

屈折イメージングおよびマイクロCTによる 構造材疲労き裂の可視化

佐野 雄二(0007370) 内藤 英樹(0013596)

株式会社 東芝 電力・社会システム技術開発センター

政木 清孝(0016345)

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 知能機械工学専攻

田中 寛大(0014174) 高橋 和馬(0016143)

武蔵工業大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻

1. はじめに

構造材料の損傷は、表面を起点として発生する 경우가殆どである。このため航空機や自動車部品では、熱処理やショットピーニングを施して部材の表面を強化し、疲労特性の向上を図っている。また最近では、材料自身の高強度化が進み、レーザピーニング (Laser peening) など、効果の著しい表面処理技術も開発・適用されている。その結果、構造部材は従来の高サイクル疲労の領域 ($\sim 10^7$) を超える超高サイクル疲労の領域 ($> 10^7$) で使用されるようになってきている。

一般に、表面き裂の検出は比較的容易であるため、構造物等の設計には、き裂の発生を許容した損傷許容設計が行われることが多い。しかしながら表面処理を施すと、表面におけるき裂の発生および進展挙動が従来とは異なってくるため、表面処理材におけるき裂の挙動を定量的に評価する手法の確立が、重要な課題となっている。

本研究は、SPRING-8の高輝度・高エネルギーで平行性の高いX線ビームを使用して疲労損傷を受けた表面処理材のき裂の進展を非破壊で可視化することにより、レーザピーニングなどの表面処理技術の有効性を確認するとともに、有限要素解析などを駆使したき裂の進展予測技術を確立することを目的としている。更には、これらの技術を確立することにより、発電・社会インフラ設備、回転機、自動車・車両部品など、高サイクル疲労が問題となる製品の設計技術を高度化し、製品信頼性の向上に資することを目的としている。

その第一歩として 2005B では、材料と空隙 (き裂) に対するX線屈折率のわずかな違いを強調する屈折コントラスト法 (位相コントラスト法) とマイクロCT (μ CT) 技術を使用して、自動車用鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) 試験片の微細な疲労き裂の可視化を行い、レーザピーニングによるき裂の進展抑制効果を確認した。ここでは、その概要を報告する。

2. 試験片およびレーザーピーニング処理

供試材には、X線が透過しやすい Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) を使用した。鋳造インゴットから、**図1**に示す形状および寸法の試験片を作製した¹⁾。次に、試験片切欠き部の中央にドリルで直径 0.3 mm、深さ 0.3~0.5 mm の穴を開け、回転曲げにより 130 MPa の疲労負荷を与えて長さ (2a) 約 2.5 mm の予き裂を周方向に導入した。予き裂導入後、試験片を疲労試験機より取り外し、予き裂導入部分にレーザーピーニング処理²⁾を施した。レーザーピーニング処理は材料表面のコーティングなしで行い、パルスエネルギー 100 mJ、照射スポット径 0.6 mm、照射密度 27.3 pulse/mm² (カバーレージ 770%) とした。

その後、参照材 (レーザーピーニング処理なし) を再度試験機に取り付け、き裂長さが 4~5 mm となるまで疲労試験を継続した。レーザーピーニング処理材については、参照材の負荷繰返し数と同程度の疲労負荷繰返しを与えた。疲労き裂の透過像を各方向から観察するため、疲労き裂を含むように試験片の中央部分からタブレットを切り出し、屈折イメージングおよび μ CT 用の試験片として使用した。

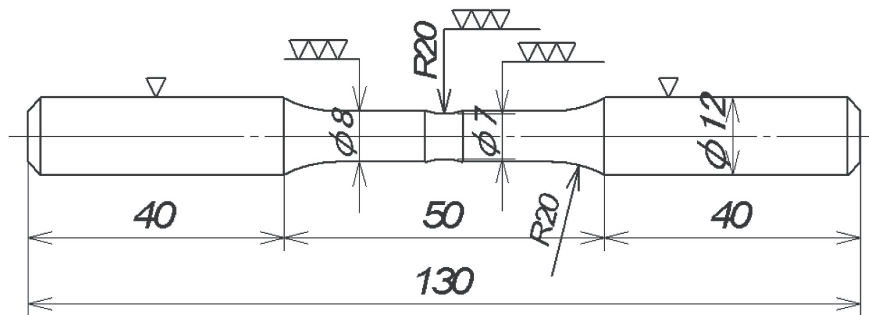


図1 試験片の形状および寸法(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)

