

屈折イメージングによる構造材内部き裂の 可視化と破壊メカニズムの検討

佐野 雄二(0007370) 松崎 謙司(0018741)

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

秋田 貢一(0007324)

武蔵工業大学 工学部 機械システム工学科

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場合が多い。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¹⁾²⁾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。

前回 2005 B³⁾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) 技術を併用することにより、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を非破壊で3次元計測できる可能性を示すとともに、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。2006A では小型の疲労試験機を SPing-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ことを試みたのでその概要を報告する。

2. 試験片および疲労試験機

2.1 試験片

前回の実験（2005B）と同じく、供試材にはX線が透過しやすい Al-Si-Mg 系の鋳造アルミニウム合金（AC4CH）を使用した。前回 2005B で使用した疲労試験片の形状を図1に、今回使用した試験片の形状を図2に示す。2005B では、き裂の透過像の取得も試みたため、試験片の中央部分をタブレット状に切り出して使用した。しかしながら結果として、 μ CT によるき裂像の再構成は可能であったが、透過像はほとんど確認できなかった。このため今回は、き裂を含むタブレットを試験片から切り出すことなく非破壊でき裂の3次元像を得るため、観察部の試験片直径を観察視野（約 6 mm×6 mm）より小さい 5 mm に追加工して使用した。

なお今回は基準データの取得を目的としたため、レーザピーニングなどの表面処理を施さない試験片を使用して、疲労試験とき裂の画像化を行った。

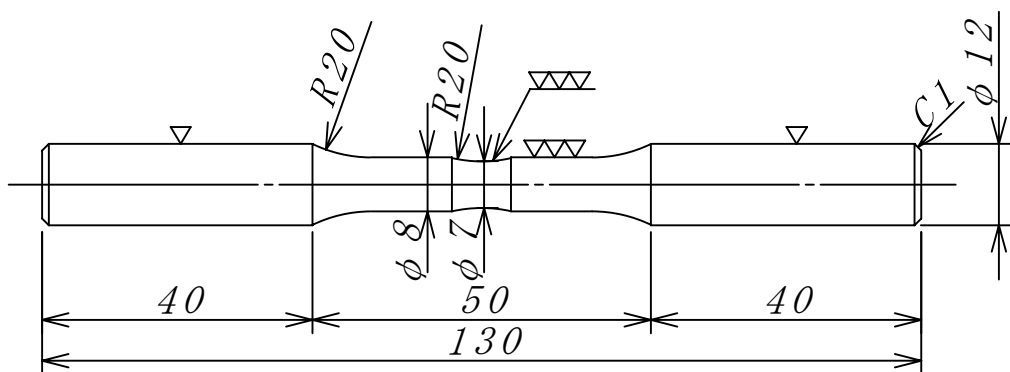


図1 2005B 試験片の形状および寸法(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)

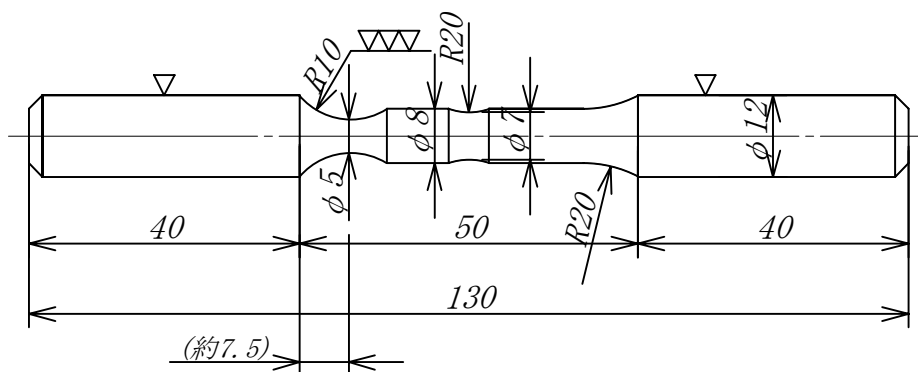


図2 2006A 試験片の形状および寸法(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)

