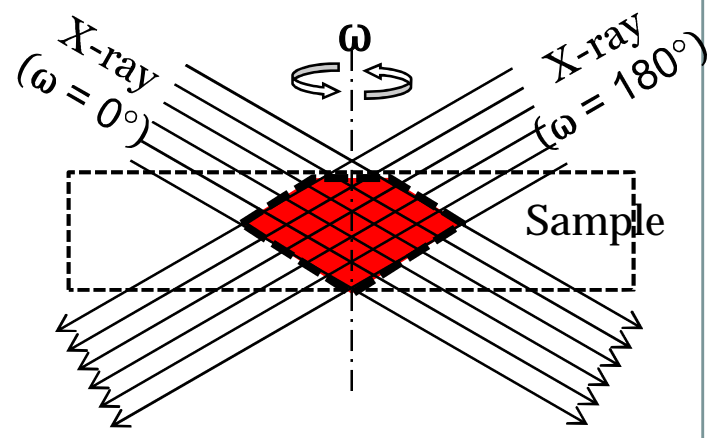


ラミノグラフィ (Laminography)

放射光ラミノグラフィ (Laminography with Synchrotron Radiation)



回転ステージ
垂直に対して傾斜
光軸と回転軸の傾斜
:60度



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

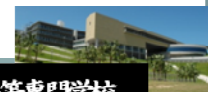
き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



摩擦攪拌接合材の作成

展伸用アルミニウム合金

A6061-T6 (Al-Mg-Si系) (thickness 3mm)

A2024-T351 (Al-Cu系) (thickness 3mm)

Table 1 Chemical compositions. (wt %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A6061	0.65	0.20	0.30	0.06	1.04	0.13	0.04	0.02	BAL
A2024	0.04	0.05	4.2	0.51	1.4	0.02	0.06	0.01	BAL

Table 2 Mechanical properties.

	Tensile strength [MPa]	Proof strength [MPa]	Elongation [%]
A6061	336	318	15.7
A2024	440	295	15

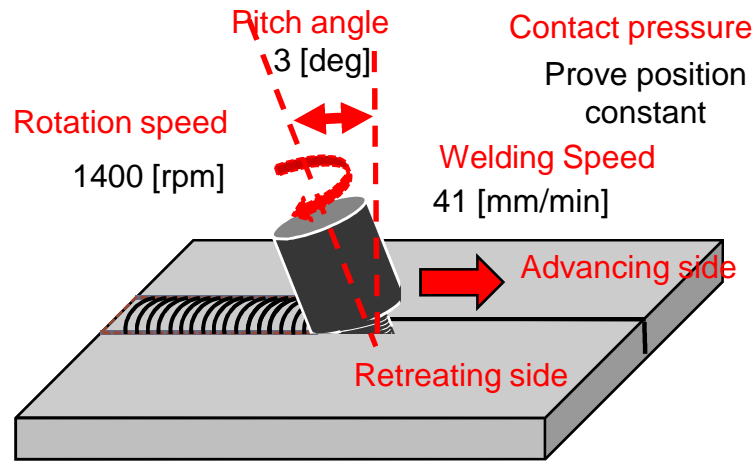
FSW接合



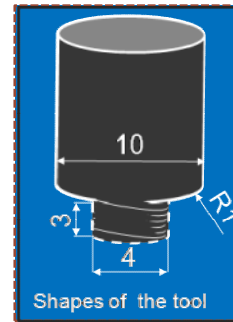
異材FSW継手



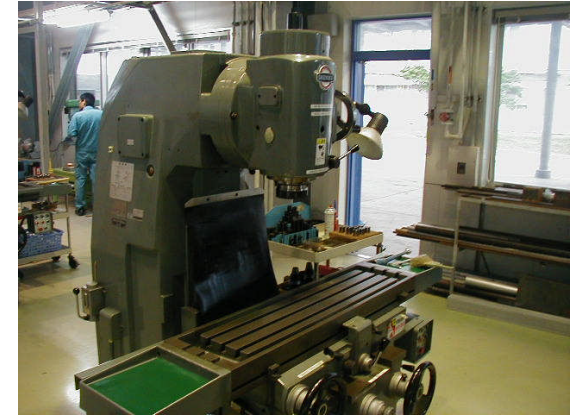
摩擦攪拌接合材の作成



接合条件



ツール形状



使用装置



接合状況



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

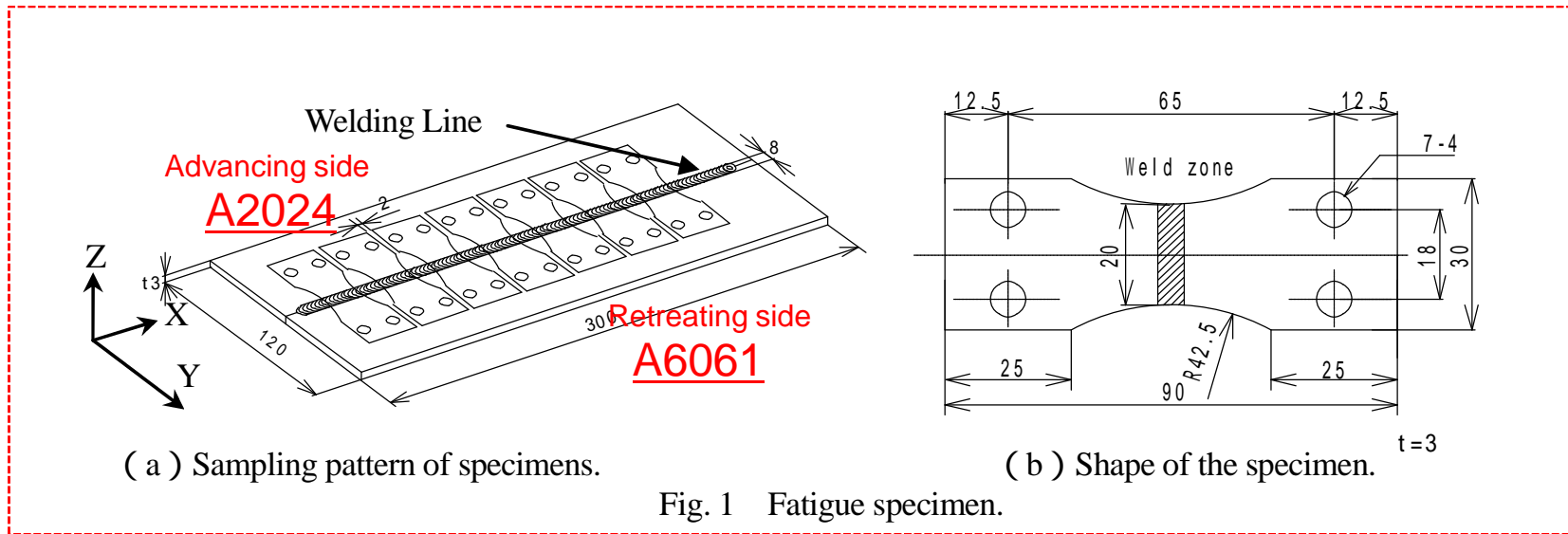
内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



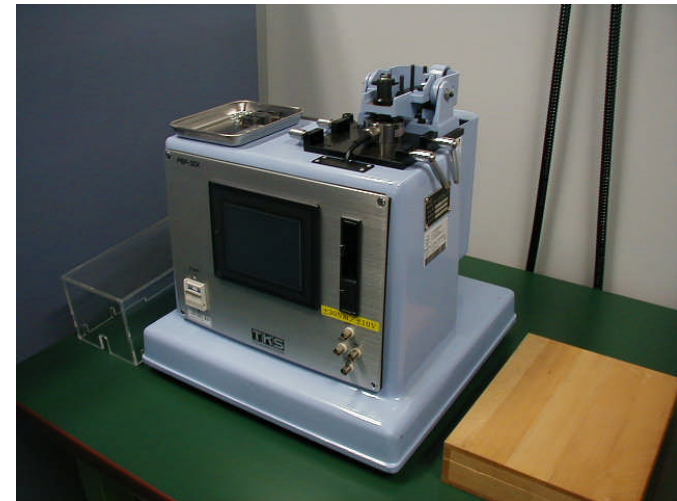
疲労試験片および疲労試験条件



疲労試験条件

平面曲げ疲労試験機 (東京衡機 , PBF-30X)

