

実験課題番号：2007B1943，実験ビームライン：BL19B2

## タービンロータ嵌合部における新たなフレットング疲労き裂進展モデルの構築

Development of Fretting Fatigue Crack Propagation Model on Turbine Rotor Groove

三菱重工業株式会社 高砂研究所 栗村隆之

神戸大学大学院 工学研究科 中井 善一

神戸大学大学院 工学研究科 塩澤 大輝

### 1. 研究の目的

フレットング疲労に起因する事故や破壊は，発生頻度は高くないものの，重大事故につながる危険性があり，一般疲労と同様に評価法の確立が必要である．フレットング疲労き裂は，機械構造物の嵌合部や締付部において生じ，部材表面に対して斜めに進展し，複数のき裂が発生・成長・合体するという複雑なき裂進展挙動を示す．そこで部材内部のき裂形状を正確に測定し，フレットング疲労における微小き裂伝ばモデルの問題点を抽出し，モデルの構築を行う必要がある．本実験ではフレットング疲労き裂の伝ば特性を調べるために放射光マイクロトモグラフィ(SR- $\mu$ CT)を用いてき裂の三次元的な形状の観察を行った．フレットング疲労き裂については析出硬化型ステンレス鋼(JIS SUS630)におけるき裂形状の観察を行っている<sup>(1)</sup>．2007A 期課題実験では，ステンレス鋼よりも吸収係数の小さいチタン合金を評価材料として選定し，き裂が長い状態で中途止めした試験片について観察を行い，内部のき裂形状および複数き裂の発生と合体の状態を得ることが出来た．そこで今回は比較的短いき裂を観察し，発生直後のき裂形状を三次元的に得ることでフレットング疲労き裂の進展モデルの構築を試みた．

### 2. 利用方法および利用結果

フレットング疲労試験および測定用試料の概要を Fig. 1 に示す<sup>(2)</sup>．試験片および接触片の材料は，チタン合金(JIS Ti-6Al-V)であり，2007A 期と同様のものである．試験条件としては，応力比を  $R = -1$ ，荷重繰返し速度を 15 Hz，面圧を 98 MPa，接触端ピーク応力振幅  $\sigma_{ap}$  を 234 MPa とした．接触端部近傍の応力計測を行うために貼付けたひずみゲージからの出力からき裂の発生・進展を推定した．2007A 期では 20% 減少した時点で試験を終了したのに対して，本実験ではより短いき裂を観察するために 15% 減少した時点で試験を終了した．Fig. 1 に示したようにこの試験片からフレットングき裂発生部を切り出した後，0.9mm $\times$ 0.9mm 断面の角柱となるまで研磨を行った．

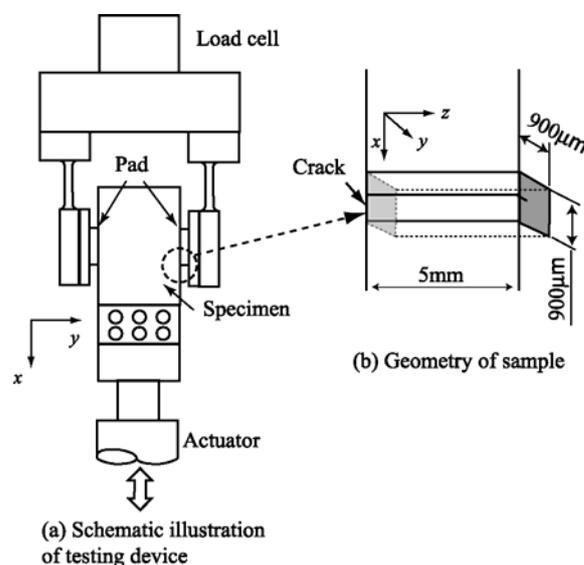


Fig. 1 Geometry of fretting fatigue set-up and sample

CT 観察はビームライン BL19B2 の第 1 ハッチにて行った．検出器としては，ビームラインモニタおよび CCD カメラの組み合わせを用いた．観察条件としては，X 線エネルギーを 35keV，露光時間を 12s，回転角度を 0.2deg ステップ(透過像 900 枚)，試料 - カメラ間距離を 700mm とした．各ステップ角度における透過像を再構成することによって三次元像を得た．再構成した像の 1voxel あたりの寸法は 1.75 $\mu$ m である．

試料表面に平行な断面における再構成イメージおよび深さ方向の形状を現した三次元イメージを Fig.