2.2 疲労試験機

き裂を進展させながらその都度き裂の3次元像を取得するため、小型の疲労試験機を BL19B2 第3ハッチ近くに持ち込んで実験を行った。疲労試験機は2連式（同時に2体の疲労試験が可能）の片持ち式回転曲げ疲労試験機であり、回転曲げにより1分あたり3000回（3000rpm）の正弦波状の引張－圧縮荷重を試験片に負荷することができる。

使用した回転曲げ疲労試験機の外観を図3に示す。



図3 回転曲げ疲労試験機の外観

2.3 試験片固定治具

試験片固定治具は棒状の試験片を測定ステージ上に保持するとともに、軸方向（上下方向）に引張の荷重を与えることが可能である。これにより、水平方向のき裂をわずかに開口させ、より明瞭なき裂像を得ることができる。

使用した試験片固定治具の外観を図4に示す。

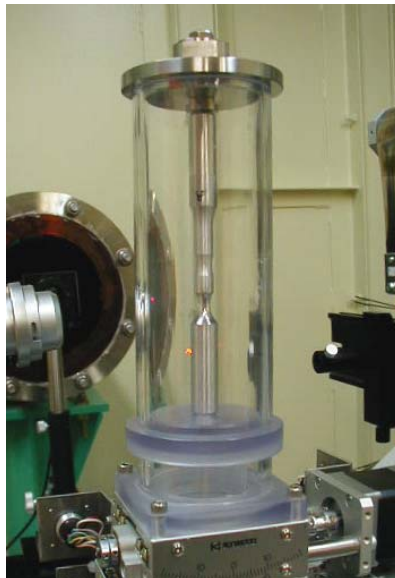


図4 試験片固定治具と試験片

3. マイクロ CT による疲労き裂の可視化

3.1 測定方法

疲労き裂の3次元可視化実験は、BL19B2の第3ハッチで実施した。X線エネルギーは28 keV、試験片と検出器（冷却 CCD カメラ）の距離は800 mmとした。透過データは0~180度まで0.5度ごとに採取し、各積算時間は6秒（6 s/frame）とした。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た。使用した冷却 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 μ mである。

測定のレイアウトを図5に示す。回転曲げによる疲労と μ CTによるき裂像の取得を交互に繰り返すことにより、き裂の進展の様子を確認した。

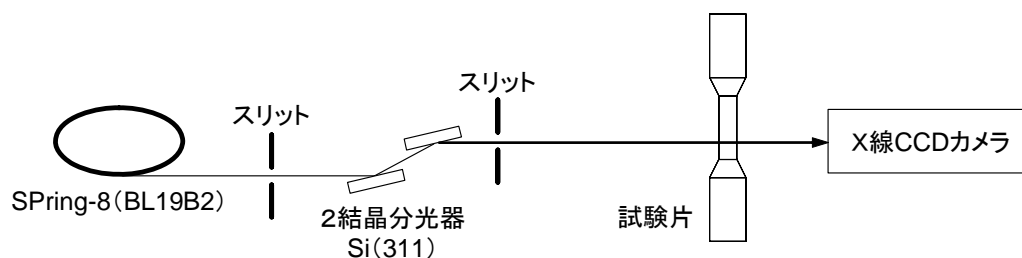


図5 マイクロ CT 試験レイアウト(BL19B2, 第3ハッチ)

3.2 測定結果

試験片軸方向から見たき裂像に対応する再構成画像の一例を図6に示す。試験片にはレーザーピーニングなどの表面処理は実施していない。また、人為的なノイズ除去は行っていない。試験片表面近くの白く見える部分がき裂の開口部である。試験片の中央部分には白い点（ノイズ）が多数観測された。

図6は応力振幅 160 MPa で疲労試験を行った結果であるが、 6×10^5 回の疲労負荷繰返しで2つの独立したき裂が発生し、その後各々が半楕円状に進展していく様子が観察された。