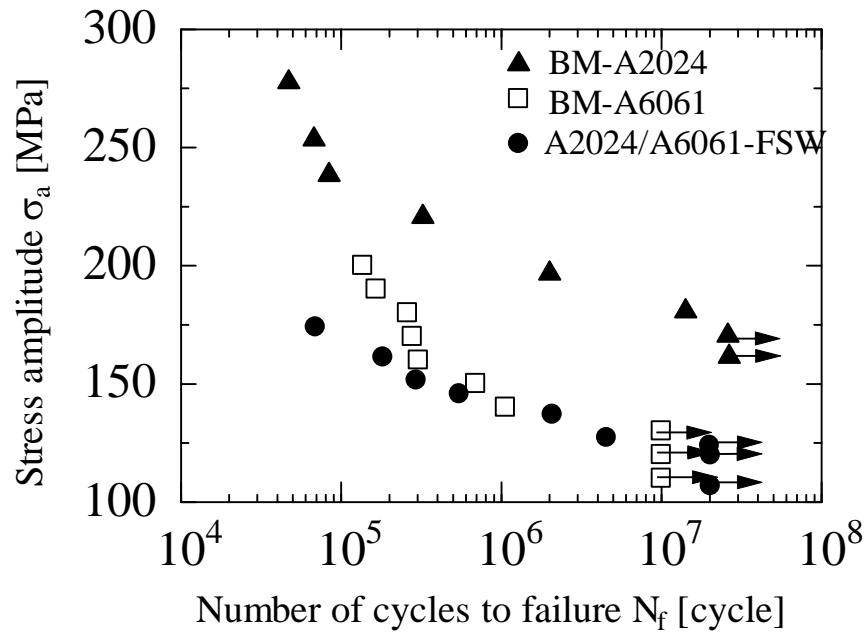
- ✧ 負荷繰返し速度 : 22Hz
- ✧ 変位制御(変位一定)



疲労試験機



疲労試験結果(基礎特性)



2x10⁷回疲労強度

- ✦ BM-A2024 ➡ 約170MPa
- ✦ A2024/A6061-FSW ➡ 約130MPa
- ✦ BM-A6061 ➡ 約125MPa

有限寿命域特性

A6061に従う

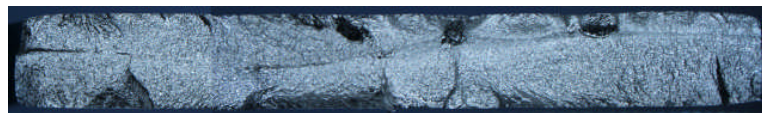
A2024/A6061-FSW

高応力域 → 短寿命化

高応力域

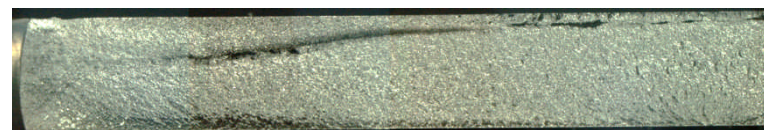


BM-A6061 ($\sigma_a=180\text{MPa}$, $N_f=2.6 \times 10^5$ cycle)

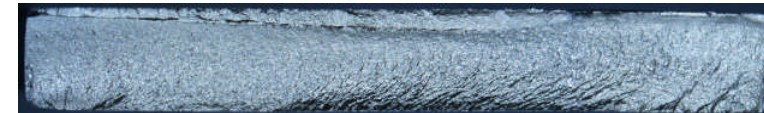


A2024/A6061-FSW ($\sigma_a=174\text{MPa}$, $N_f=6.93 \times 10^4$ cycle)

低応力域



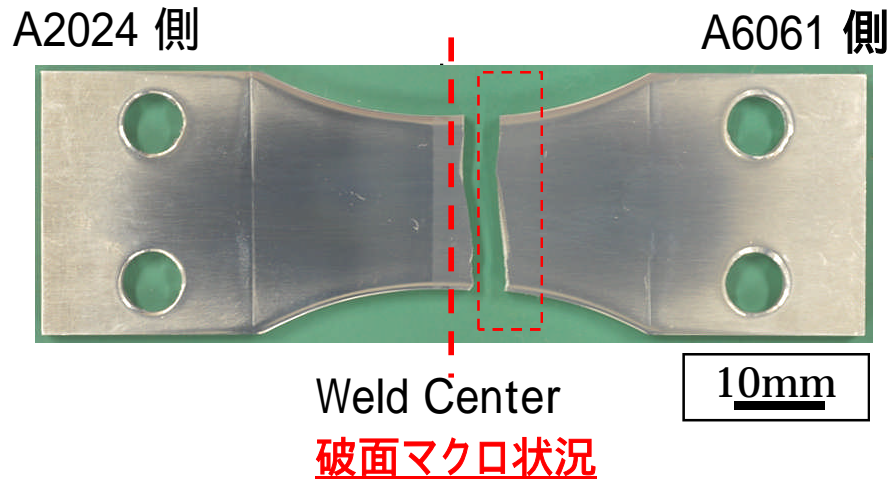
BM-A6061 ($\sigma_a=140\text{MPa}$, $N_f=1.6 \times 10^6$ cycle)



A2024/A6061-FSW ($\sigma_a=127\text{MPa}$, $N_f=4.55 \times 10^6$ cycle)

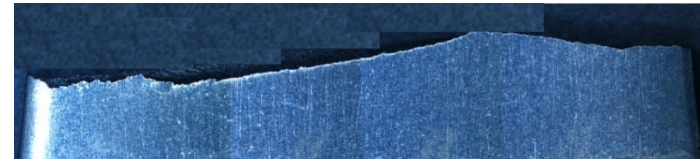


疲労試験結果 (破断位置と硬さ)



起点位置

➡ A6061側に中心から約3~5mm



破面拡大

き裂進展 ➡ 屈曲

中心付近の組織硬さ

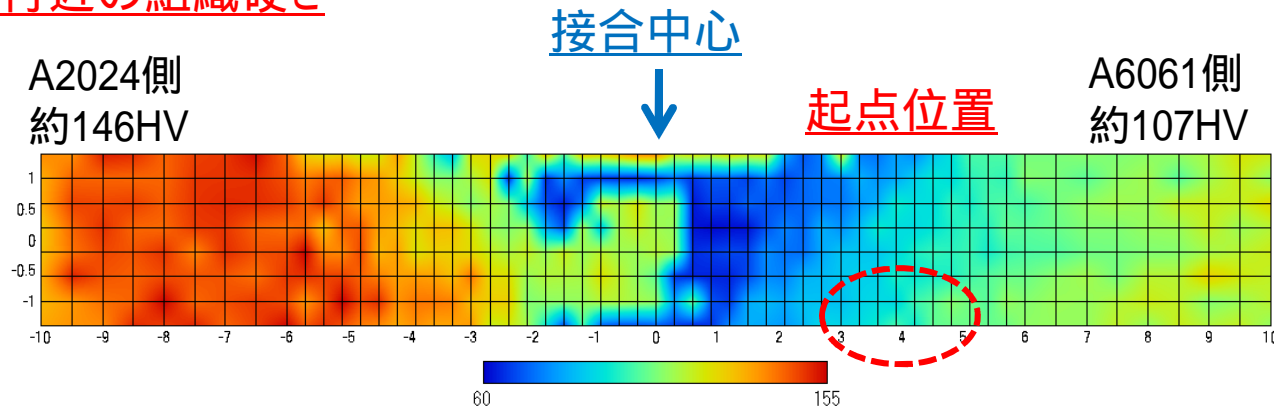


Fig. Vickers hardness distribution of specimen

疲労強度

A6061側の特性に従う ➡ 組織硬さの影響

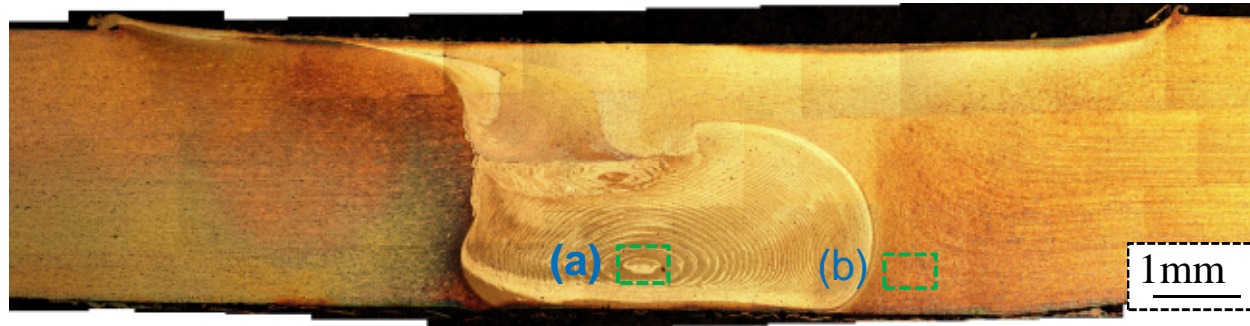


組織の攪拌状況

✦ 接合まま (表面の切削加工無し)

A2024 側

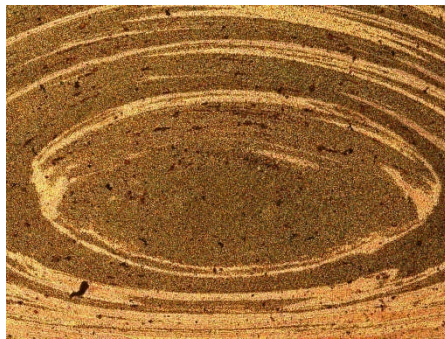
A6061 側



オニオンリング

接合中心

破断位置

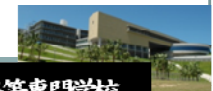


(a) 攪拌部 (SZ領域)

