

金属材料における疲労き裂進展モード遷移条件の解明

Study on Transition Condition of Fatigue Crack Propagation Model for Metals

中井 善一^a, 塩澤 大輝^a
Yoshikazu Nakai^a, Daiki Shiozawa^a

^a神戸大学大学院工学研究科

^a Kobe University, Graduate School of Engineering

多軸応力下での疲労き裂は、き裂進展モードの遷移やき裂の分岐など複雑な挙動を示すため、正確な健全性評価や余寿命推定が困難である。そこで本研究では、繰返しねじり疲労における疲労き裂の進展挙動を放射光 μ CT イメージングにより非破壊的に調べた。本実験では新たに可搬型ねじり疲労試験機を開発し、SPring-8 において疲労試験と CT 観察を繰り返すことによりせん断応力下における複雑なき裂進展挙動の非破壊観察を行った。その結果、き裂の停留、進展および分岐挙動が観察され、せん断負荷下におけるき裂の遷移条件やき裂面干渉の影響を明らかにする知見が得られた。

キーワード：放射光イメージング, Ti 合金, ねじり疲労, き裂進展

背景と研究目的：

機械構造物は単軸応力よりも多軸応力下で使用されることが多いため、多軸応力下の疲労き裂伝ばについて、引張・圧縮－繰返しねじり疲労試験等において様々な研究が行われている。平滑材のねじり疲労下でのき裂伝ばは、せん断型(Mode II)から引張型(Mode I)へのき裂進展モードの遷移が生じることが知られている。Mode I と Mode II では、き裂進展のメカニズムおよびそれを支配する力学因子が異なるため、疲労き裂進展モードの遷移条件を明らかにする必要がある。しかしながら、従来の電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)は、き裂の表面観察に限られるため、正確なき裂の評価を行っているとは限らない[1]。そこで本研究では、ねじり疲労き裂の進展挙動を放射光 μ CT イメージングにより非破壊的かつ3次的に観察することを試みた。まず2008B 期実験ではTi合金におけるねじり疲労き裂の測定条件の最適化を行った。また、可搬型ねじり疲労試験機を開発し、SPring-8の実験ハッチの外で疲労試験を行いながら、適宜疲労き裂を中断してCT撮影することにより、疲労き裂の進展挙動を観察する手法を構築した[2]。2009A 期ではさらに詳細に疲労損傷過程の疲労き裂を測定することにより、き裂進展モードがMode II からMode Iへ遷移する過程の観察を試みた。

実験：

(1) 試験片および疲労試験機

供試材として、チタン合金 Ti-6Al-4V を使用した。その化学組成を表 1 に示す。供試材の力学的性質は0.2%耐力 868MPa, 引張強さ 995MPa である。試験片形状を図 1 に示す。試験片表面は1500 番までエメリー紙で研磨した後、アルミナ粉末によるバフ研磨を行った。

表 1 Chemical composition (mass%)

C	V	Al	O	N	Fe	H	Ti
0.01	3.96	6.23	0.14	0.01	0.15	<0.01	bal.

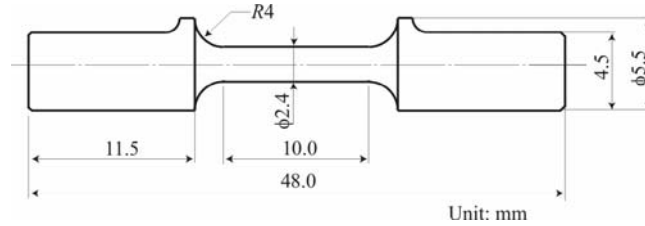


図 1 Geometry of specimen

高輝度放射光施設 SPring-8 に持ち込んで疲労試験を行うために可搬型ねじり疲労試験機を開発した。可搬型ねじり疲労試験機の外観および概要図を図 2 に示す。駆動部分には NSK 社製のダイレクトドライブモータ(DD モータ)を用いた。DD モータとは、ねじやギヤの動力伝達機構を用いず直接負荷を駆動するモータである。DD モータの採用により動力伝達機構がなくなり、駆動部および試験機の小型化が可能となった。また減速機を使用しないためバックラッシュがない、伝達部の摩耗・損失がない等の理由から高精度の運転が可能となる。ねじり疲労試験機では、ロードセルからの負荷信号をパーソナルコンピュータ上で信号処理しフィードバックを行う応力制御を行っている。疲労試験条件としては、応力比 R を -1 、負荷速度 f を 10Hz とした。

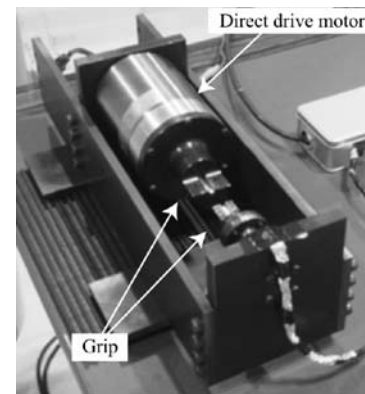
(2) 観察方法

CT 撮影は SPring-8 の BL19B2 ビームラインで行った。検出器にはビームモニタ(BM2, $f=50$)と CCD カメラ(C4880-41)の組み合わせを用いた。この検出器における有効ピクセルサイズは $2.64\mu\text{m}$ である。測定条件では X 線のエネルギーを 37keV、試料-カメラ間距離を 350 および 700mm とし、 0° から 180° まで 0.5° 刻みで回転させながら透過像を得た。これらの透過像から Field back projection 法を用いて三次元像を再構成した。ねじり疲労き裂の進展挙動を観察するために、測定ハッチの外側で可搬型疲労試験機によりねじり疲労試験を行い、適宜疲労試験を中断して CT 撮影を行った。