3. 屈折イメージングによる疲労き裂の可視化

3.1 測定方法

屈折コントラスト法 (位相コントラスト法) を使用して、疲労き裂のイメージングを試みた。異なる方向からき裂の透過像を観察するため、**図2**に示すとおり疲労試験片の中央部からき裂を含むようにタブレットを切り出し、使用した。試験片タブレットの設置状況を**図3**に示す。

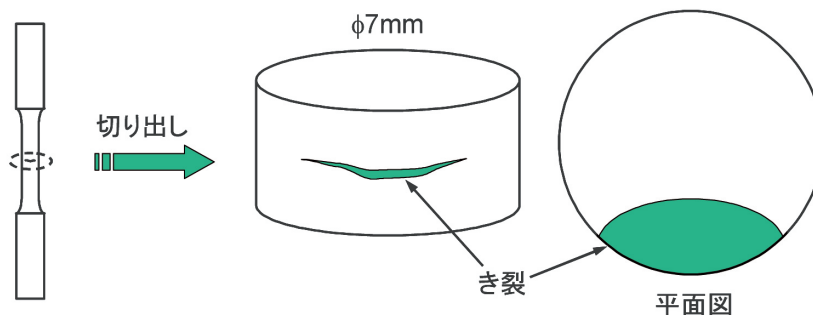


図2 屈折イメージング用試験片の作製方法

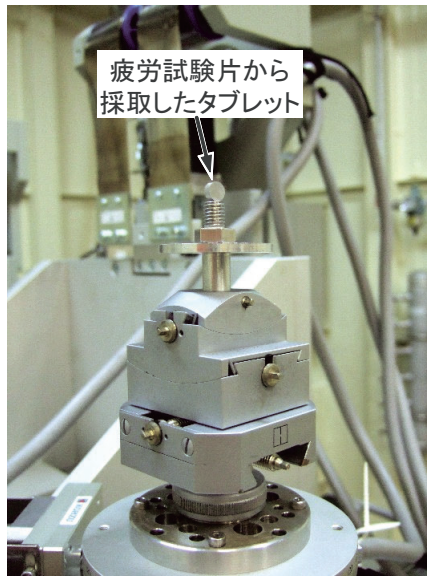


図3 屈折イメージング用試験片設置状況(BL19B2, 第3ハッチ)

屈折コントラスト法によるイメージングは、BL19B2（第3ハッチ）で実施した。測定レイアウトを図4に示す。X線エネルギーは18 keV, 28 keV, 35 keVとした。試験片と検出器（冷却 CCD カメラ）の距離は、屈折コントラストによりき裂のエッジが強調される様子を確認しながら数十～4250 mmまで変化させた。CCDの画素数は1024×1024であり、実効的なピクセルサイズは約6 μmである。

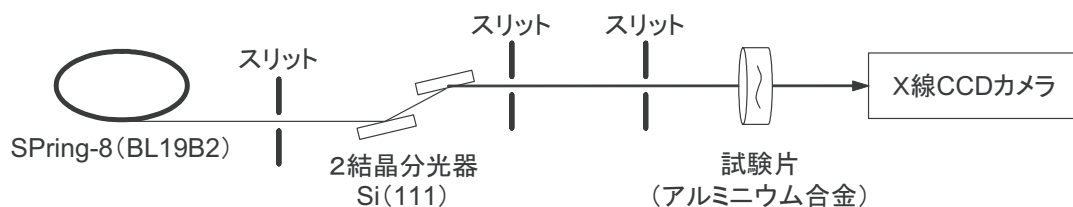


図4 屈折イメージング試験レイアウト(BL19B2, 第3ハッチ)