(b) 加工熱影響部 (TMAZ/HAZ領域)

Fig. 異材FSW 組織観察結果

➡ 疲労き裂は、攪拌組織をどのように進展するのか？



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

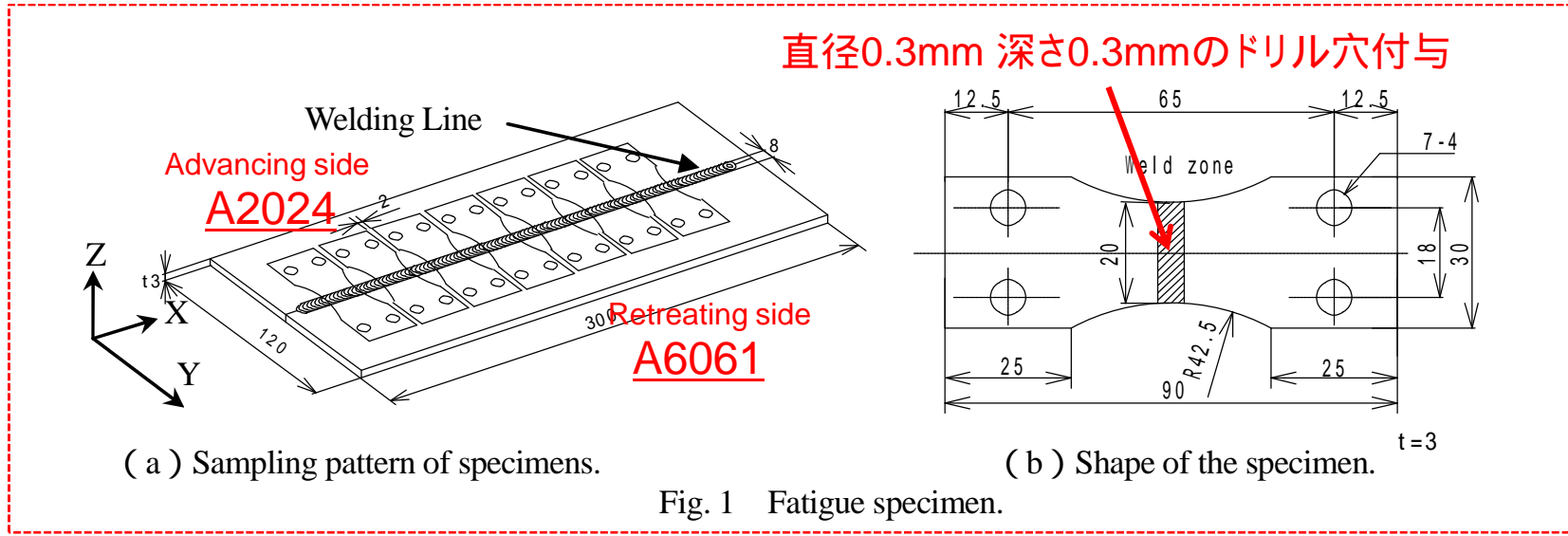
内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



き裂進展試験



疲労試験条件

平面曲げ疲労試験機 (東京衡機, PBF-30X)

負荷繰返し速度 : 22Hz

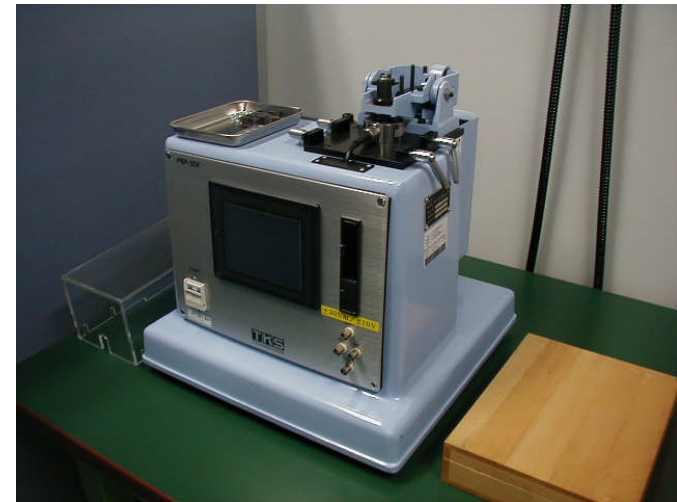
変位制御 (変位一定)

✦ 応力振幅 : 120MPa

(ドリル穴以外からき裂が発生しない)

負荷繰返し ⇄ ラミノグラフィによる観察

き裂進展挙動の断続的観察

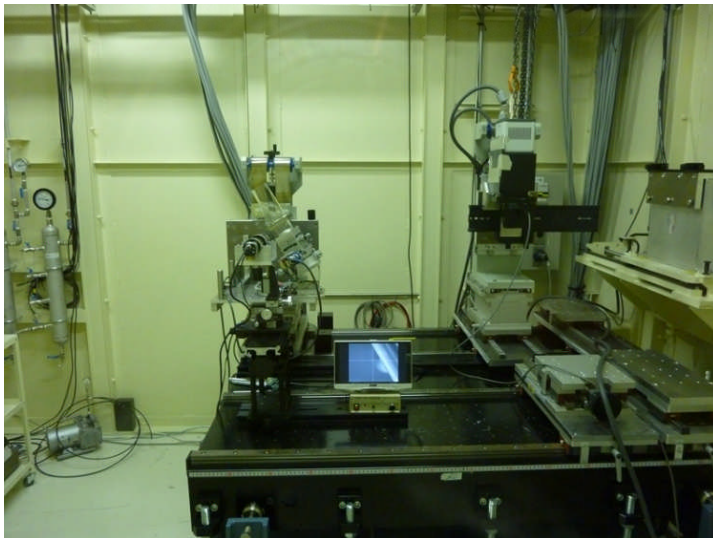
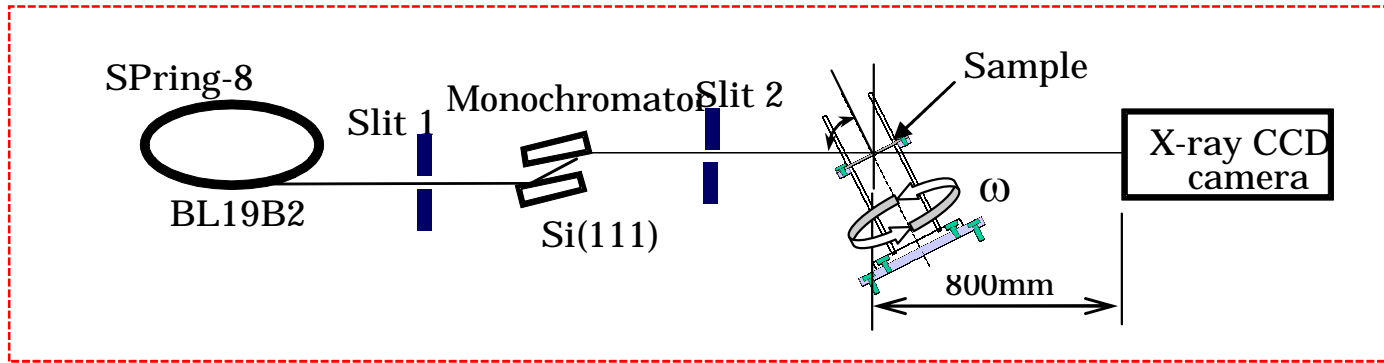


疲労試験機



き裂の観察

放射光ラミノグラフィ観察条件



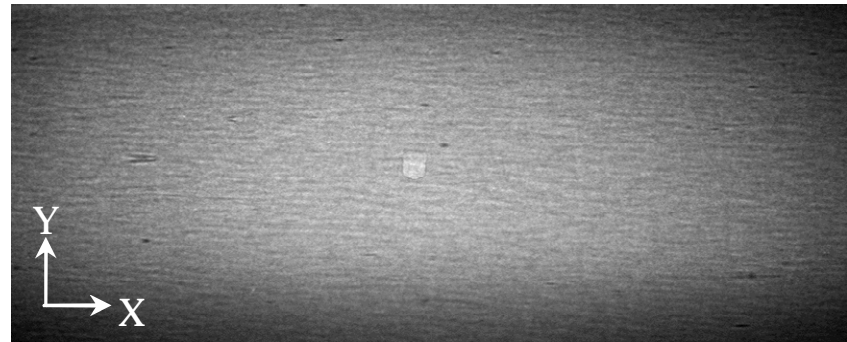
JASRI SPring-8 BL19B2 Hutch No. 1

- * X-ray Energy : 28 keV
- * Detector Distance : 800 mm
- * Step of Rotation Stage : 0.5 deg.
- * Exposure Time : 0.25 sec
- * Effective Pixel Size : 11.4 μm
- * X-Ray CCD Size : 992 x 402 pixel
- * Φ angle : 60 deg



き裂の観察

放射光ラミノグラフィ観察結果(透過像)



(a) $\omega = 0$ degree (Y-direction)



(b) $\omega = 90$ degree (X-direction)

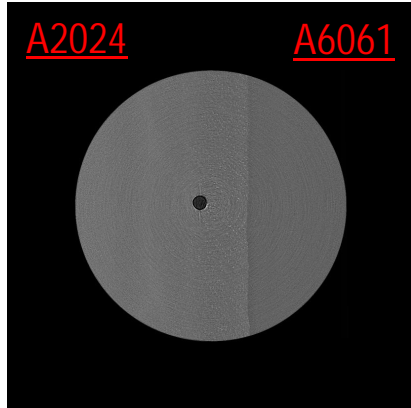
Fig. Example of transmission image of the specimen.



