

アルミニウム合金における二つの隣接した疲労き裂の進展と合体挙動 Propagation and coalescence behavior of two adjacent fatigue cracks in an aluminum alloy

佐野 雄二^a, 政木 清孝^b, 梶原 堅太郎^c, 川崎 泰介^a, Daniel Newswander^d, Omar Hatamleh^d
Yuji Sano^a, Kiyotaka Masaki^b, Kentaro Kajiwara^c, Taisuke Kawasaki^a,
Daniel Newswander^d, Omar Hatamleh^d

^a(株)東芝, ^b沖縄工業高等専門学校, ^c(財)高輝度光科学研究センター, ^dNASA - Johnson Space Center
^aToshiba Corporation, ^bOkinawa National College of Technology, ^cJASRI, ^dNASA - Johnson Space 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断層撮影 (CT) を行うことにより、铸造アルミニウム合金 AC4CH 試験片の微細な疲労き裂の三次元的な形状を非破壊で可視化した。また、回転曲げ疲労負荷と CT を交互に繰り返すことにより、同一平面内の二つの近接した疲労き裂の進展と合体の様子を非破壊で可視化した。その結果、合体後のき裂のアスペクト比は約 0.45 となり、単独き裂の場合の 0.73 と大きく異なることが分かった。

キーワード：疲労き裂，合体，屈折コントラスト，断層撮影，アスペクト比

1. はじめに

金属材料は不透明であるため、疲労き裂が内部に進展していく様子を直接観察することは難しい。このため、表面のき裂長さを測定し、内部への進展について予測する手法が用いられている。この手法は、均質な材料にき裂が単独で存在する場合には有効であるが、複数のき裂が相互作用する場合や、急激な応力勾配がある場合には有効とは限らない。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断層撮影 (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[1-9]。

2009B では、試験片の表面に隣接した二つの疲労予き裂を同一平面上に導入し、回転曲げによる疲労負荷と CT を交互に繰り返すことによって、き裂の進展と合体の様子を非破壊で観察した。また、観察されたき裂の形状からアスペクト比を求め、き裂が単独で存在する場合と比較・評価した。

2. CT 用試験片の準備

Al-Mg-Si 系铸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、機械加工により図 1 に示す試験片を作成した。特定の位置に疲労予き裂を導入し、その成長と合体の様子を観察するため、試験片の切欠き底に二つの微小ドリル穴を同一円周上に 30° 隔てて付与した。ドリル穴の直径は 0.3mm、深さは約 0.3mm とした。応力振幅 120MPa の回転曲げによって疲労予き裂を導入し、二つの予き裂が合体する直前まで成長させて試験片とした。

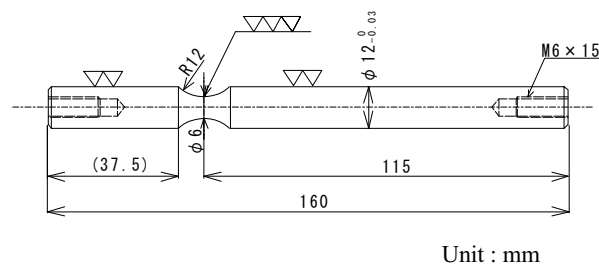


図 1. 試験片の形状および寸法 (铸造アルミニウム合金 AC4CH)

3. 断層撮影 (CT) によるき裂の可視化

疲労き裂の進展を非破壊で観察するため、 2.5×10^4 サイクルごとに疲労試験を中断して CT を行った。また、レプリカ法により試験片表面のき裂長さを測定した。CT は BL19B2 の第 1 ハッチで行った。測定のレイアウトを図 2 に示す。き裂を開口させるため、図 3 に示す専用の試験片ホルダーを使用して 120MPa の引張応力を試験片に与え、回転ステージに固定した。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。光学系の倍率を含めた実効的なピクセルサイズは約 $2.8\mu\text{m}$ であった。投影データは $0 \sim 180$ 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。

