

マイクロCT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)

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) 堺 崇弘(0018268)

武蔵工業大学 工学部 機械システム工学科

1. はじめに

航空機や自動車部品では、ショットピーニング、レーザピーニングなどを施して表面を強化し、疲労強度の向上を図っている。しかしながら、表面処理を施すとき裂の発生および進展挙動が従来とは異なるため、表面処理材におけるき裂挙動の定量的な評価は極めて重要である。

本研究は、SPring-8の高輝度で平行性の高いX線ビームを使用し、表面処理材の疲労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、有限要素解析などによるき裂の進展予測技術を確立することを目的とする。

2005Bでは、屈折コントラストの効果を含めたマイクロCT技術を適用することにより、構造材料の疲労き裂の3次元形状とその進展の様子を非破壊で測定できることを示した。また、2006Aで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した。今回(2006B)は、①再構成画像に及ぼす試験片-検出器距離の影響、②表面直下の铸造欠陥を起点とするき裂の発生とその進展、③複数き裂の合体挙動を確認することができたので、以下に報告する。

2. 試験片および疲労試験機

2.1 試験片

供試材には、これまでの実験で使用してきた自動車用Al-Si-Mg系铸造アルミニウム合金(AC4CH)とともに、航空機用展伸アルミニウム合金(A7050)を今回初めて使用した。非破壊で疲労き裂を観察するため、試験片ゲージ部の直径を前回(2006A)と同じく5mmとし、検出器(冷却CCDカメラ)の視野(約6mm×6mm)に収まる大きさとした。疲労試験機および試験片固定治具は2006Aで使用したものを一部改良して使用した。

使用したAC4CH疲労試験片の形状を図1に、A7050疲労試験片の形状を図2に示す。2005Bではき裂の各方向からの透過像の取得も試みたため、AC4CH試験片の中央部分をタブレット状に切り出して使

用したが、2006A以降の実験では断層撮影（ μ CT）による観察に絞り、試験片を切り出すことなく非破壊でき裂の3次元像の観察を行っている。

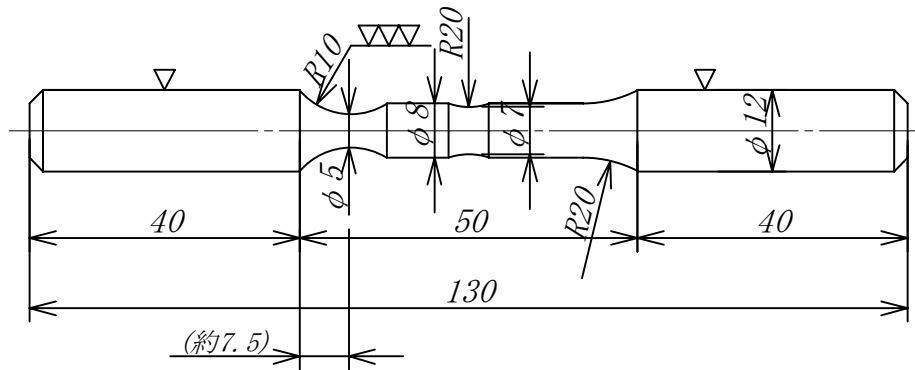


図1 AC4CH 試験片の形状および寸法

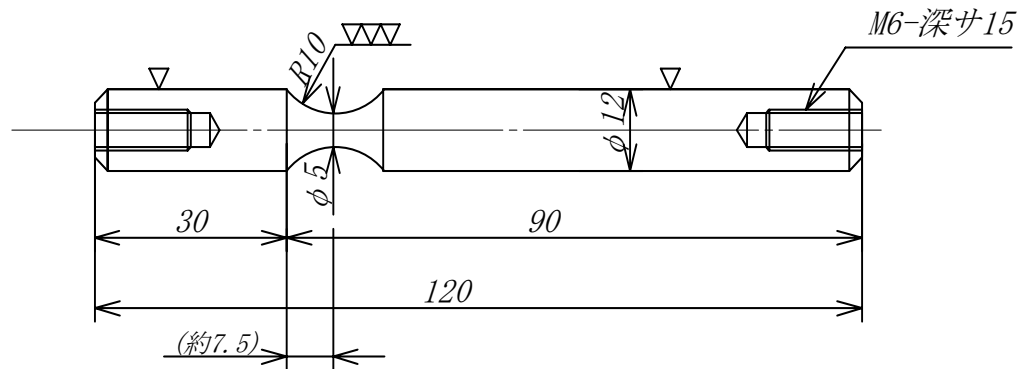


図2 A7050 試験片の形状および寸法

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（3000 rpm）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。

