

# 構造材内部欠陥を起点とする疲労き裂のマイクロCTによる可視化と破壊メカニズムの検討

佐野 雄二(0007370) 久保 達也(0022359)

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)

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科

梶原 堅太郎(0001794)

高輝度光科学研究センター

Igor Altenberger(0021763)

German University in Cairo

## 1. はじめに

構造物の損傷は疲労によることが多く、表面から破壊する場合は殆どである。このため、機械構造物などでは、ピーニング等を施して表面の強度を高めている。しかしながら表面の強度を高めていくと、き裂が内部から発生することがある。この場合、検査で初期のき裂が発見できないため、構造物が内部から突然破壊して大きな災害に結びつく可能性がある。

本研究では、屈折コントラスト効果を併用したマイクロCTで微細な内部き裂およびその進展の様子を可視化し、破壊力学的に評価することで、構造物を安全に設計するための基盤技術を確立することを目的とする。

その第一歩として我々は、2005B～2006Bの戦略活用プログラム課題および2007Aの重点産業利用課題で、マクロサイズの試験片（アルミニウム合金）に導入したミクロな疲労き裂（表面起点）を可視化する実験を行い、SPring-8の利用により疲労き裂の形状と進展挙動を非破壊で画像化できることを実証した。また、材料表面および内部の残留応力分布を制御すれば、き裂の進展を抑制できることも確認した。

2007B以降では、残留応力分布とマイクロCTにより得られる内部欠陥寸法から内部き裂発生条件を推測し、それを実際の疲労試験によって実証する。そして、内部欠陥からの疲労き裂進展挙動を可視化し、得られたデータを破壊力学的に評価する計画である。残留応力分布を制御する手段としては、ランダムなプロセスであるショットピーニングではなく、全ての条件を精密に制御できるレーザピーニングを適用する。これにより、均質な試験片を用意することが可能となり、再現性の高い実験を行うことができる。

なお、2007Bでは一年課題の前半として、鋳造アルミニウム合金（AC4CH）試験片の内部に微細な気泡として存在する鋳造欠陥を検出する実験を行い、後半（2008A）で試験片内部の鋳造欠陥から発生する疲労き裂とその進展の様子を可視化する予定である。

## 2. 試験片

供試材には、SPring-8におけるこれまでの可視化実験と同じく、自動車用 Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) を使用した。鋳造欠陥および疲労き裂を非破壊で観察するため、試験片ゲージ部の直径は 7mm とした。使用した AC4CH 疲労試験片の形状を [図1](#) に示す。

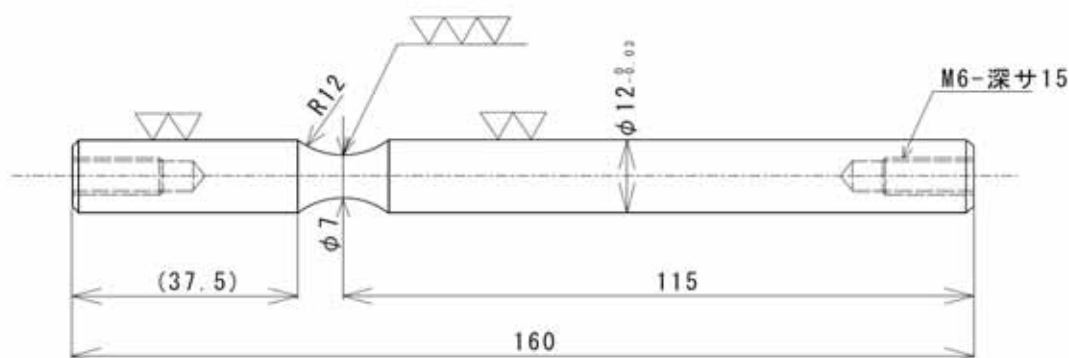


図1 AC4CH 試験片の形状および寸法

## 3. マイクロ CT による鋳造欠陥の検出

### 3.1 測定方法

き裂の 3 次元可視化実験は、BL19B2 第 1 ハッチで実施した。測定のレイアウトを [図2](#) に示す。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。投影データは 0~180 度まで 0.5 度ごとに採取し、データ積算時間は 0.5 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 の有効画素数は横 3000 × 縦 1400 であり、実効的なピクセルサイズは約 2.85 $\mu$ m であった。視野は横 8.55mm × 縦 3.99mm である。

回転曲げによる疲労と  $\mu$ 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。

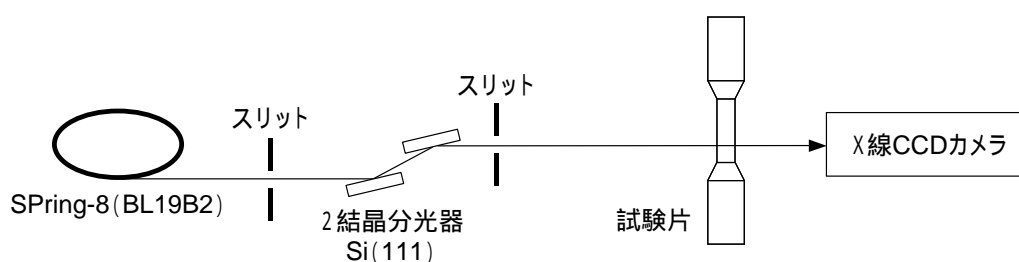


図2 マイクロ CT 試験レイアウト (BL19B2, 第1ハッチ)