き裂の観察

放射光ラミノグラフィ観察結果(スライス像 1.5×10^5 cycle)

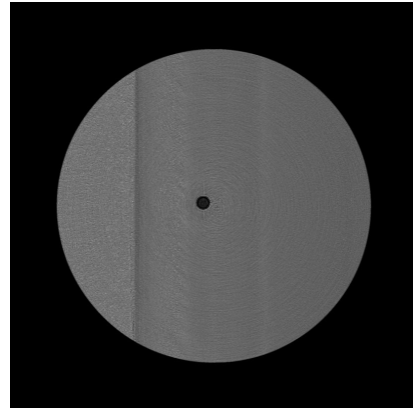
約 $5.7 \mu\text{m/slice}$



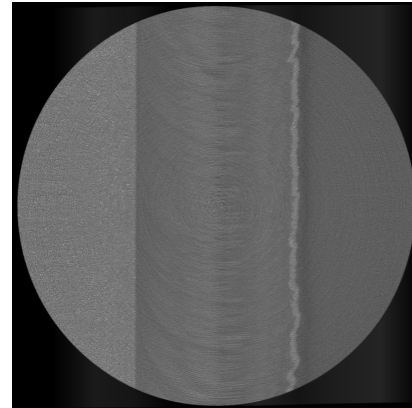
A2024

A6061

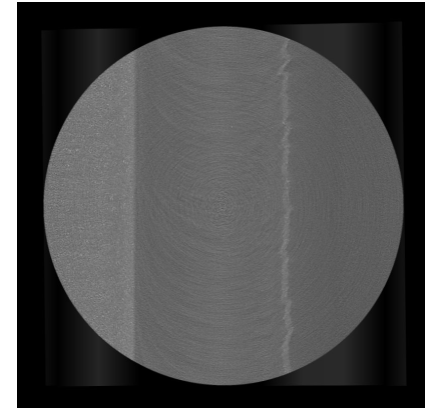
最表面



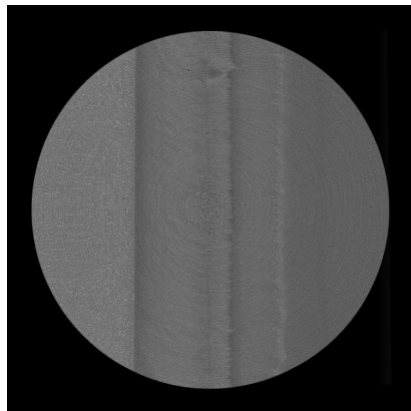
50スライス目



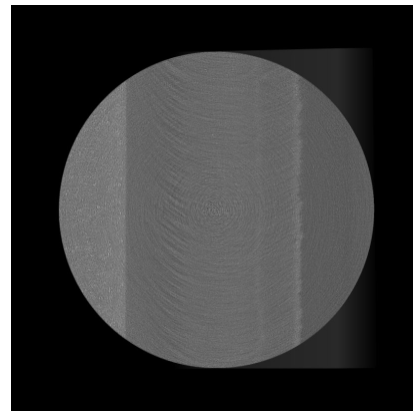
100スライス目



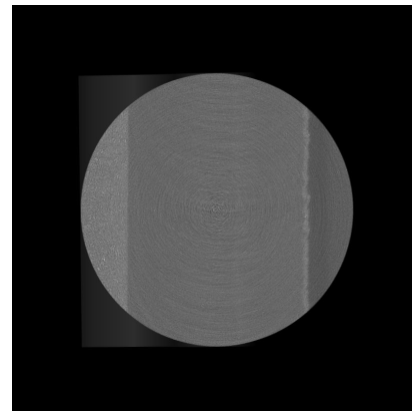
150スライス目



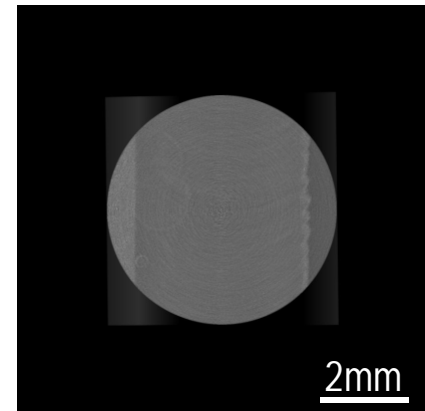
200スライス目



250スライス目



300スライス目



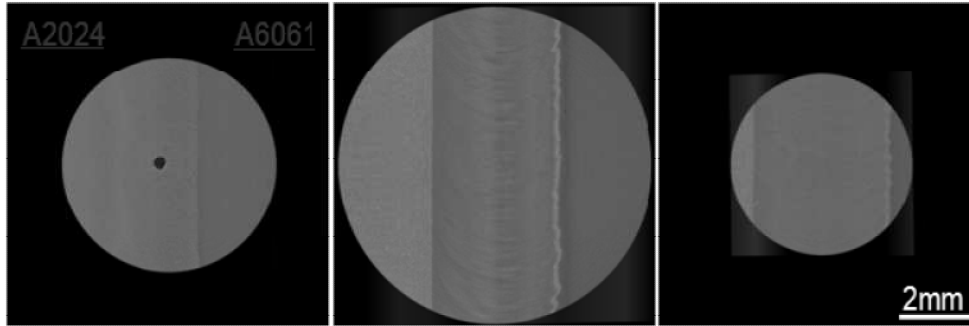
350スライス目

✦ 母材の密度によってコントラストが違う



き裂の観察

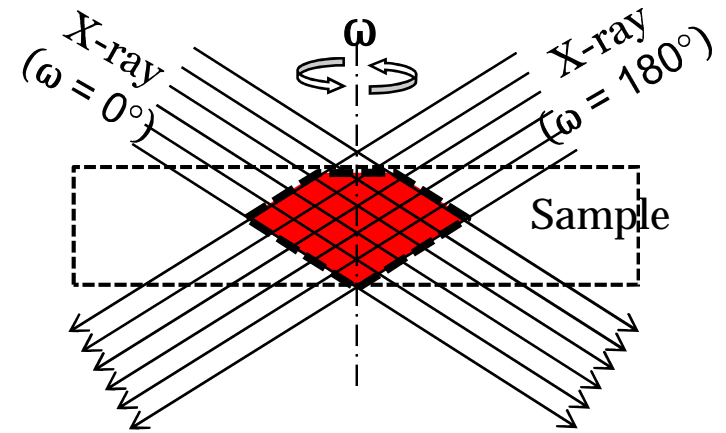
放射光ラミノグラフィ観察結果



最表面

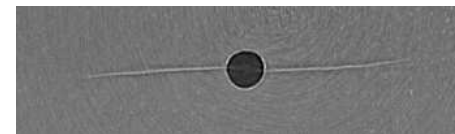
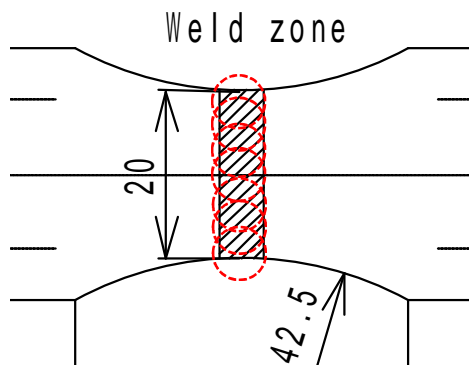
100スライス目

350スライス目



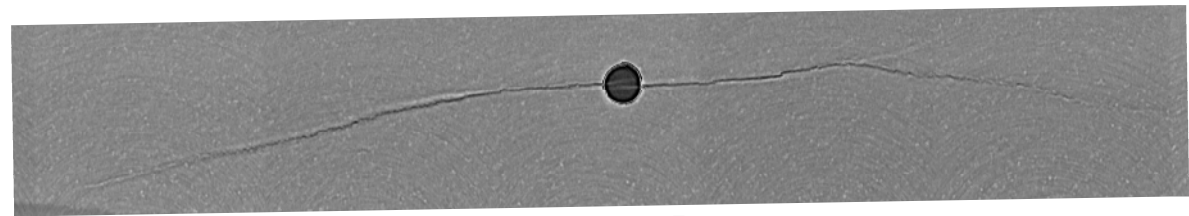
✦ 位置によって、スライス像の大きさが異なる → ラミノグラフィの原理に依存

試験片全体像を観察する → 観察位置をシフト → 画像合成



$N=3.0 \times 10^5$ cycle

1mm



$N=4.5 \times 10^5$ cycle



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography: CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

