

アルミニウム合金疲労き裂の進展および合体挙動の 放射光 CT による観察

Observation of fatigue crack propagation and coalescence in aluminum alloys by computed tomography with synchrotron radiation

佐野 雄二^a, 政木 清孝^b, 釜谷 昌幸^c, 梶原 堅太郎^d, 行武 栄太郎^e, 早乙女 秀丸^e
Yuji Sano^a, Kiyotaka Masaki^b, Masayuki Kamaya^c, Kentaro Kajiwara^d,
Eitaro Yukutake^e, Hidemaru Sotome^e

^a(株)東芝, ^b沖縄工業高等専門学校, ^c(株)原子力安全システム研究所,

^d(財)高輝度光科学研究センター, ^e茨城県工業技術センター

^aToshiba Corporation, ^bOkinawa National College of Technology, ^cInstitute of Nuclear Safety System,

^dJASRI, ^eIbaraki Prefectural Industrial Technology Center

高輝度・高エネルギーで平行度が高い SPring-8 の放射光を活用し、吸収と屈折コントラストを併用したマイクロ CT により、鋳造アルミニウム合金 AC4CH 試験片に導入した微細な疲労き裂の形状を非破壊で可視化した。さらに、回転曲げ疲労負荷とマイクロ CT による断層撮影を交互に繰り返すことにより、複数の疲労き裂の進展と合体の様子を非破壊で可視化することに成功した。

キーワード： 疲労き裂, 断層撮影, 可視化, 屈折コントラスト

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、重要な構造物では、ピーニング等の処理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。そこで我々は、高輝度・高エネルギーで平行度が高い SPring-8 の放射光の特徴を活用し、吸収と屈折コントラスト効果を併用したマイクロ CT により、材料表面および内部に発生した微細なき裂の形状とその進展の様子を非破壊で三次元的に可視化する技術を開発している。

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は、AC4CH 試験片の表面に導入した微細な疲労き裂を可視化する実験を行った[1-7]。その結果、SPring-8 の利用によってき裂の形状と進展の様子を非破壊で画像化できることを確認した。また、材料表面および内部の残留応力分布を制御すれば、き裂の発生や進展を制御できることも確認した。2007B および 2008A の重点産業利用課題では、内部欠陥を起点としたき裂の発生とその進展に着目した実験を行い、内部起点による疲労き裂の再現とその可視化を行った[8]。

2008B では、試験片表面に導入した複数のき裂について回転曲げによる疲労負荷とマイクロ CT を交互に繰り返すことにより、き裂形状の可視化とその進展・合体の様子を非破壊で観察することに成功した。

2. CT 用試験片の準備

Al-Mg-Si 系鋳造アルミニウム合金 AC4CH ブロックに機械的特性を改善するための析出硬化処理(T6 熱処理)を施した後、機械加工によって回転曲げ疲労試験片を作成した。試験片の形状は 2008A[8]と同等であるが、ゲージ部(切り欠き部)の最小直径を 6mm に変更した。制御された位置に疲労予き裂を導入し、その成長と合体の挙動を調査するため、各試験片の切欠き底に直径 0.3mm、深さ約 0.3mm の微小ドリル穴を 30° 隔てて二箇所付与した。

次に、負荷応力振幅 140MPa で回転曲げ疲労負荷を与えることによって二つのドリル穴から優

先的に疲労き裂を発生させ、さらに試験片表面におけるき裂長さが約 1mm となるまで疲労負荷を加えた。その後、負荷応力振幅を 120MPa に変更して疲労負荷を継続することにより、二本のき裂をオーバーラップする直前まで進展させ、予き裂入りの試験片とした。

3. マイクロ CT 測定レイアウト

試験片表面の微細な予き裂の形状とその進展を可視化するため、BL19B2 第 1 ハッチで断層撮影(マイクロ CT)を行った。測定のレイアウトを図 1 に示す。X 線エネルギーは 28keV、試験片と X 線 CCD カメラ蛍光面の距離は 800mm とした。投影データは 0~180 度まで 0.2 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。CCD カメラの有効画素数は縦 1400×横 3000 であり、光学系の倍率を含めた実効的なピクセルサイズは約 2.8 μ m であった。