3.2 測定結果

X線エネルギー、試験片と検出器間の距離、試験片の方位を変化させて種々の測定を行った。その結果、き裂の表面形状は確認できるものの、本研究の目的とするき裂先端位置などの3次元情報は、確認することができなかった。

4. マイクロCTによる疲労き裂の可視化

4.1 測定方法

マイクロCT (μCT) によるき裂の3次元 (3D) 可視化実験は、屈折コントラスト法によるイメージングと同じく BL19B2（第3ハッチ）で実施した。試験片の作製手順を図5に示す。画像再構成を容易にするため、試験片を更に切断・やすりがけして、CCDカメラの視野（約6mmφ）に収まる大きさに仕上げた。試験片タブレットの写真および設置状況を図6に示す。

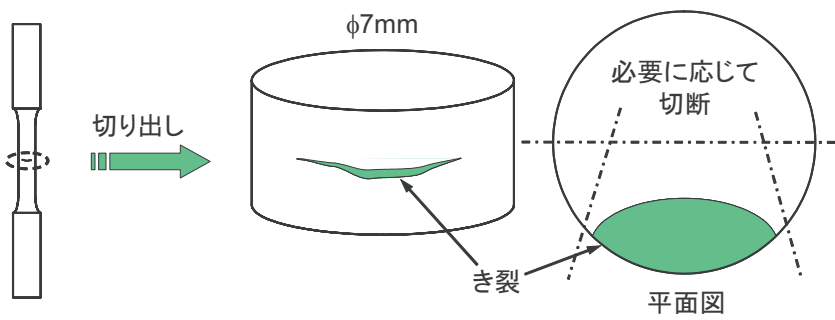


図5 マイクロCT用試験片の作製方法

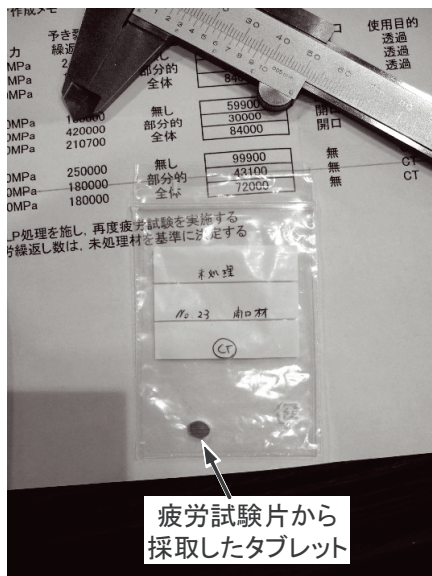


図6 マイクロCT用試験片タブレットおよび設置状況(BL19B2, 第3ハッチ)

測定体系を図7に示す。X線エネルギーは28 keVとし、試験片と検出器（冷却 CCD カメラ）の距離は、屈折コントラストによりき裂のエッジが強調される距離（800 mm）とした。冷却 CCD の画素数は 1024×1024 であるため、実効的なピクセルサイズは約 $6 \mu\text{m}$ である。

透過データは $0 \sim 180.5$ 度まで 0.5 度ごとに採取した。積算時間は2秒 (2 s/frame) とし、データ転送を含めた各透過データの測定時間は10秒であった。画像再構成アルゴリズムは、フィルタード・バックプロジェクションを使用し、各スライス画像のノイズは閾値操作により除去した。

