20403 レーザーピーニングによる疲労き裂の抑制 —放射光CTによる確認—

Retardation of fatigue cracks by laser peening
— visualization by computed tomography with synchrotron radiation —

正 佐野 雄二 (東芝)

正 政木 清孝 (沖縄高専)

Yuji Sano, Toshiba Corporation

Kiyotaka Masaki, Okinawa National College of Technology

Laser peening, Fatigue crack, Imaging, Synchrotron radiation, Computed tomography

Laser peening is an emerging surface technology to enhance fatigue properties of metallic materials through imparting compressive residual stress on the surface. Samples of AC4CH cast aluminum alloy were peened with a Q-switched and frequency-doubled Nd:YAG laser. Compressive residual stress was introduced from the surface to the depth of 1mm or deeper. High-cycle fatigue testing by rotating-bending was performed for samples with and without laser peening. In order to visualize fatigue cracks in the samples, computed tomography (CT) was attempted with high-energy synchrotron radiation of SPring-8. Three-dimensional (3D) images of the fatigue cracks were clearly reconstructed by CT with phase contrast effect. The image of a crack in an unpeened sample was obviously larger than that in a laser-peened sample, which strongly suggested that laser peening had retarded the fatigue crack propagation.

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が殆どである。このため、種々の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、疲労特性を改善する試みがなされている。その場合、疲労き裂の進展挙動が従来とは異なることが想定されるため、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は物体の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SPring-8を使用して吸収と屈折コントラストを併用したCTを行い、微細な疲労き裂の3次元的な画像化を試みた⁵⁻⁹⁾。また、レーザーピーニング処理により、疲労き裂の進展が効果的に抑制されることを確認したので報告する。

2. レーザーピーニング処理

レーザーピーニング処理はFig.1に示す体系で行った¹⁰⁾。水中のAC4CH疲労試験片を回転させながら上下に移動させ、Nd:YAGレーザーの第2高調波(波長: 532nm, パルス幅: 約8ns)を照射して試験片中央をスパイラル状に処理した。処理条件は、パルスエネルギー: 100mJ, 照射スポット径: 0.6mm, 照射密度: 27パルス/mm²とした。残留応力の測定にはブロック状試験片を使用し、X-Yステージに固定して表面20mm×20mmをレーザーピーニング処理した。

Fig.1 Experimental scheme of laser peening

ブロック状のAC4CH試験片にレーザーピーニング処理を行い、X線回折($\sin^2\psi$ 法)と電解研磨を交互に繰り返して残留応力の深さ分布を求めた。結果をFig.2に示す。表面から1mmを超える深さまで圧縮の残留応力が形成されることを確認した⁸⁾。

Fig.2 Residual stress profile after laser peening in AC4CH

3. 放射光CTによる疲労き裂の観察

3-1 CT観察用試験片の作成 き裂の発生位置を制御するため試験片の中央に直径0.3mm、深さ0.3~0.5mmのドリル穴を付与し、応力振幅130MPaの回転曲げ疲労負荷を与えて長さ約2.5mmの予き裂を周方向に導入した。次に、半数の試験片に約10⁵ cycleの疲労負荷を与えて参照材とし、残り半数の試験片にはレーザーピーニング処理を行った後、10⁵ cycleの疲労負荷を与えてレーザーピーニング処理材とした⁸⁾。

CT観察には試験片の切り出しは必要ないが、き裂の透過像を各方向から観察するため、厚さ約4mmのタブレット状試験片を作成し、さらに切断してX線検出器の視野(約6mm×6mm)に納めた。試験片の切断手順をFig.3に示す。

Fig.3 Cutting out of a CT sample for imaging experiment

3-2 測定方法 疲労き裂の可視化実験は、SPRing-8 産業用ビームライン BL19B2 第3 ハッチで行った。測定体系を Fig.4 に示す。ベンディングマグネットから放出される放射光（白色）を Si (111) モノクロメータで 28keV に単色化して使用した。ベンディングマグネットから試験片までの距離は 110m、試験片と検出器（冷却 CCD カメラ）の距離は、屈折コントラストによるエッジの強調が期待できる距離（800mm）とした。CCD 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（画像解像度）は約 $6\mu\text{m}$ である。