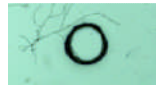
✧ まとめ



き裂の観察

表面き裂観察(レプリカ法)

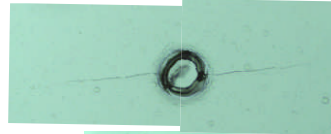
1mm



$N=1.5 \times 10^5$ cycle



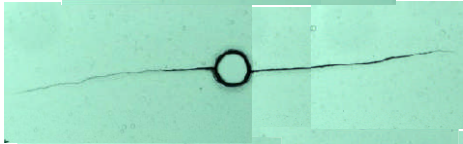
$N=2.0 \times 10^5$ cycle



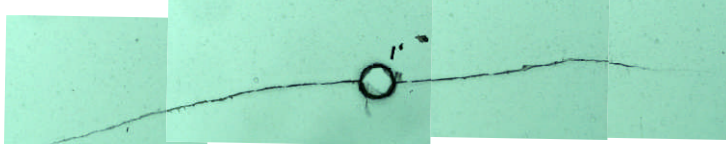
$N=2.5 \times 10^5$ cycle



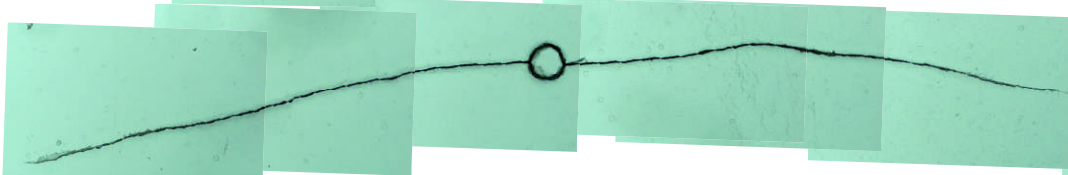
$N=3.0 \times 10^5$ cycle



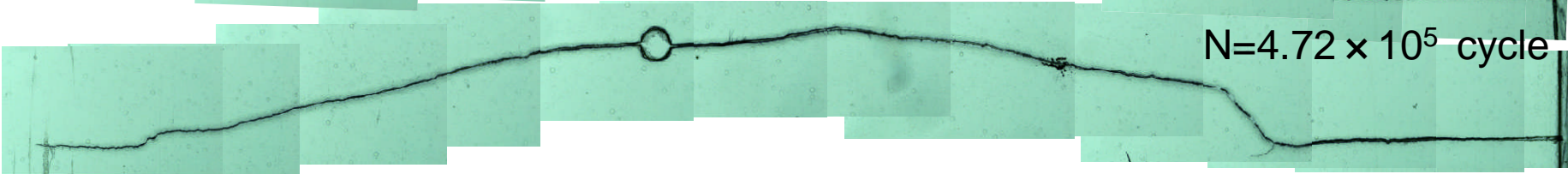
$N=3.5 \times 10^5$ cycle



$N=4.0 \times 10^5$ cycle



$N=4.5 \times 10^5$ cycle



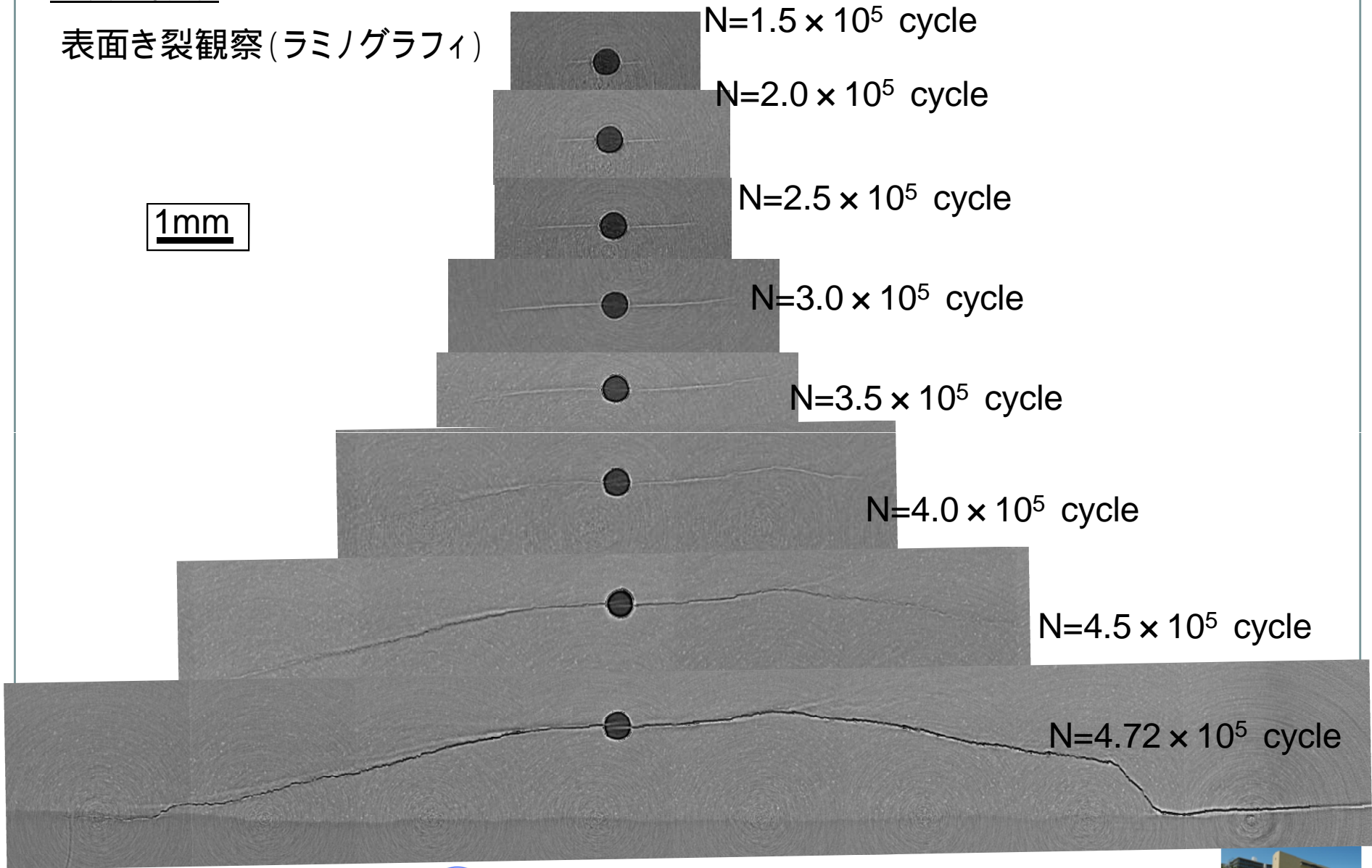
$N=4.72 \times 10^5$ cycle



き裂の観察

表面き裂観察(ラミノグラフィ)

1mm



き裂の観察

レプリカ法とラミノグラフィの比較

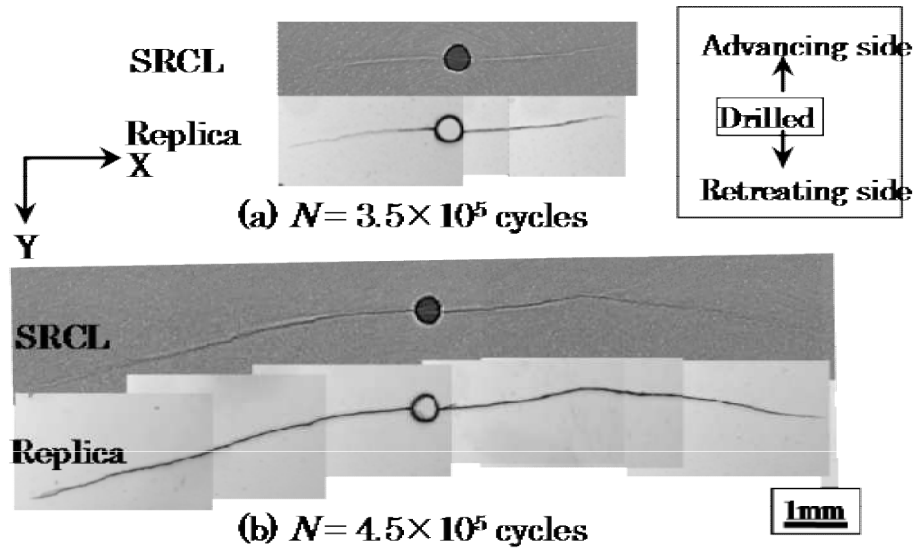


Fig. 5 Comparison of surface fatigue cracks reproduced by SRCL with replica.