試験片表面のき裂形状はレプリカ法による測定も実施しており、CT像から予測されるき裂長さとの対応関係なども検討の予定である。

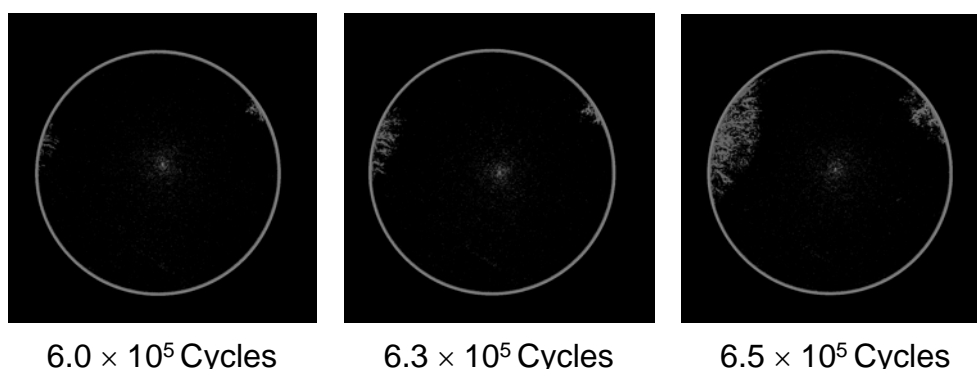


図6 マイクロ CT による疲労き裂の再構成画像(鋳造アルミニウム合金, AC4CH)

4. 今後の展開

SPring-8 のマイクロ CT 技術を活用することにより、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ことを確認した。2006B ではレーザーピーニング処理した材料との比較、内部き裂の発生および進展の観察などを計画している。また、残留応力分布を考慮した FEM 解析など、き裂進展の予測解析や、可視化実験結果との整合性評価なども別途実施する予定である。

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。

参考文献

- 1) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi: 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.
- 2) 政木清孝, 越智保雄, 熊谷洋平, 佐野雄二, 内藤英樹, 松村隆: 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, *材料*, **55** (2006), pp.706-711.
- 3) 佐野雄二, 内藤英樹, 政木清孝, 田中寛大, 高橋和馬, 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, 平成 17 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム SPring-8 戦略活用プログラム成果報告書, pp.171-176.
- 4) 佐野雄二, 秋田貢一, 政木清孝, 越智保雄, 佐藤眞直, 梶原堅太郎, 鈴木裕士: 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-14.
- 5) Y. Sano, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, I. Altenberger and B. Scholtes: Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology, Proc. of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2006), May 2006, Kyoto.
- 6) 政木清孝, 越智保雄, 保田陽, 松村隆, 佐野雄二, 秋田貢一, 田中寛大, 高橋和馬, 梶原堅太郎: レーザピーニングによる疲労き裂進展抑制と μ CT 技術によるき裂形状の可視化, 日本材料学会第 55 期学術講演会講演論文集, 2006 年 5 月, 講演番号 323.
- 7) Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, T. Uehara, I. Chida and M. Obata: Development and Applications of Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology, Proc. of International Conference on Application of Photonic technology (Photonics North 2006), Quebec city, June 2006.
- 8) 佐野雄二, 小畑稔, 秋田貢一, 政木清孝, 越智保雄, 佐藤眞直, 梶原堅太郎: レーザピーニングによる残留応力改善およびき裂進展の抑制, 日本材料学会第 41 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 2006 年 7 月, 講演番号 6.
- 9) Y. Sano, I. Altenberger, B. Scholtes, K. Masaki, Y. Ochi and K. Akita: Enhancement of Surface Properties by Laser Peening without Coating, Proc. of ASME PVP2006/ICPVT-11 Conference, July 2006, Vancouver.
- 10) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara: Characterization of Laser Peened Materials by X-ray and Neutron Diffraction Techniques, Proc. of International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, September 2006, Sapporo.
- 11) 政木清孝, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 秋田貢一, 梶原堅太郎: AC4CH 予き裂材の疲労特性に対するレーザピーニング処理の効果, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, 2006 年 9 月, 講演番号 3549.
- 12) 政木清孝, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 秋田貢一, 梶原堅太郎: レーザピーニングによる AC4CH 材の疲労き裂進展抑制と μ CT 技術によるき裂形状の可視化, 日本材料学会疲労シンポジウム講演論文集, 2006 年 10 月, 講演番号 128.