2(a)および(b)にそれぞれ示す。Fig. 2(a)より、二つのき裂 (Crack A, Crack B)が直列に発生していることがわかる。View  $\alpha$  の方向から見た三次元 CT イメージを示した Fig. 2(b)より、Crack A は試料表面に対して  $\theta=116^\circ$  の角度で進展していることが分かる。また Crack A と Crack B は内部で合体していない。

次に Fig. 2 に隣接する箇所の CT 像を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)より Crack B と並列に多数のき裂 (Crack C Crack D) が発生していることが分かる。Crack B では、点線で囲んだ場所において二つのき裂が合体している様子が見られた。View  $\beta$  の方向から見た三次元 CT イメージを示した Fig. 3(b)より、Crack C では試料表面に対して  $111^\circ$  の角度で  $220\mu\text{m}$  の深さ ( $c_1$ ) まで進展し、その後垂直な方向に進展角度をとっていることがわかる。Crack B は Crack C と同様の傾向を示しており、約  $250\mu\text{m}$  の深さからほぼ垂直方向に進展している。これは Crack B および C が Mode から Mode に遷移したものと考えられる。Crack A は深さ  $160\mu\text{m}$  程度あるため、Mode に遷移していない Mode のき裂であると考えられる。また View  $\gamma$  方向から見た Fig. 3(c)より、Crack C よりも短い多数のき裂が発生している様子が見られる。これらのき裂深さ  $c_3$  は約  $100\mu\text{m}$  であり、内部のき裂部と比較してき裂開口量が大きい。

2007A 期 課題実験における観察結果の一例を Fig. 4 に示す。2007A 期では同材料において今回よりもき裂長さが長い状態で中途止めした試験片について観察を行った。横断面(xy 面)の CT 像を示した Fig. 4(b)より、2007B 期での観察結果と同様に、試料表面に対して約  $110\sim 120^\circ$  の角度で進展し、その後垂直方向に近い角度で進展していることがわかる。また進展角度が変化する深さは  $250\sim 300\mu\text{m}$  であった。さらに SPring-8 での CT 測定後、疲労き裂の破面を開放して電子顕微鏡(SEM)による観察を行った。破面の SEM 像を示した Fig. 4(a)より試料表面に近い領域では試料内部と比較して平坦な破面様相を示していることが分かる。これは試料表面付近の Mode のき裂ではき裂面が接触していたことによるものと考えられる。Fig. 3 に見られた試料表面

