

放射光 CT によるアルミニウム合金疲労き裂の進展観察

(株)東芝 佐野 雄二
沖縄高専 政木 清孝
(財)高輝度光科学研究センター 梶原 堅太郎

1. はじめに

疲労き裂の進展は、レプリカによる表面観察や破壊力学的な検討により評価することが多い。一方、材料の表面に様々な処理を施して結晶構造や残留応力分布を制御することにより、疲労強度などの材料特性を改善する試みがなされている。この場合、き裂進展の挙動が従来とは異なることも想定されるため、その評価には表面のみならず材料内部のき裂の情報が不可欠と考えられる。

X線CTによる断層撮影は、X線吸収係数の3次元分布表示が可能であり物体内部を非破壊で確認できるため、医療用はもとより非破壊検査にも多用されている。マイクロフォーカスX線源を使用すれば、ミクロンオーダーの解像度も達成可能である¹⁾。また、放射光施設では、X線の位相情報を利用した、より感度の高い測定技術が開発されている²⁻⁴⁾。

我々は、大型放射光施設(SPring-8)の可干渉性X線を使用することにより、吸収と屈折コントラストを併用した断層撮影(CT)を行い、鋳造アルミニウム合金(AC4CH)試験片の微細な疲労き裂の3次元的な画像化を試みた⁵⁻⁹⁾。また、小型の回転曲げ疲労試験機をSPring-8に持ち込み、疲労負荷とCTを繰り返すことにより、き裂が進展していく様子を非破壊で確認した¹⁰⁾。さらに、レプリカによる材料表面のき裂の観察結果とCTによるき裂の観察結果を比較評価した¹¹⁾。

2. 放射光 CT によるき裂の観察方法

2.1 供試材および試験片

我々のこれまでの一連の研究⁵⁻¹⁴⁾と同じく、X線が透過しやすい軽元素で構成されたAl-Si-Mg系鋳造アルミニウム合金AC4CHを供試材として使用した。金型を用いて重力鋳造により舟型ブロックを作製し、T6処理を施した。疲労試験片は鋳造欠陥の少ない舟型の下部から採取した。供試材の組織はAl基地と共晶Siからなる典型的なデンドライト組織であり、2次デンドライトアーム間隔(DAS II)は約30 μm であった¹³⁾。

試験片の形状寸法を図1に示す。実験条件を揃えるため、従来の試験片¹³⁾に追加工を施すことによって、切欠き部(CT観察部)の直径5mmの試験片を作成した。

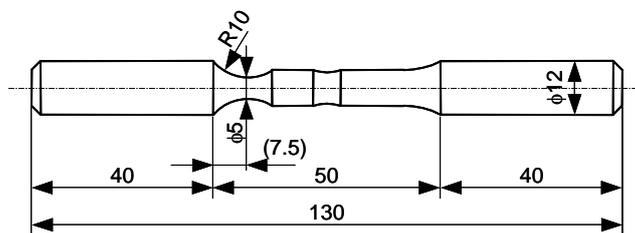


図1 AC4CH 疲労試験片の形状および寸法

2.2 疲労試験機

SPring-8で効率よく実験を進めるため、小型の回転曲げ疲労試験機¹¹⁾をビームライン(BL19B2)の傍らに持ち込んだ。疲労試験機の外観を図2に示す。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り、大きさは約500mm四方である。回転曲げにより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。

この試験機を使用して試験片に疲労負荷を与え、レプリカによる表面のき裂観察とCTによる断層撮影を繰り返すことによって、疲労き裂の進展の様子を非破壊で調査した。



図2 回転曲げ疲労試験機（ビームライン横で使用）

2.3 放射光 CT 装置

放射光 CT による疲労き裂の観察は、SPring-8 産業用ビームライン（BL19B2）の第3ハッチで行った。測定体系を図3に示す。ベンディングマグネットから放出された白色 X 線を Si (111) モノクロメータで 28 keV に単色化し、回転ステージ上に設置した試験片に照射した。試験片を透過した X 線は X 線検出器で可視光に変換し冷却 CCD カメラで検出した。光源（ベンディングマグネット）から試験片までの距離（D1）は約 110 m である。試験片と X 線検出器の距離（D2）は屈折コントラスト効果による透過像のエッジ強調を決定するパラメータであり、従来の実験と同じく 800 mm に設定した⁹⁾。X 線検出器の画素数は 1024 × 1024 であり、検出器光学系の拡大率を考慮した実効ピクセルサイズは約 6 μm である。