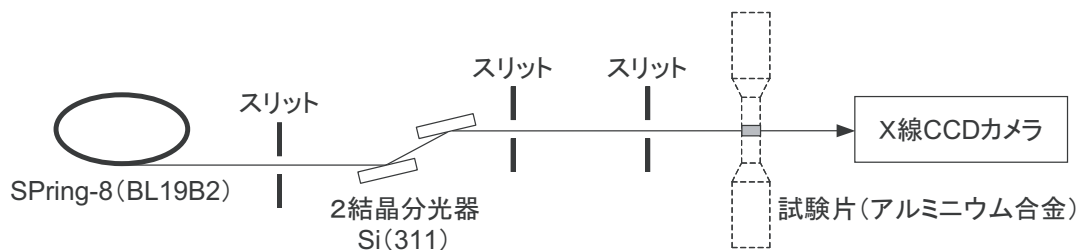


図7 マイクロCT試験レイアウト(BL19B2, 第3ハッチ)

4. 2 測定結果

試験片の軸方向から見たき裂像の一例を図8に示す。(a)は参照材(レーザピーニング処理なし), (b)はレーザピーニング処理材である。再構成画像には, き裂の存在によりX線透過率が大きく表示される部分の他に, 屈折コントラストの効果により透過率が小さく表示される部分がある。図8では, 域値操作によりその両者を抜き出し, 重ね合せて表示した。白い影がき裂の開口している部分に対応し, 中央にはドリル穴が確認できる。(a)では, 半楕円状に疲労き裂が進展しているのに対し, (b)のき裂像の横幅は約2 mmであり, レーザピーニング処理前の予き裂の長さ(約2.5 mm)とほぼ一致した。従って(b)では, レーザピーニング処理で導入された圧縮残留応力により, き裂の進展が抑制され, 予き裂はほとんど進展しなかったものと考えられる。なお, き裂長さ(周方向)については, レプリカ法による測定も行い, CT像から予測されるき裂長さとほぼ一致することを確認している。また, (b)について, 種々の異なる角度から見たときのき裂像を図9に示す。

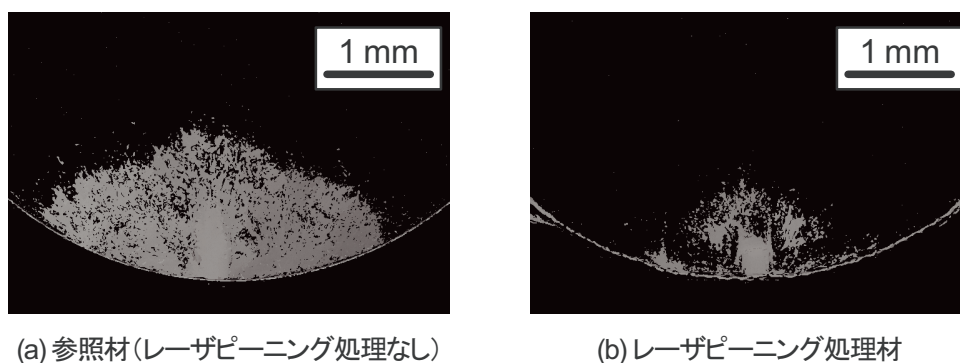


図8 マイクロCTによる疲労き裂の再構成画像(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)

5. 今後の展開

今回の実験(2005B0886)では, マイクロCT技術を活用することによって, 構造材料の疲労き裂の形状とその進展の様子を非破壊で測定できる可能性を示した³⁾。

次回2006Aは小型の疲労試験機をSPring-8に持ち込み, 同一試験片の同一き裂について, その進展の様子を非破壊で観察する計画である。また, 残留応力分布を考慮した解析によりき裂の進展を予測し, 可視化実験結果との整合性を評価する予定である。

実験およびデータ処理にあたっては, 梶原堅太郎博士(JASRI)に多大なご指導をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 政木清孝, 他, 溶湯処理鋳造アルミニウム合金の疲労特性に及ぼすレーザピーニングの影響, 日本材料学会第12回破壊力学シンポジウム, 2005年10月, 講演番号104.
- 2) Y. Sano et al., Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating, *Materials Science and Engineering A* **417** (2006) pp.334-340.
- 3) 佐野雄二, 他, 放射光および中性子によるレーザピーニング効果の確認, 日本実験力学学会2006年度年次講演会, 2006年3月, 講演番号A-1-4.