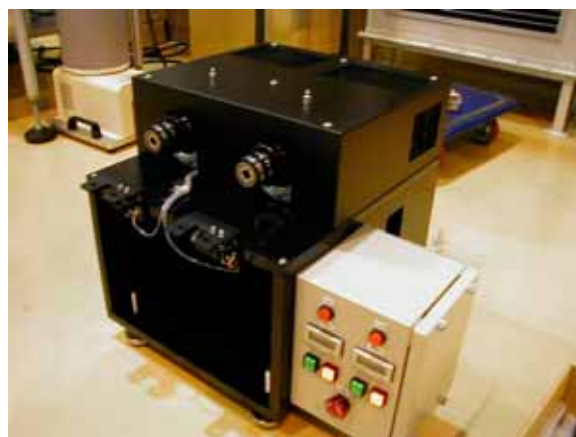


図3 回転曲げ疲労試験機の外観

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。今回（2006B）の実験では、試験片治具にひずみゲージを設置し、試験片に与える軸方向の引張荷重を制御した。



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

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28keV、試験片と検出器の距離は800mmを標準とした。再構成画像に及ぼす距離の効果を確認するため、420mmおよび1600mmでも一部の実験を行った。投影データは0~180度まで0.5度ごとに採取し、積算時間は2秒あるいは3秒/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。

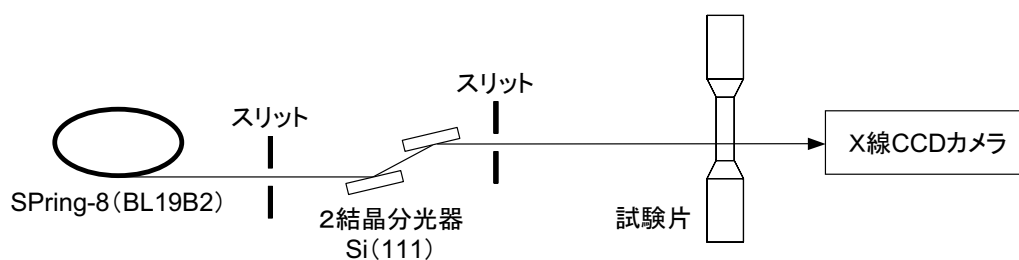


図5 マイクロCT試験レイアウト(BL19B2, 第3ハッチ)

3.2 測定結果

A7050（表面処理なし）の疲労き裂について、試験片と検出器間の距離を 420, 800, 1600mm と変化させたときの再構成画像（スライス像）を図6に示す。予想通りであるが、距離が大きいほど屈折コントラストの効果は大きい。定量的な検討は今後の課題であるが、距離 800mm であれば過度に画像が強調されることもなく、これまでの測定で標準の条件としてきた距離 800mm は妥当な値と思われる。

AC4CH（レーザピーニング処理なし）の疲労き裂の進展を図7に示す。表面直下の鑄造欠陥からき裂が発生して表面に現れ、順次進展していく様子を捉えることができた。また、レプリカ法による表面観察も実施しているが、レプリカ法では試験片内部に存在する鑄造欠陥は観察できない。