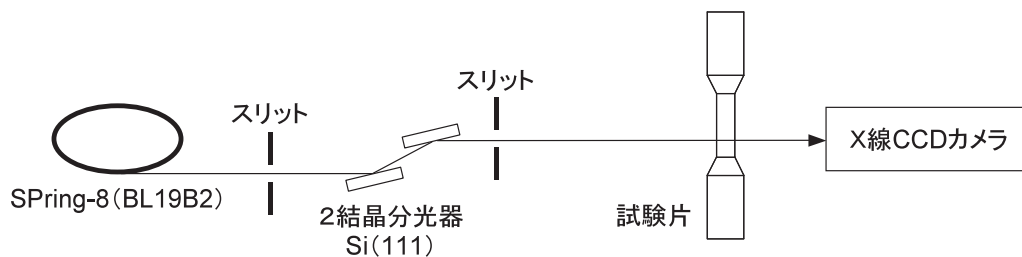


図 1 測定レイアウト(BL19B2, 第 1 ハッチ)

4. 試験片ホルダーの改良

試験片は専用のホルダーを使用して回転ステージに固定した。ホルダーの主要部はポリカーボネート製であり、X 線に対してほぼ透明である。このホルダーは試験片に軸方向(上下方向)の引張の荷重を与える機能を持っている。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[8]。

なお今回(2008B)の実験ではこれまでの経験を反映し、改良した試験片ホルダーを使用した。前回(2008A)までは、ひずみゲージを使用した自作のロードセルを使用して CT 撮影時の試験片荷重を測定していたが、市販の小型ロードセルを試験片ホルダーに内蔵させることにより、試験片荷重をより正確に測定することが可能となった。また、ケーブルの取り回しが容易となり、測定の効率も向上した。今回改良した試験片ホルダーを図 2 に示す。



図 2 改良した試験片ホルダー(左)とゴニオメータへの設置の様子(右)

5. 回転曲げ疲労試験機

ビームタイムを有効活用するため、使用したビームライン(BL19B2)の傍らに小型の回転曲げ疲労試験機を持ち込んだ。試験機の外観を図3に示す。約500mm四方の大きさで、独立して同時に2体の疲労試験が可能な片持ち式の試験機である。1分間に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[8]。



図3 回転曲げ疲労試験機の外観(左)と試験片破断後の様子(右)

6. 測定結果

二つの予き裂を導入したAC4CH試験片について、疲労負荷とCTによる断層撮影を交互に繰り返すことにより、疲労によるき裂の進展と合体の様子を可視化した。

測定結果の一例を図4に示す。各画像(①~⑥)は、試験片軸方向に垂直な多数の再構成スライス像を重ね合わせることで得たものであり、試験片を軸方向から透視した像に相当する。

この例ではドリル穴は軸方向に0.6mmずらして導入されており、その位置を①に矢印で示した。各画像(①~⑥)で黒っぽい影のように見える部分がき裂像である。①は予き裂導入時で、ドリル穴から成長した二つの予き裂の試験片表面における長さは約1mmである。②~⑥は順次疲労負荷を追加していったときのき裂像であり、き裂が半楕円状に進展していく様子がわかる。また、ドリル穴以外の欠陥からもき裂が発生し、進展している。