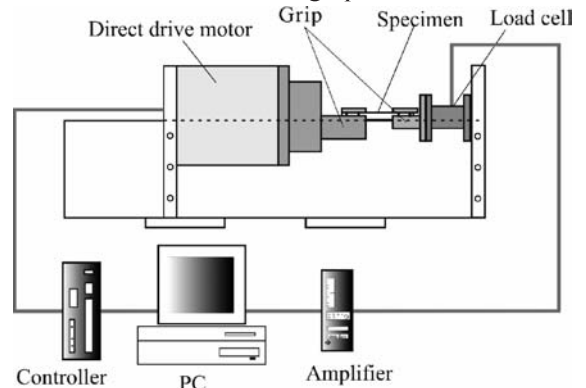
結果および考察：

せん断応力振幅 $\tau_a=450\text{MPa}$ で実験を行った結果について述べる。図 3 に負荷繰返し数に対する疲労き裂の表面き裂長さ(Mode II 部: $2a_{II}$ および Mode I 部: $2a_I$)とき裂深さ c の変化の関係を示す。図より、 1.64×10^5 cycles までは Mode I き裂は進展せず、 1.68×10^5 cycles から繰返し数と共にき裂が進展していることが分かる。また Mode I き裂が進展しない $1.5 \times 10^5 \sim 1.64 \times 10^5$ cycles の間では Mode I き裂は試料表面ごく近傍のみで観察され、試料内部では Mode I き裂は検出されなかった。

表面観察では 9.3×10^4 cycles からき裂が確認されたが、 $9.3 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$ cycles の間では、CT 像



(a) Photograph.



(b) Schematic illustration.

図 2 Torsional fatigue testing machine.

ではき裂が現れなかった。 1.53×10^5 cycles 時点において CT 像でき裂が検出された。その後、図 3 に示したように徐々に深さ方向へ進展したが、 Mode I き裂が顕著に進展するまではき裂進展が停留する様子が見られた。このように、 Mode II から Mode I のき裂進展へ遷移する様子を連続的に観察することが出来た。その結果、 Mode II き裂が表面のみで観察された期間と Mode II き裂および Mode I き裂ともに顕著な進展挙動が見られない期間があることが分かった。

試料内部においてき裂が検出された 1.53×10^5 cycles 以降ではき裂面の接触によるものと考えられる摩耗粉の発生が観察された。すなわち $1.5 \times 10^5 \sim 1.64 \times 10^5$ cycles の間ではき裂面の摩耗が進み、ある程度摩擦係数が低下した後 Mode I き裂の進展が開始されることが考えられる。 Mode I き裂の進展には Mode II き裂のき裂面の接触を考慮する必要があるものと考えられる。

本研究では、放射光 μ CT を用いることにより Mode II から Mode I のき裂進展への遷移過程を詳細に観察することに成功した。観察の結果、 Mode II き裂進展におけるき裂面の摩擦力を考慮する必要があることが明らかとなり、き裂進展モード遷移条件の解明には三次元のモデルを用いた解析が必要であることが分かった。

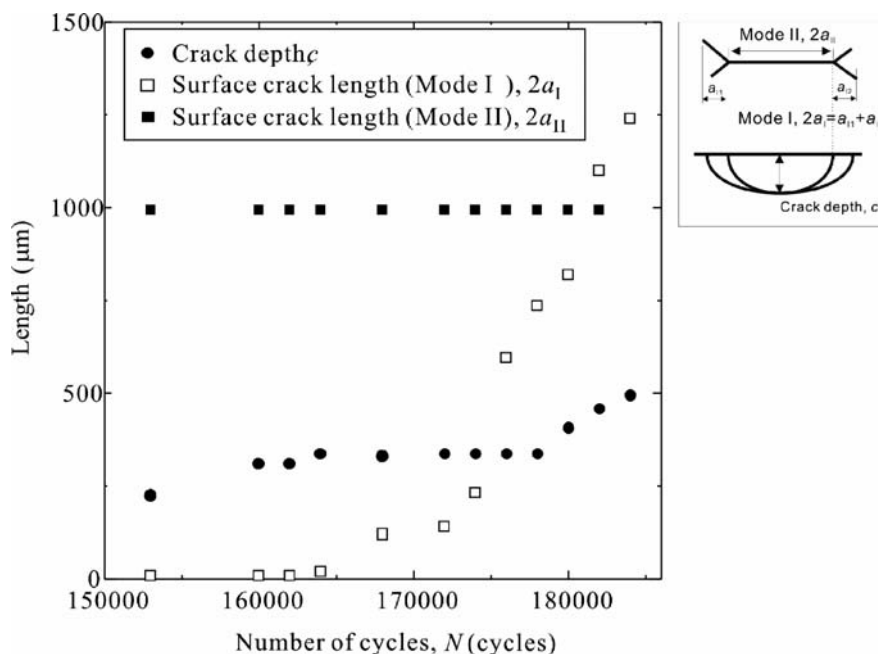


図 3 Change of crack shape with number of cycles

参考文献：

- [1] 清真樹, Kim Bok-key, 中井善一, ”高強度孔のねじり疲労におけるき裂の発生と伝ば”, 第 28 回疲労シンポジウム講演論文集, pp.133-137 (2006).
- [2] 塩澤大輝, 中井善一, 中川和士, ”放射光マイクロ CT によるねじり疲労き裂の観察”, 日本材料学会第 58 期学術講演会論文集, pp.151-152 (2009).