投影データは 0 から 180 度まで 0.5 度ステップで取得した。各データの積算時間は 2 s とした。X 線検出器の出力にはバックグラウンドの補正を行うとともに、投影データを 5 回取得するたびに試験片を視野から退避させ、X 線強度の絶対値を測定して投影データを校正した。画像再構成アルゴリズムには、フィルタード・バックプロジェクションを使用した。

試験片は図4に示す専用のホルダーを使用して回転ステージに固定した。このホルダーは X 線に対してはほぼ透明であるが、棒状の試験片を回転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可能である。なお、ホルダーには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。

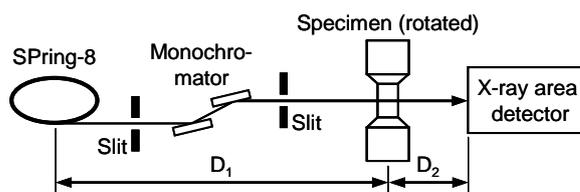


図3 放射光 CT 測定体系



図4 試験片ホルダー（回転ステージに設置）

3. 放射光 CT によるき裂の観察結果

3.1 透過像におけるエッジの強調

屈折コントラストの効果を実験的に確認するため、図3と同じ体系で透過像を撮影した。エッジ部分の拡大透過像を図5に示す。また、破線 AB に沿った X 線検出器の出力（投影データ）プロファイルを図6に示す。試験片の外縁は輝度が高く屈折コントラストの効果が現れている。図5には、別目的で開けたドリル穴が画像化されているが、エッジが黒く強調されている。

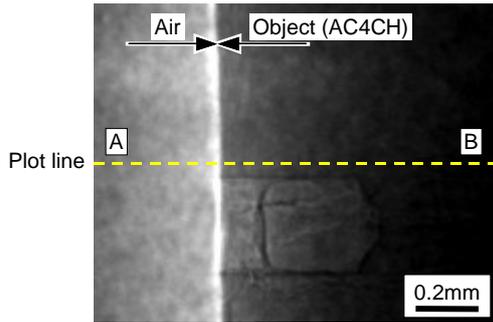


図5 透過像におけるエッジの強調

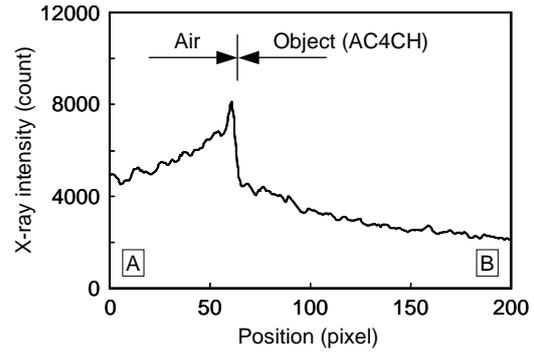


図6 検出器出力プロファイル

3.2 再構成像におけるエッジの強調

再構成した試験片のスライス像と試験片表面に垂直な直線に沿った X 線吸収係数のプロファイルの例を図7に示す。28 keV の X 線に対する AC4CH の吸収係数は約 340 m^{-1} (3.4 cm^{-1})、空気はほぼ 0 であり、全体的に正しく再構成されている。試験片と空気の界面では、屈折コントラストの効果と思われるエッジの強調が現れている。