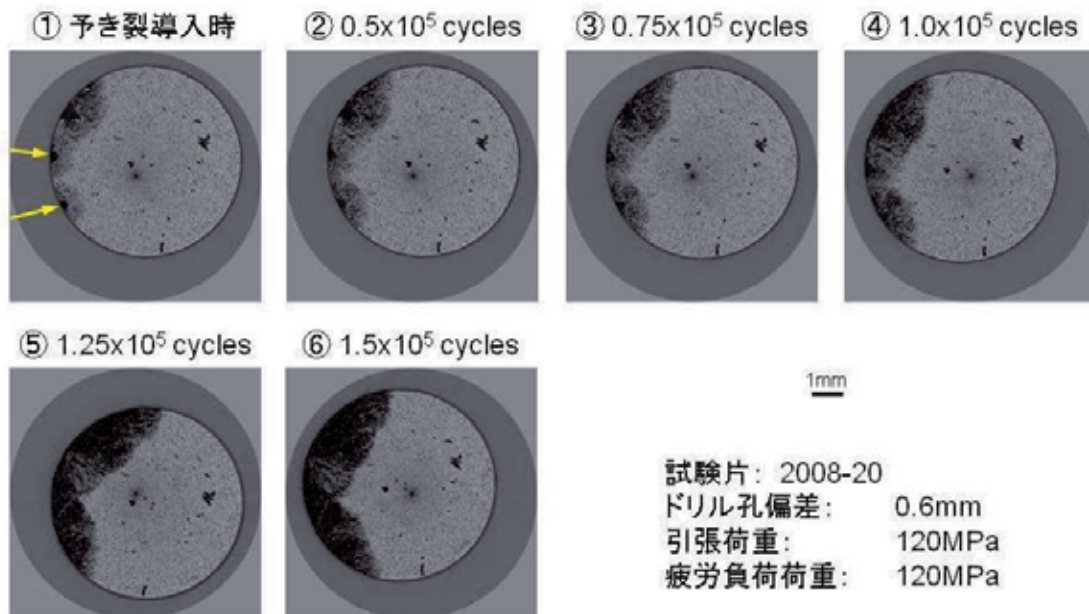


図4 疲労き裂の可視化とその進展(AC4CH)

7. おわりに

高輝度・高エネルギーで平行度が高い SPring-8 の放射光を活用したマイクロ CT により、自動車用鋳造アルミニウム合金 AC4CH 回転曲げ疲労試験片に導入した微細な疲労き裂の可視化、ならびにその成長・合体の様子を可視化することに成功した。

今後は、今回の実験により得られた画像をより詳細に解析するとともに、破壊力学的な評価と組合せることにより、構造物表面に複数のき裂がある場合のき裂進展・合体の評価手法を確立する。また、内部き裂が存在する場合についても評価手法を確立し、構造物の安全設計の基盤技術を確立する。

さらには、それらの結果からレーザピーニング等の表面処理技術の有用性を示すとともに、表面処理材の疲労寿命予測手法を確立し、電力、航空宇宙、自動車などの機器や部品の強度設計および材料開発に反映する。また、使用期間の延長や検査頻度の低減などの合理化を図るための基礎データとして活用する計画である。

なお、回転曲げ疲労負荷条件における複数のき裂の合体・干渉の定量的な調査は世界で初めての試みである。

参考文献

- [1] 佐野雄二, 政木清孝, 秋田貢一, 久保達也, 佐藤眞直, 梶原堅太郎: レーザピーニング処理した材料の高エネルギー放射光による非破壊評価, 放射光, **21** (2008), pp.270-278.
- [2] K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: Investigation of Fatigue Crack Behavior with Synchrotron Radiation on AC4CH Casting Aluminum Alloy, *J, Solid Mech. Mater. Eng.*, **2** (2008), pp.1104-1113.
- [3] 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.
- [4] Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara: Characterization of Laser-peened Materials by Synchrotron Radiation and Neutron Diffraction Techniques, *Jikken Rikigaku*, **7** (2007) pp.61-67.
- [5] Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiwara: Effects of Laser Peening on Fatigue Crack Behaviors in Pre-Cracked Cast Aluminum Alloy, *Key Eng. Mater.*, **345-346** (2007) pp.255-258.
- [6] 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 アルミニウム合金の疲労き裂進展抑制, 材料, **56** (2007), pp.1133-1138.
- [7] Y. Sano and K. Masaki: Three-dimensional Imaging of Fatigue Cracks by Micro-tomography with Refractive Contrast Effect, *SPring-8 Research Frontiers 2006*, pp.151-152.
- [8] 佐野雄二, 政木清孝, 梶原堅太郎, 久保達也, 田澤俊之, Igor Altenberger: 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, *SPring-8 重点産業利用課題報告書 2008A1887*.