回転曲げ疲労試験機の外観を図 4 に示す。ビームタイムを有効活用するため、ビームラインの傍らに持ち込んで使用した。

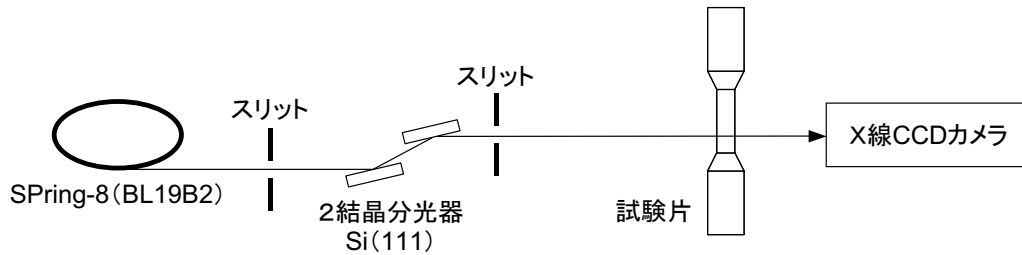


図 2. 測定レイアウト (BL19B2, 第 1 ハッチ)



図 3. 試験片ホルダー



図 4. 回転曲げ疲労試験機

4. 可視化試験の結果

可視化した疲労き裂の一例を図 5 に示す。この画像はき裂を試験片軸方向に投影した二次元像に相当する。再構成した各スライス像に閾値処理を行ってき裂のみを抽出し、さらに軸方向に重ね合わせることで作成した。

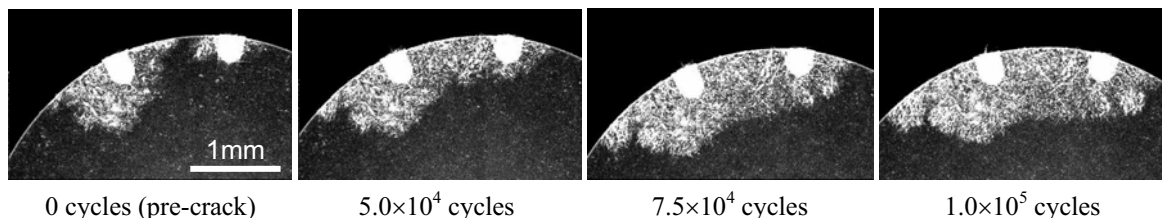


図 5. 疲労き裂の可視化とその進展

ドリル穴から発生した二つの予き裂が成長・合体し、一つの大きなき裂となる様子が良く分かる。合体後は、一つの大きな半楕円形状のき裂となるように成長するものと想定していたが、合体時のアスペクト比を維持したまま成長している。CT 像からき裂の長さや深さを測定し、アス

ペクト比を求めた結果を表1に示す。合体後のき裂のアスペクト比は約 0.45 とほぼ一定であり、単独き裂の場合[8]の 0.73 を大きく下回る値となった。

表 1. き裂合体後のアスペクト比

added cycles	crack length, μm		Aspect ratio c/a
	surface, 2a	depth, c	
0.5×10^5	3435	696	0.405
1.0×10^5	3755	867	0.462
1.5×10^5	4202	987	0.470
2.0×10^5	4691	1063	0.453
2.5×10^5	5083	1114	0.438

5. 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断層撮影 (CT) により、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を行い、その成長と合体の様子を明らかにした。その結果、同一平面上に導入した二つのき裂の場合、合体後もアスペクト比を保ったまま成長し、単独でき裂が成長する場合のアスペクト比と大きく異なることが分かった。

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・合体に関する評価手法の確立を目指す。

参考文献

- [1] 政木清孝, 佐野雄二, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原堅太郎, 足立隆史: 回転曲げ疲労条件下における複数き裂の進展・干渉挙動の放射光 μCT を用いた評価, 材料, **58** (2009), pp.975-981.
- [2] 政木清孝, 佐野雄二: μCT によるアルミニウム合金の疲労き裂観察と進展挙動調査, 非破壊検査, **58** (2009), pp.439-445.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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, **7** (2007) pp.61-67.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.