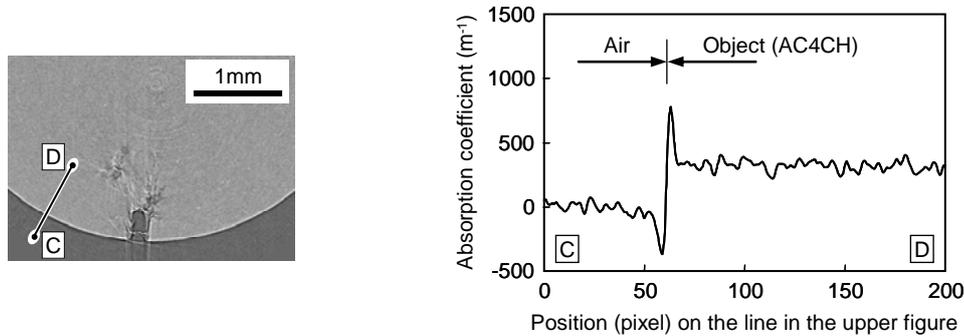


図7 再構成スライス像および吸収係数のプロファイル

材料は異なるが、試験片と X 線検出器の距離 (D_1) を 420, 800, 1600 mm と変化させたときの再構成スライス像を図8に示す。また同図には、長方形 (□) で囲んだ領域 ($200 \text{ pixel} \times 250 \text{ pixel}$) の吸収係数のヒストグラムを示す。使用した試験片 (A7050) は亜鉛 (Zn) を約 6%, 銅 (Cu) を約 2% 含むため、吸収係数は約 670 m^{-1} (6.7 cm^{-1}) であり、AC4CH の 340 m^{-1} (3.4 cm^{-1}) より大きい。

$D_1 = 420 \text{ mm}$ の再構成像と比較して、1600 mm の再構成像ではコントラストが強調されているが、特に吸収係数が母材より大きい部分 (白く見える部分) が目立っている。また、 D_1 が大きくなるにつれてヒストグラムの幅が広がる傾向にある。屈折の効果により、A7050 の吸収係数 (約 670 m^{-1}) を示すピクセルが減少し、低輝度側および高輝度側のピクセルが増加したためと考えられる。

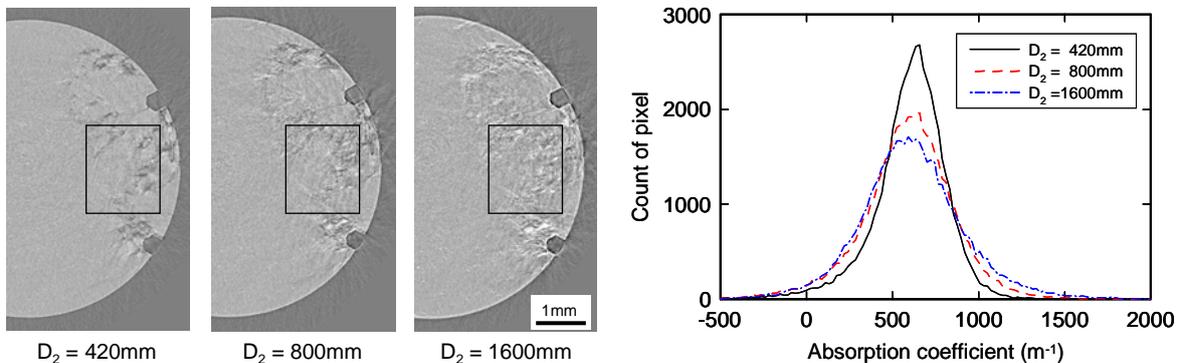


図8 試験片と検出器の距離による再構成スライス像およびヒストグラムの変化 (A7050)

3.3 鋳造欠陥からのき裂発生と進展

非破壊でき裂の進展を画像化するため、AC4CH 試験片に応力振幅 160 MPa の疲労負荷を与え、発生したき裂の断層撮影を行った。再構成処理後のき裂の 3 次元像の例を図 9 に示す。閾値処理によって各スライス像のノイズを除去した後、それらを重ね合わせたものであり、試験片の軸方向からき裂を透視した像に相当する¹⁴⁾。試験片表面近くで白く表示されている部分がき裂の発生起点となった鋳造欠陥であり、そこからき裂が進展していく様子（き裂開口部である白い領域が広がっていく様子）が観察される。

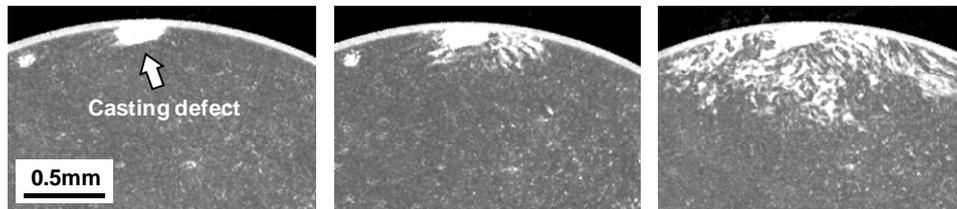


図 9 鋳造欠陥から発生した疲労き裂の進展

さらに図 9 (c) の再構成像について、詳細に調査した結果を図 10 に示す。このき裂は近接した二本のき裂によって構成されていることがわかった。

図 10 に示したき裂について、疲労試験の途中でレプリカ観察した結果を図 11 に示す。疲労負荷によって表面にき裂が発生した後、近くに別のき裂が発生・進展して合体する様子が観察された。なお、疲労試験前の外観およびレプリカ観察では、試験片表面に鋳造欠陥は検出されなかった。