データの積算時間は 2s とし、0 度から 180 度まで 0.5 度ステップで投影データを取得した。データ転送を含めた各投影データの測定時間は約 10s であった。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、再構成した各スライス像のノイズは閾値操作により除去した。

Fig.4 Setup of CT Experiment for fatigue crack imaging

3-3 疲労き裂の観察結果 試験片軸方向から見たき裂像の一例を Fig.5 の上段に、ドリル穴を正面から見たときのき裂像を下段に示す。(a) は参照材（レーザーピーニング処理なし）、(b) はレーザーピーニング処理材である。再構成した各スライス像には、き裂の存在により X 線透過率が大きく表示される部分の他に、屈折コントラストの効果により透過率が小さく表示される部分がある。Fig.5 では、域値操作によりその両者を抜き出し、重ね合わせて表示した。白い影がき裂の開口に接している領域であり、中央にはドリル穴が確認できる。

Fig.5 Image of fatigue cracks in AC4CH samples

Fig.5(a) のき裂はほぼ半楕円状に進展している。画像から読み取った試験片表面のき裂長さは 4~5mm であり、予き裂の長さ（約 2.5mm）に比べて大きく成長している。一方、(b) のレーザーピーニング処理材では、表面のき裂長さは予き裂の長さのままであった。従って、(b) ではレーザーピーニング処理によって導入された圧縮残留応力の影響によりき裂の進展が抑制され、レーザーピーニング処理後に与えた疲労負荷繰り返し（ 10^5 cycle）では、予き裂はほとんど進展しなかったものと考えられる。なお、レプリカ法による表面き裂長さの測定も行い、CT による再構成画像から予測されるき裂長さとほぼ一致することを確認した¹¹⁾。

4. おわりに

鋳造アルミニウム合金 AC4CH の疲労き裂の進展に対するレーザーピーニング処理の効果を確認するため、SPRing-8 の高エネルギー放射光を使用した CT によるき裂の 3 次元的可視化実験を行った。その結果、レーザーピーニング処理した試験片については、き裂の進展が大きく抑制されていることを確認した。

再構成画像に与える屈折コントラスト効果の影響⁸⁾など、検討すべき点が多く残されているが、今回の実験によって疲労き裂の 3 次元的な形状を非破壊で測定できる可能性が示された。

高エネルギー放射光を使用した CT による疲労き裂の非破壊観察実験は、(財) 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) で行った（課題番号：2004A0806, 2004B0915, 2005B0886, 2006A0189, 2006B0187, 2007A1430, 2007B1954, 2008A1887, 2008B2104）。

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, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiura: 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.
- 6) K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiura: 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).
- 7) Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita and K. Kajiura: Effects of Laser Peening on Fatigue Crack Behaviors in Pre-Cracked Cast Aluminum Alloy, *Key Engineering Materials*, **345-346** (2007), 255-258.
- 8) Y. Sano, K. Masaki, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiura: 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).
- 9) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita, K. Kajiura and T. Adachi: Investigation of Propagation and Interference Behavior of Surface Fatigue Cracks under Rotating Bending Fatigue by μ CT Technique with Synchrotron Radiation, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **58** (2009), 975-981 (in Japanese).
- 10) Y. Sano, M. Yoda, N. Mukai, M. Obata, M. Kanno and S. Shima: Residual Stress Improvement Mechanism on Metal Material by Underwater Laser Irradiation, *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, **42** (2000), 567-573 (in Japanese).
- 11) K. Masaki, Y. Sano, Y. Ochi, K. Akita and K. Kajiura: Investigation of Fatigue Crack Behavior with Synchrotron Radiation on AC4CH Casting Aluminum Alloy, *Journal of Solid Mechanics and Materials. Engineering*, **2** (2008), 1104-1113.