### 3.2 測定結果

マイクロ CT による測定の結果、鋳造アルミニウム合金 (AC4CH) の試験片に内在する鋳造欠陥を 3 次元的に可視化することに成功した。[図3](#) は円筒状の試験片 ([図1](#) 参照) の軸方向から欠陥を透視した像に相当する。白く見える部分が鋳造欠陥であり、(a) は表面に、(b) は表面近傍に、(c) は内部に鋳造欠陥があることがわかる。2008A では (b) のように表面近傍に欠陥のある試験片を主に使用する予定である。

また、屈折コントラストの効果を確認し、より定量的な評価を行うため、試験片と検出器 (CCD) の距離を 150mm、400mm、800mm と変え、ファントムの CT 像を取得した ([図4](#))。

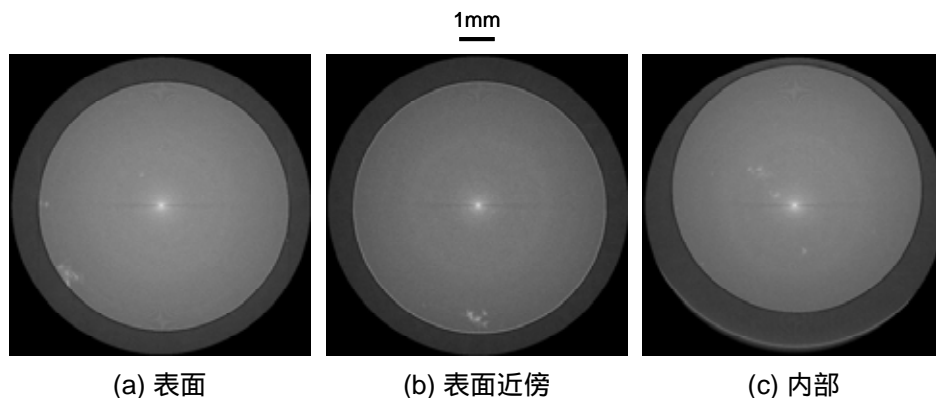


図3 マイクロCTによるAC4CH試験片内の鑄造欠陥の可視化

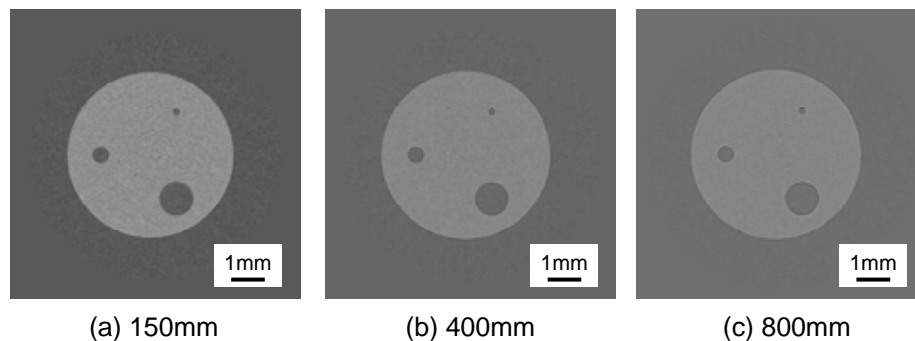


図4 屈折コントラストの効果(ファントムと検出器距離の影響)

#### 4. おわりに

一年課題の後半として実施する 2008A の実験では、今回の実験（2007B）で選別した表面近くに欠陥を有する試験片を用いて、疲労試験と可視化実験を交互に繰り返すことにより、内部欠陥からき裂が発生・進展し、破壊していく様子を世界で初めて 3 次元的に可視化する予定である。

さらに、内部き裂の発生条件の把握、3 次元的なき裂形状とその進展データの取得を行うとともに、その結果を有限要素解析によるき裂進展評価と組合せることにより、内部からき裂が発生する場合も考慮した構造物の安全設計の基盤技術を確立することを計画している。

#### 参考文献

- 1) 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎: 放射光を使用したマイクロ CT によるアルミニウム合金疲労き裂の可視化, 材料, 57 (2008), pp.395-400.
- 2) 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.
- 3) 政木清孝, 越智保雄, 熊谷洋平, 佐野雄二, 内藤英樹, 松村隆: 溶湯処理鑄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.
- 4) 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.
- 5) 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, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 2006 年 3 月, 講演番号 A-1-4.

- 6) 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.
- 7) 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 $\mu$ 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 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: 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.
- 13) 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 $\mu$ 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.
- 14) 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.
- 15) 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.