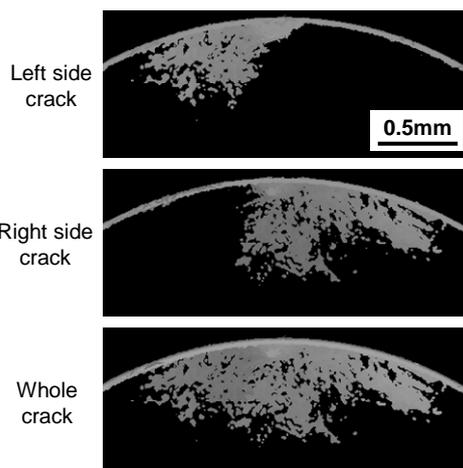


図 10 図 9 (c) の疲労き裂の詳細

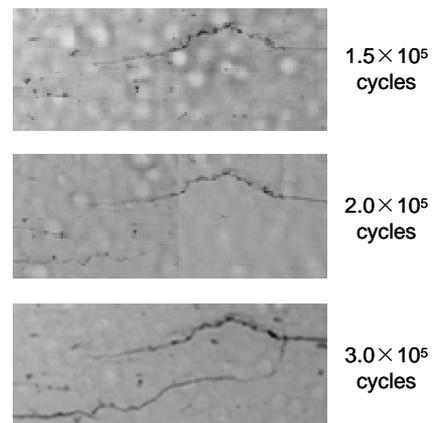


図 11 レプリカによるき裂観察

4. 放射光 CT による観察結果とレプリカの比較

CT 観察の結果から表面のき裂長さを算出し、レプリカによるき裂進展曲線との比較を行った¹⁴⁾。結果を図 12 に示す。き裂が長く成長すると CT とレプリカ観察の結果に顕著な差はないが、初期の段階では差が生じている。レプリカでは試験片内部の情報得られないため、二本のき裂を独立した半楕円のき裂とみなして評価したが、CT 観察では二本のき裂がマクロ的に一本の半楕円状の表面き裂を形成していることが明らかとなったためである。

CT では試験片内部方向へのき裂進展量も評価できるので、き裂のアスペクト比を求めることができる。そこで、村上らの式¹⁵⁾を使用して応力拡大係数範囲 (ΔK) を算出し、き裂進展速度 (da/dN) との関係を整理した。結果を図 13 に示す。レプリカについては、過去に疲労させた試験片を強制破断することによって得られたき裂のアスペクト比 (0.73) を使用し、 ΔK を求めた。

レプリカでは、 ΔK が小さい領域で da/dN の落ち込みが見られるが、CT ではそれが認められない。これは試験片内部（表面直下）の鋳造欠陥を起点として発生した見かけ上一本の半楕円状き裂を、レプリカ法ではそれぞれ独立した二本の半楕円状き裂として評価した結果である。

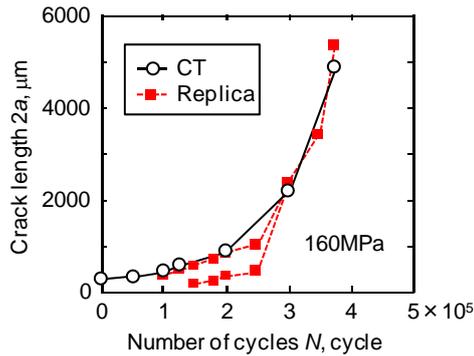


図 12 CT とレプリカによるき裂長さの比較

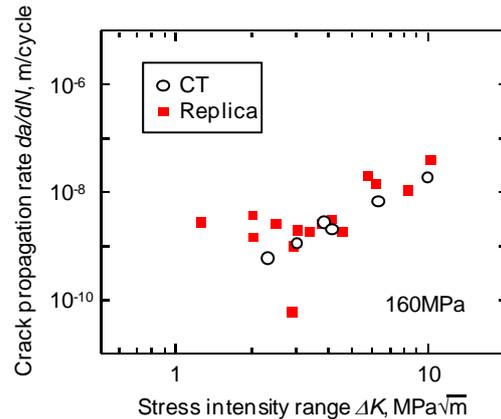


図 13 き裂進展速度 (da/dN) の比較

5. おわりに

大型放射光施設 (SPring-8) の高輝度放射光を使用して、屈折コントラストによるエッジの強調効果を含めた断層撮影 (CT) を行うことにより、鋳造アルミニウム合金 AC4CH 回転曲げ疲労試験片に発生した微細な疲労き裂の形状とその進展の様子を非破壊で観察した。その結果、表面直下の鋳造欠陥を起点とする疲労き裂の発生と複数の疲労き裂の合体の様子を確認することができた。