き裂進展曲線

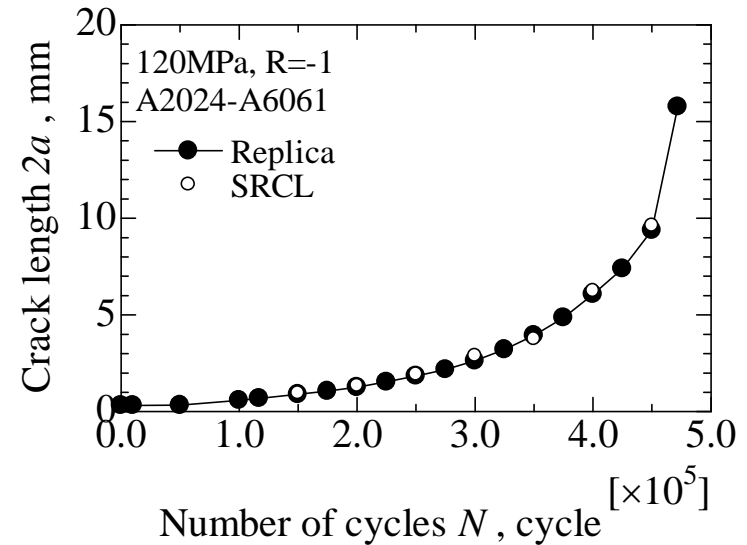


Fig. Crack propagation curve at specimen surface.

疲労き裂進展 ➡ 攪拌部 (SZ) 領域内 ➡ 前進側へ凸となるように屈曲
(摩擦攪拌組織に依存か)

✧ 表面観察像

✧ X軸方向へのき裂進展曲線

➡ 両者はよく一致



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

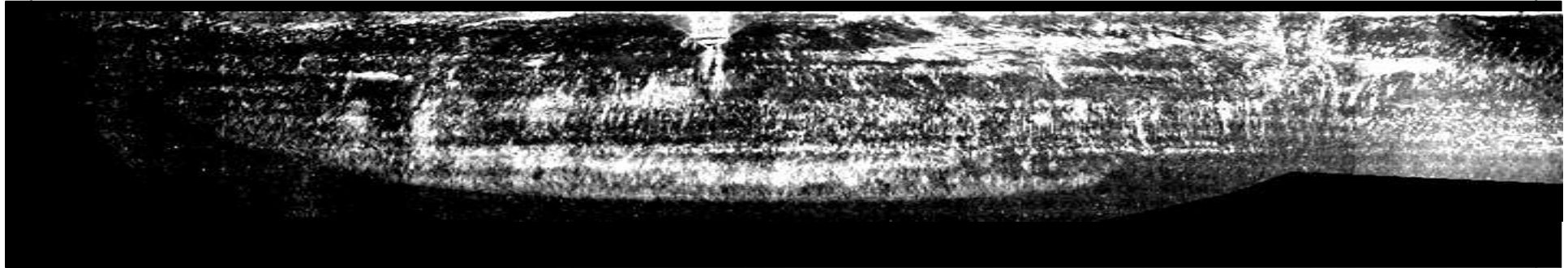
✧ まとめ



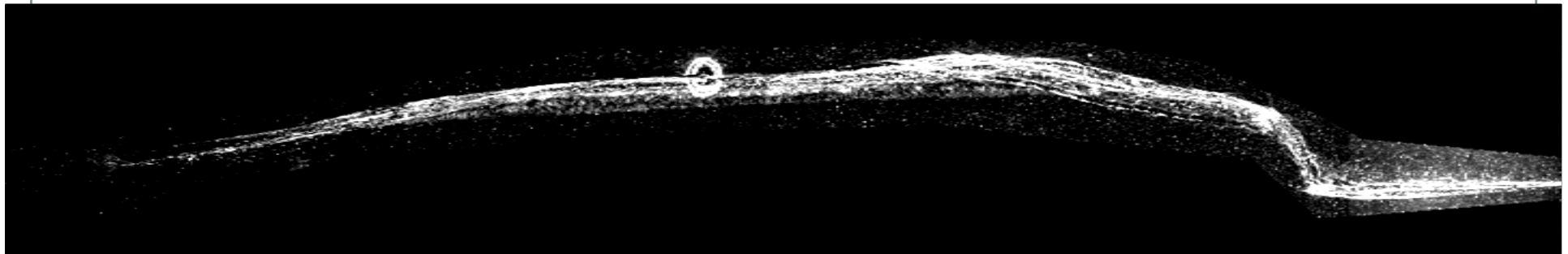
き裂の観察

き裂の可視化

き裂の成長(軸方向投影)

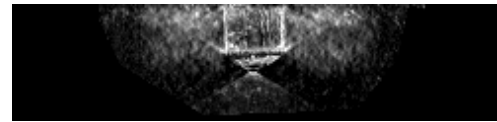


き裂の成長(板厚方向投影)

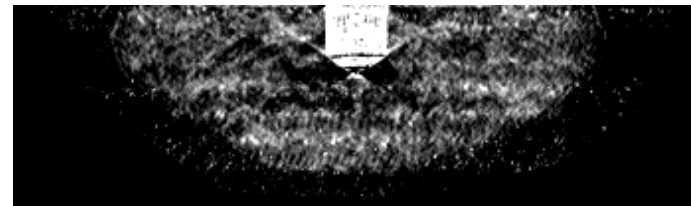


き裂の観察

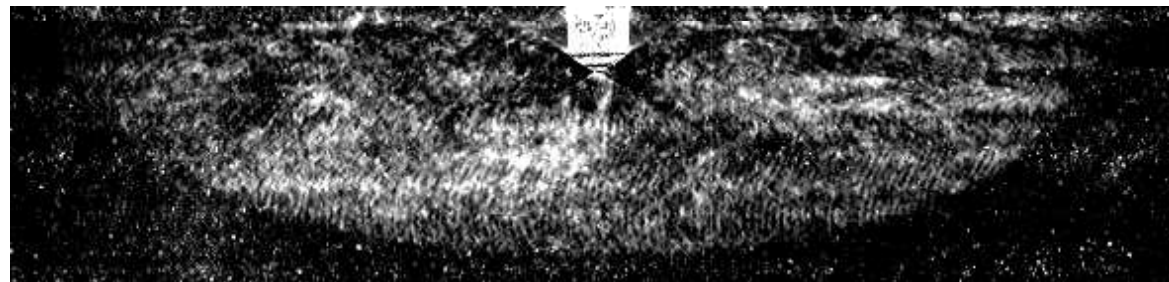
内部へのき裂進展挙動(荷重軸方向への投影)



$N=2.5 \times 10^5$ cycle



$N=3.5 \times 10^5$ cycle



$N=4.5 \times 10^5$ cycle

- 表面き裂 ➡ 大きく屈曲しながら成長
➡ 荷重軸方向への投影像 ➡ 半楕円形状
➡ Newman-Raju の式による 応力拡大係数 算定



き裂の観察

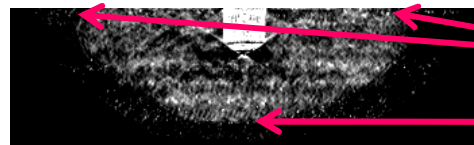
き裂進展挙動の評価(応力拡大係数)

非破壊的評価

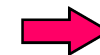
Table Calculation result of stress intensity factor.

N (cycles)	Surface crack length 2a (mm)	Crack depth b(mm)	Aspect ratio b/a	Stress intensity factor K _{max} (MPam ^{1/2})	
	SRCL(projection)	SRCL(projection)	SRCL(projection)	Inside	Surface
1.5 × 10 ⁵	0.92	0.42	0.91	2.4	3.0
2.0 × 10 ⁵	1.45	0.62	0.85	2.7	3.6
2.5 × 10 ⁵	2.00	0.80	0.80	2.8	4.1
3.0 × 10 ⁵	2.87	1.03	0.71	2.8	4.6
3.5 × 10 ⁵	3.96	1.22	0.62	2.8	5.2
4.0 × 10 ⁵	6.18	1.50	0.49	2.7	6.0
4.5 × 10 ⁵	9.46	1.72	0.36	2.9	7.1

応力拡大係数の変化



K_{lmax} (surface)



増加

K_{lmax} (inside)