なお、図は省略するが、複数き裂の合体の様子も確認することができた。

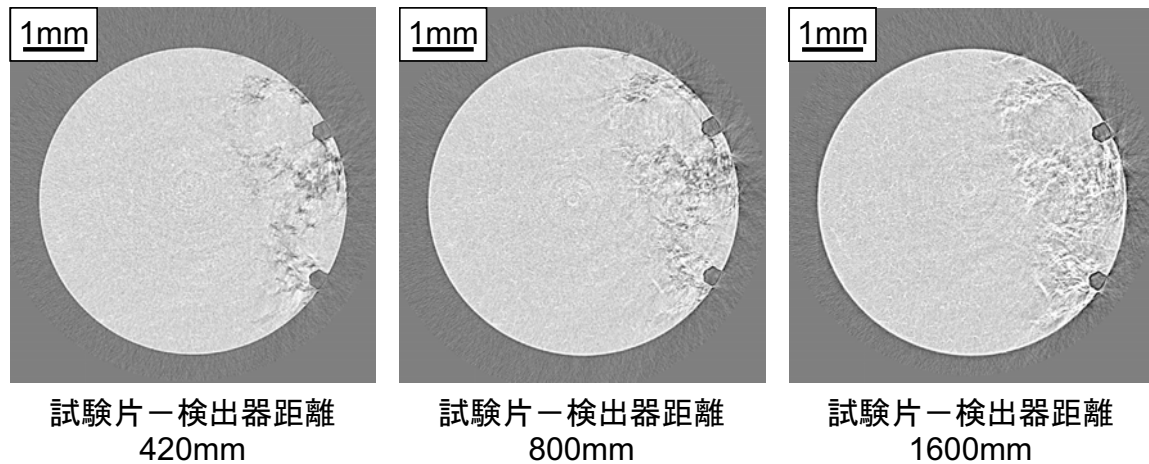


図6 スライス画像に及ぼす試験片－検出器間距離の影響（屈折コントラストの効果, A7050）

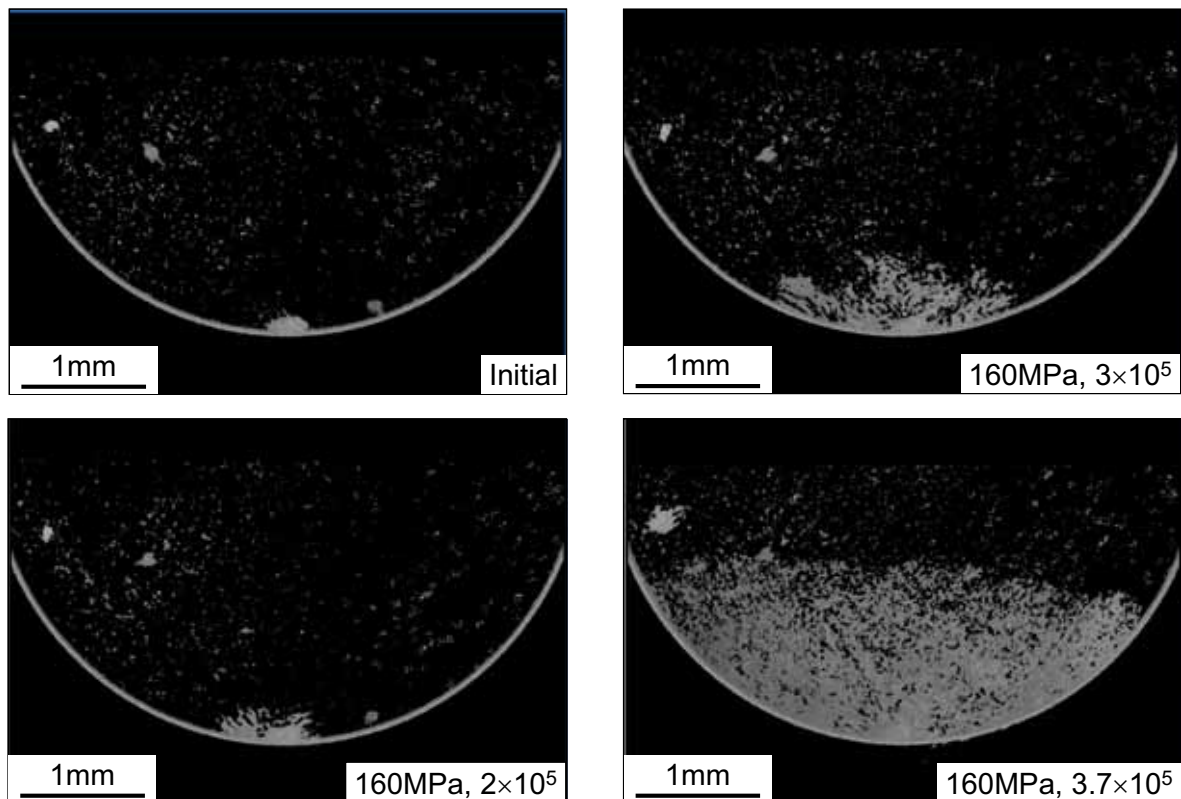


図7 表面直下の鑄造欠陥から進展する疲労き裂の様子（レーザピーニングなし, AC4CH）

4. おわりに

これまでの実験（2005B および 2006A）により，SPring-8 の高輝度で平行性の高い X 線を使用して屈折コントラストの効果を含めたマイクロ CT を適用することにより，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ている。

今回（2006B）の実験では，①再構成画像に及ぼす試験片－検出器距離の影響，②表面直下の铸造欠陥を起点とするき裂の発生，および③複数き裂の合体挙動を確認することができた。特に，②については今回初めて確認できたものである。この成果を発展させることにより，表面処理材や超高サイクル疲労において問題となっている内部き裂の発生およびその進展の様子を捉えることが可能であり，破壊メカニズム解明の大きな一助となると考えられる。

なお，A7050 については AC4CH と比較して画像ノイズが大きい。A7050 に含まれている亜鉛（Zn：約 6%）および銅（Cu：約 2%）の偏析などが影響していると思われる。今後，供試材の調製方法の検討や X 線エネルギーの最適化などが必要と思われる。

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) 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, 佐藤真直, 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, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 2006 年 3 月, 講演番号 A-1-4.
- 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, 佐藤真直, 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.
- 13) 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一: レーザピーニングによる構造材料の疲労強度向上, 日本機械学会第 14 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P 2006), 2006 年 11 月, 講演番号 313.
- 14) Y. Sano, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, I. Altenberger, B. Scholtes: Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology, *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **1** (2006), pp.161–166.