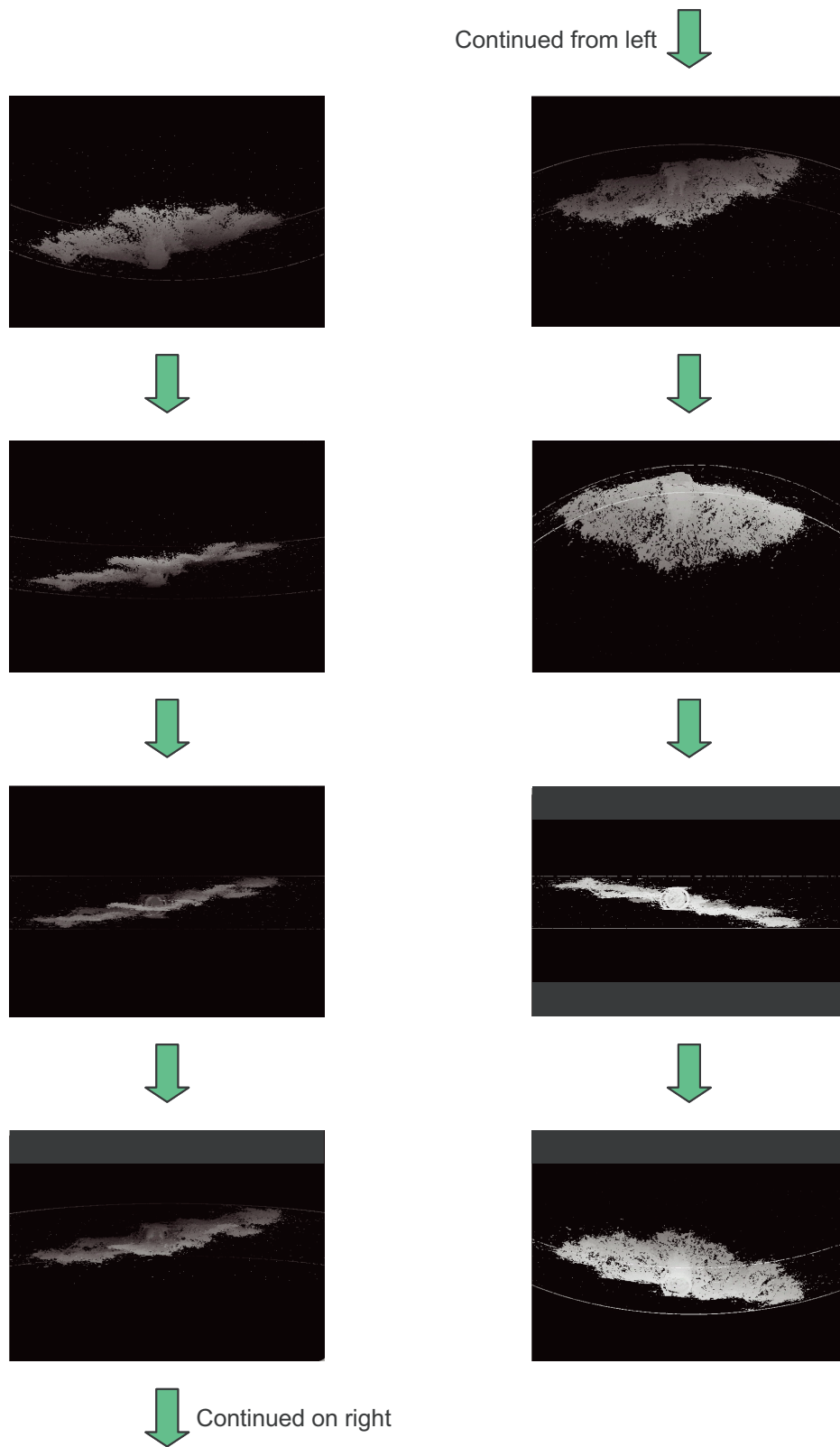


図9 異なる方向から見た疲労き裂像(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)