本稿で示したとおり、レプリカなど従来行っている表面観察のみでは疲労き裂の発生および進展の挙動を正しく把握できない場合も考えられる。CT は観察対象の大きさや材質などに制限があるものの、き裂の 3 次元的な形状やその進展の様子を非破壊で観察することができる。このため、より正確なき裂進展速度の評価などに利用することが可能である。また、表面処理材や超高サイクル疲労で内部起点型の疲労破壊が話題となっているが、CT の利用はこの場合のき裂発生とその進展メカニズムの解明においても有用と考えられる。

放射光を光源とした断層撮影 (CT) により疲労き裂を可視化する実験は、財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) 大型放射光施設 (SPring-8) の産業用ビームライン BL19B2 で実施した (2005B0886, 2006A0189, 2006B0187, 2007A1430)。

参考文献

- 1) M. Fujii: X-ray Micro-computed Tomography, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, **54** (2005), 228-232 (in Japanese).
- 2) A. Momose: Recent Advances in X-ray Phase Imaging, *Japanese Journal of Applied Physics*, **44** (2005), 6355- 6367.
- 3) P.J. McMahon, A.G. Peele, D. Paterson, J.J.A. Lin, T.H.K. Irving, I. McNulty and K.A. Nugent: Quantitative X-ray Phase Tomography with Sub-micron Resolution, *Optics Communications*, **217** (2003), 53-58.
- 4) R.A. Lewis: Medical Phase Contrast X-ray Imaging: Current Status and Future Prospects, *Physics in Medicine and Biology*, **49** (2004), 3573-3583.
- 5) Y. Sano and K. Masaki: Three-dimensional Imaging of Fatigue Cracks by Micro-tomography with Refractive Contrast Effect, *SPring-8 Research Frontiers 2006*, 151-152.
- 6) 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 (Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics)*, **7** Special Issue (2007), 61-67.
- 7) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiwara: Retardation of Fatigue Crack Growth on AC4CH Cast Aluminum Alloy by Laser Peening, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **56** (2007), 1133-1138 (in Japanese).
- 8) 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.
- 9) Y. Sano, K. Masaki, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: Imaging of Fatigue Cracks in Aluminum Alloy by Micro Computed Tomography with Synchrotron Radiation, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **57** (2008), 395-400 (in Japanese).
- 10) Y. Sano, K. Masaki, K. Akita, T. Kubo, M. Sato and K. Kajiwara: Nondestructive Evaluation of Laser-peened Materials by High-energy Synchrotron Radiation, *Houshakou (Journal of the Japanese Society*

- for Synchrotron Radiation Research*, **21** (2008), 270-278 (in Japanese).
- 11) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiwara: Investigation of Fatigue Crack Behavior with Synchrotron Radiation on AC4CH Casting Aluminum Alloy, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, **2** (2008), 1104-1113.
 - 12) Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Kumagai, T. Hamaguchi, and Y. Sano: Fatigue Strength Improvement by Peening Treatment in Degassing Processed Cast Aluminum Alloys, *International Journal of Modern Physics B*, **20** (2006), 3593-3598.
 - 13) K. Masaki, Y. Ochi, Y. Kumagai, T. Matsumura, Y. Sano and H. Naito: Influence of Laser Peening Treatment on High-cycle Fatigue Properties of Degassing Processed AC4CH Aluminum Alloy, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **55** (2006), 706-711 (in Japanese).
 - 14) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura and Y. Sano: Effects of Laser Peening Treatment on High Cycle Fatigue Properties of Degassing-processed Cast Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering A*, **468-470** (2007), 171-175.
 - 15) Y. Murakami: *Stress Intensity Factors Handbook II*, The Society of Materials Science, Japan (1986), 657.