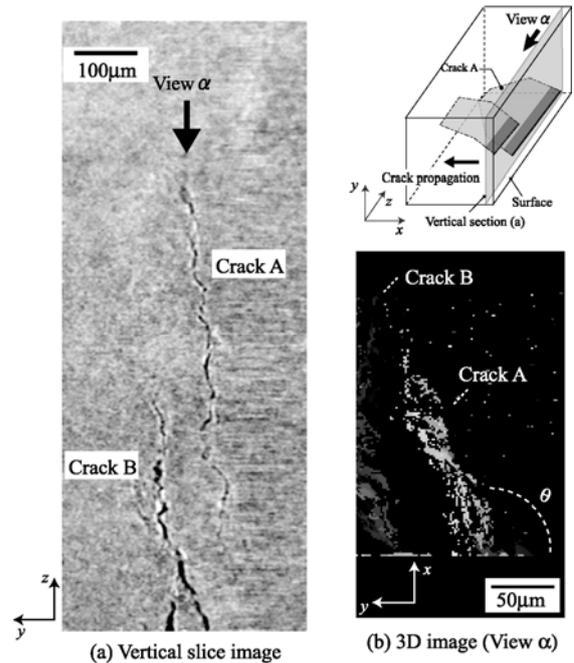


Fig. 2 CT images of fretting fatigue crack

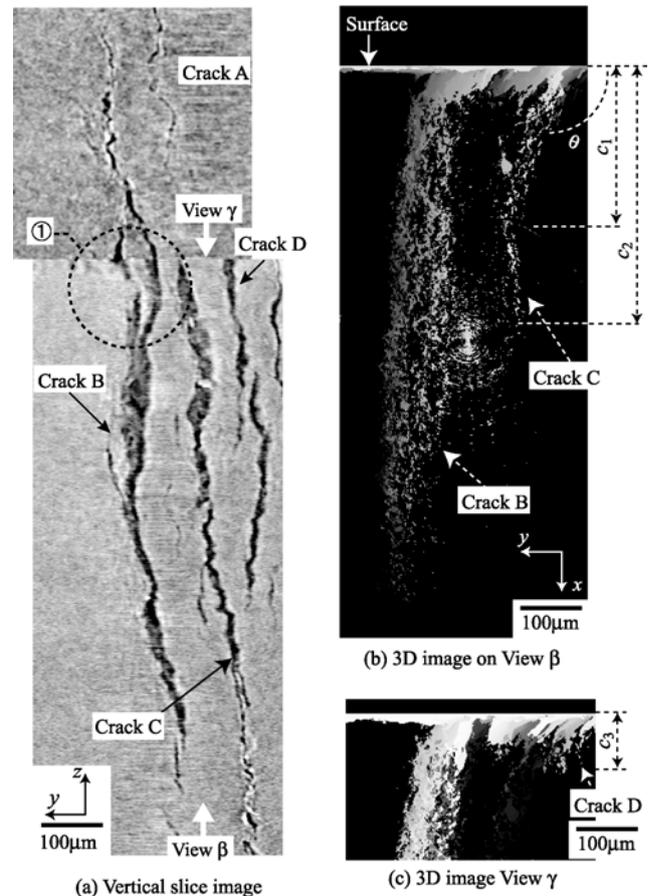


Fig. 3 CT images of fretting fatigue crack

付近の Mode のき裂ではき裂面が接触していたことによるものと考えられる。Fig. 3 に見られた試料表面

に近い部分における Crack D のようなき裂は，この平坦な破面様相を示す領域に相当し，き裂面の接触によってできたものであると考えられる．

これらのように放射光 CT イメージングを用いることにより，短いき裂の観察が可能であり，今回の実験ではき裂発生・進展の各段階におけるき裂を観察することができた．今後これらの結果を用いてフレットング疲労き裂進展モデルを構築し，有限要素解析による破壊力学的評価を行う予定である．また，接触状態を様々に変えた場合の試料について観察を行い，フレットング疲労き裂の伝ばモデルを構築，検証することが課題である．

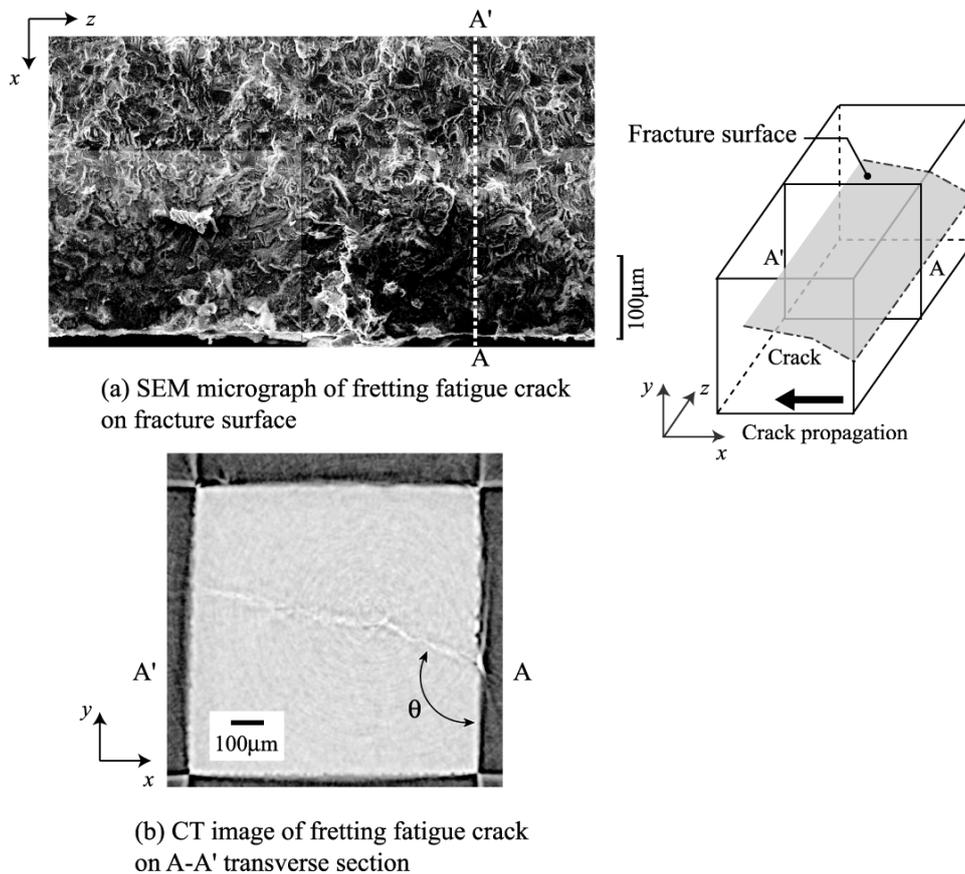


Fig. 4 SEM micrograph and CT image of fretting fatigue crack (SPring-8 2007A1905)

- (1) D. Shiozawa, N. Nakai, T. Kurimura, Y. Morikage, H. Tanaka, H. Okado, T. Miyashita, K. Kajiwara, "Observation of Cracks in Steels Using Synchrotron Radiation X-ray Micro Tomography", *Jouranl. of Society of Materials Science (Japan)*, Vol. 56, No. 10, pp951-957(2007).
- (2) Y.Kondo and M.Bodai, "Study on Fretting Fatigue Crack Initiation Mechanism, "Based on Local Stress at Contact Edge", *JSME, Series A*, Vol.63, pp. 669-676(1977).