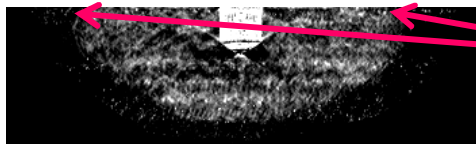
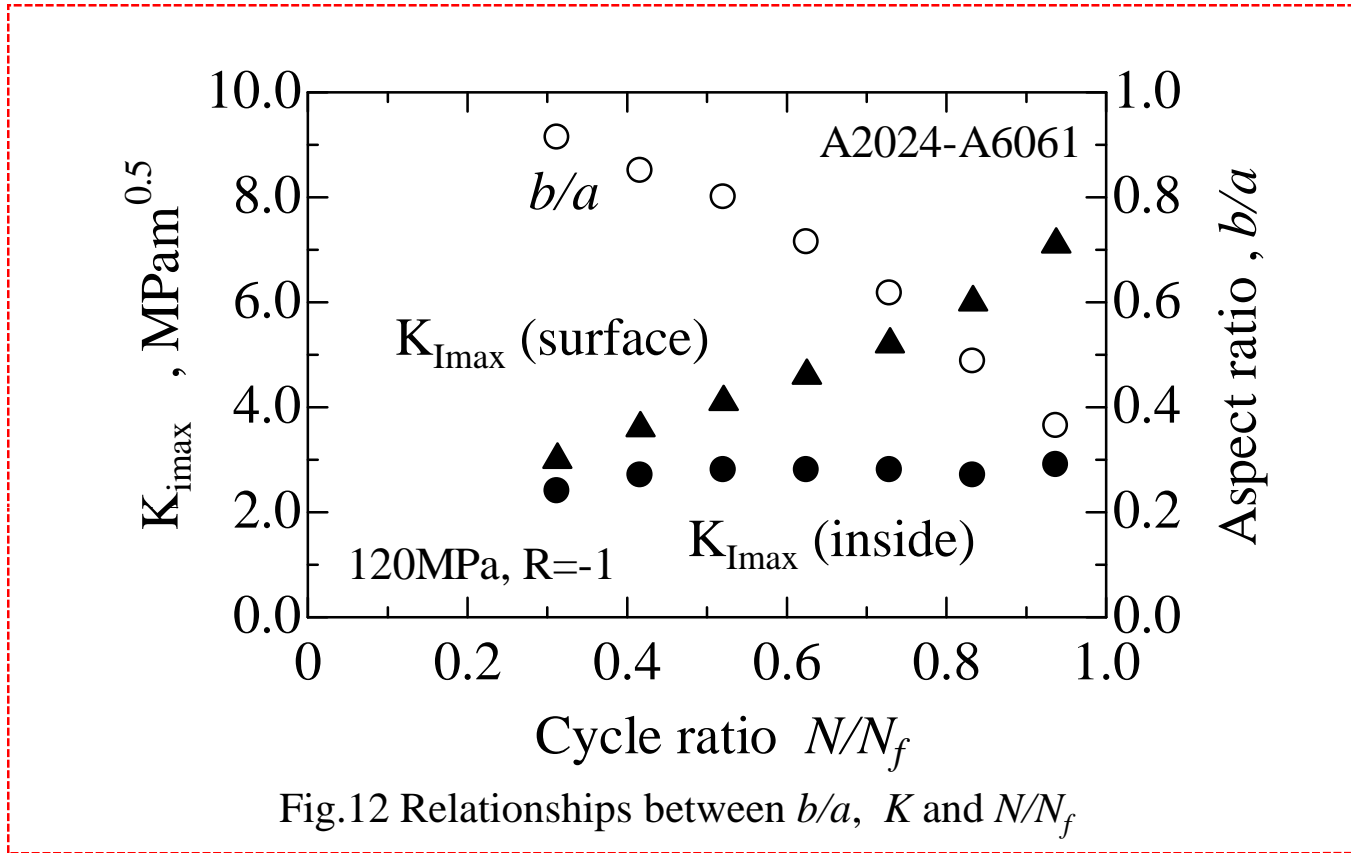


一定



き裂の観察

き裂進展挙動の評価(応力拡大係数)



K_{Imax} (surface)

➡ 表面方向への優先進展



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



き裂の観察

攪拌組織の可視化

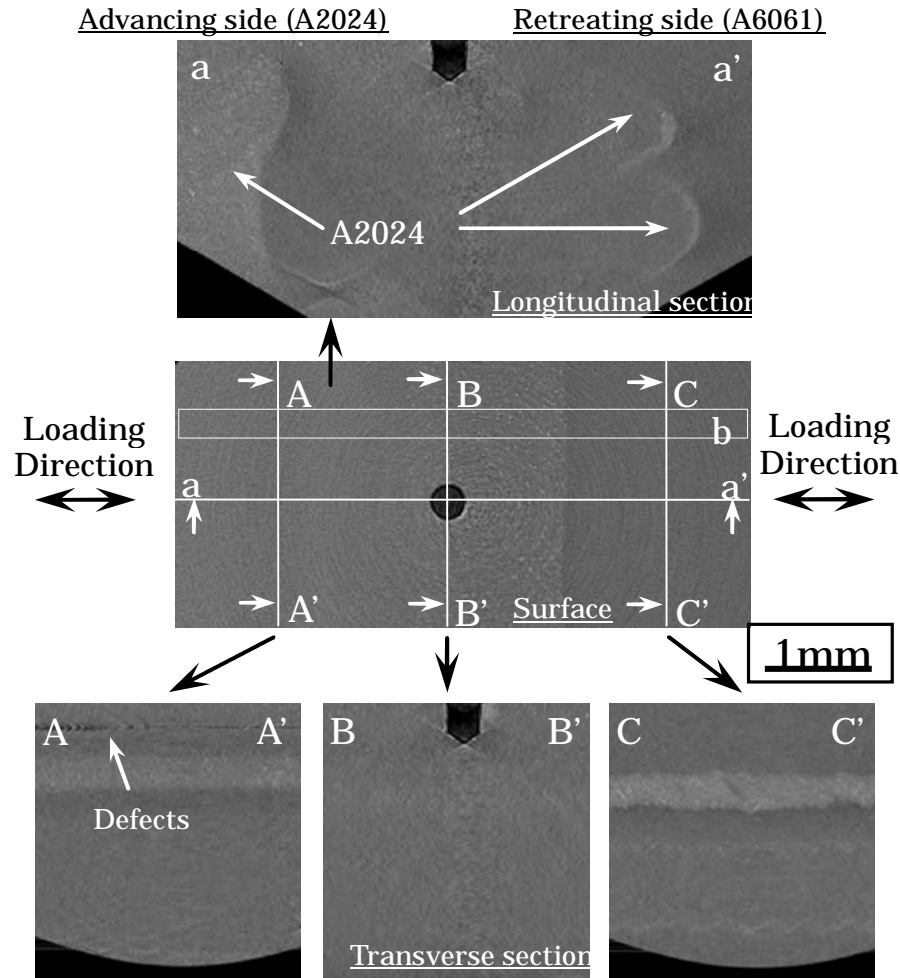


Fig.2 Cross-sectional structure visualized by SRCL.

再構成像では

吸収率が高い ➡ 高輝度(白)で表示

吸収率が低い ➡ 低輝度(黒)で表示

A2024 ➡ 白 A6061 ➡ 黒

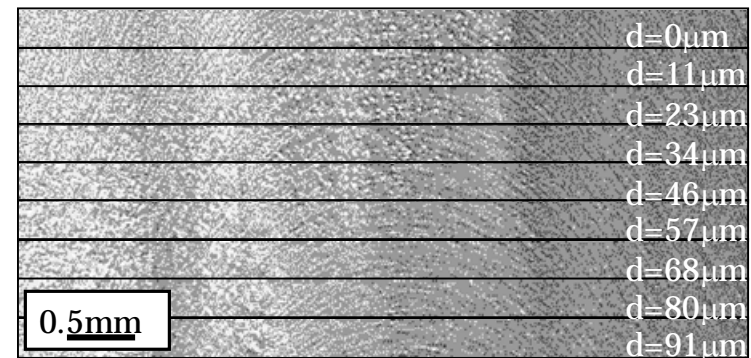


Fig.3 Change in the slice image at area b with depth.

組織の偏在, 欠陥

- ✦ 攪拌組織の可視化
- ✦ 攪拌組織の様々な情報



き裂の観察

攪拌組織の可視化

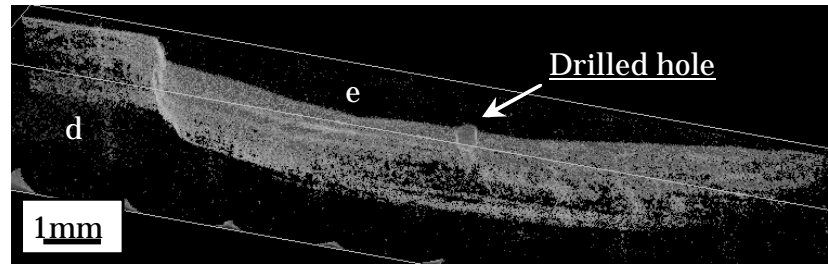
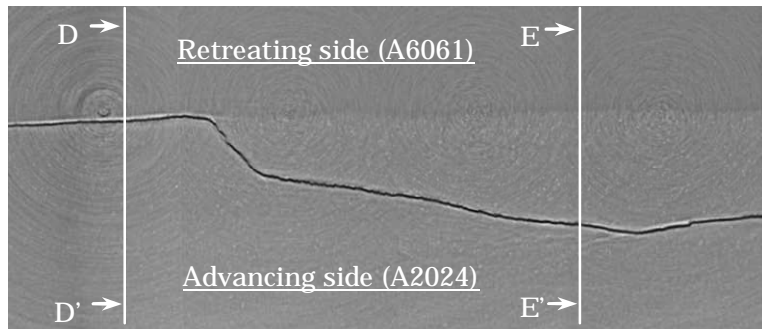
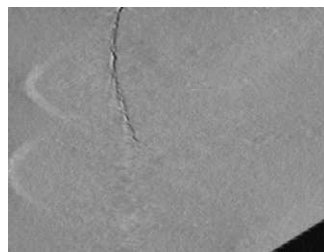


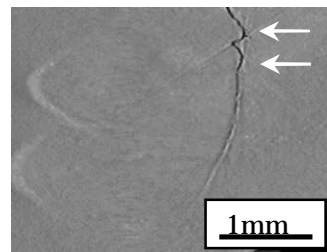
Fig.8 3D image of fatigue crack.



(a) Surface



(b) Cross section (D-D')



(c) Cross section (E-E')

Fig.9 Fatigue crack path inside the specimen.

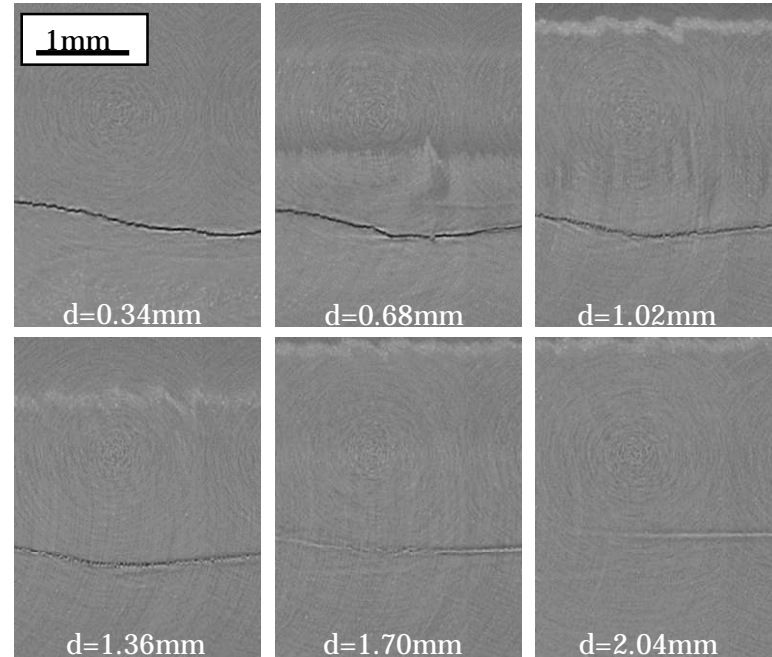
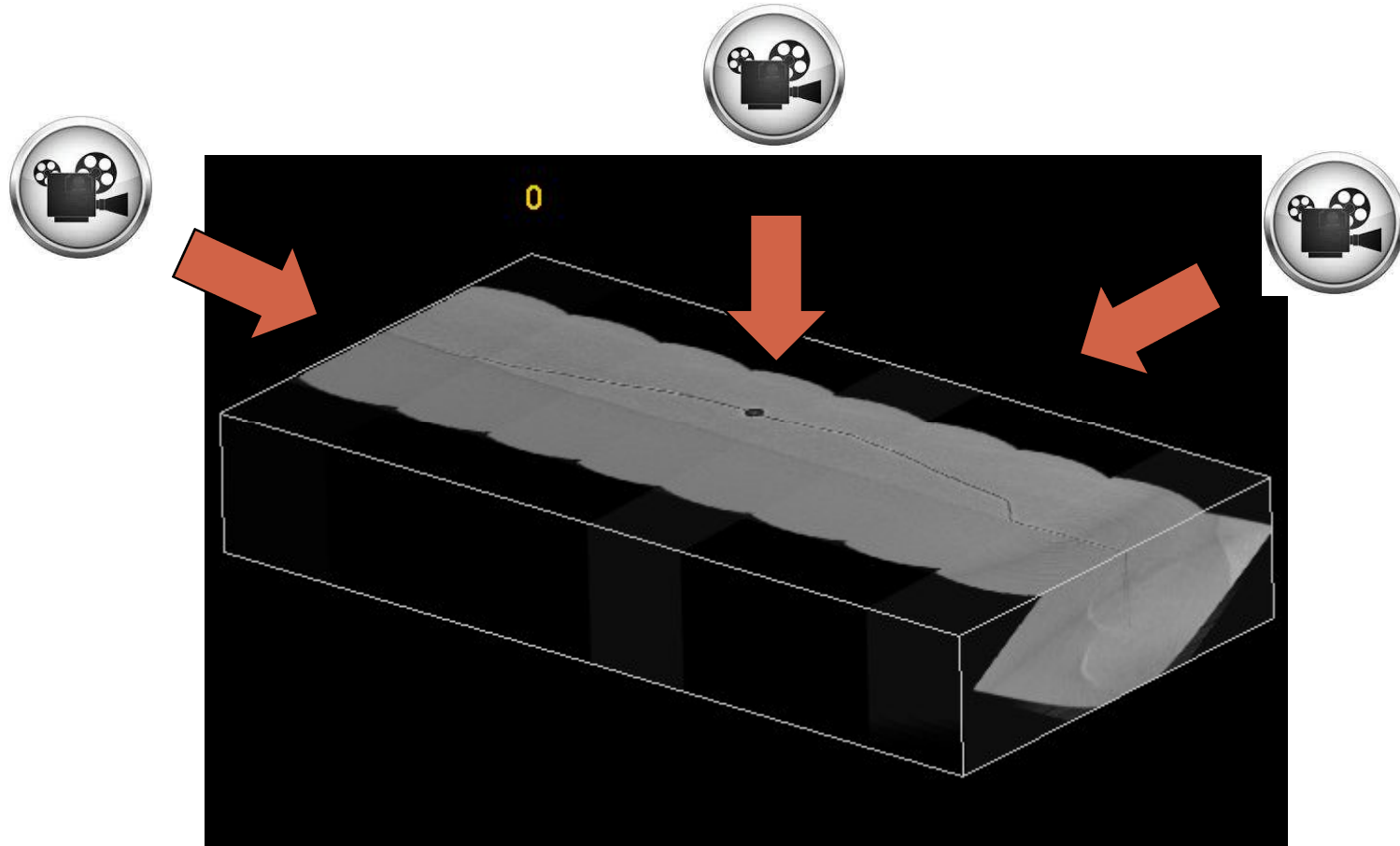


Fig.10 Slice images of stir zone inside the specimen.



き裂の観察

攪拌組織とき裂の同時可視化



講演内容 (contents)

✧ 摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW)

✧ 断層撮影技術 (Computing Tomography : CT)

ラミノグラフィ(Laminography)

✧ 異材FSW継手の疲労特性

FSW継手の作成

平面曲げ疲労特性

き裂進展試験とラミノグラフィ

表面き裂進展挙動

内部き裂進展挙動

攪拌組織とき裂進展

✧ まとめ



まとめ

- ✦ アルミニウム合金製の長尺薄肉構造物の接合方法として、摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) の適用が広がっている。FSW継手の疲労特性を評価するには、攪拌組織中を進展する疲労き裂進展挙動の把握が必要である。SPring-8におけるコンピュータ断層撮影技術の一種である「ラミノグラフィ」を適用すると、FSW継手の接合欠陥の有無のみならず、疲労き裂進展挙動と攪拌組織の同時可視化が可能である。
- ✦ A2024とA6061の突き合わせFSW接合材の平面曲げ疲労荷重下において、疲労き裂がSZ領域を成長する際には、ツールの回転により生じた強塑性流動による円弧状模様に従って、細かく屈曲しながら成長する。しかし荷重軸方向への投影形状は、綺麗な半楕円状となる。また試験片中に存在する母材の偏在の影響は顕著でないが、試験片最表面のA2024とA6061の境界は、疲労き裂発生起点となりうることがわかった。

謝辞

本研究は、公益財団法人高輝度光科学研究センター大型放射光施設の産業用ビームラインで実施した課題番号2012A1274, 2012B1740の成果の一部である。関係者に記して謝意を表す。



関連資料

- ✧ 研究概要報告書, 国際交流報告書(23)
(AF-2007013項)財団法人 天田金属加工機械技術振興財団
天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書・国際交流報告書 No.23, (2010) 39-44.
- ✧ 政木清孝, 西銘一貴, 佐野雄二, 梶原堅太郎
「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)講演論文集, 講演No.OS1505, (2013)
- ✧ 政木清孝, 佐野雄二, 梶原堅太郎, Omar Hatamleh, 佐野智一
「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講演論文集, (2014) 232-235.
- ✧ 政木清孝, 佐野雄二, 梶原堅太郎, Omar Hatamleh, 佐野智一
「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期学術講演会講演論文集, 講演No. 306, (2014)
- ✧ 政木清孝, 佐野雄二, 梶原堅太郎
「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年度秋季大会講演概要集, 講演番号241, (2015)184-186.
- ✧ SPring-8/SACLA利用研究成果集 Section B (課題番号2012B1740)
「摩擦攪拌接合継手における疲労き裂進展挙動のラミノグラフィによる非破壊観察」
Vol.3 No.2, (2015) 513-516.
- ✧ 木村聖光, 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)講演論文集, 講演No.GS0212-239(2015)

