

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 Mode 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 においてき裂進展を観察する手法を構築した。その結果、内部に進展したき裂先端におけるき裂の分岐が観察された。またき裂の合体および合体後のき裂進展挙動を三次元的に測定することが可能となり、放射光 μ CT イメージングが複雑な多軸応力状態におけるき裂進展メカニズムの解明に有効であることが明らかとなった。

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く、多軸応力下の疲労き裂伝ばについては、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。その結果、平滑材のねじり疲労下でのき裂伝ばにおいて、せん断型 (Mode II) から引張型 (Mode I) への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。そのため、筆者らは高強度鋼についてねじり疲労試験を行い、原子間力顕微鏡および電子顕微鏡を用いてき裂の発生・進展を観察し、き裂進展モードの遷移条件について考察を行ってきた[1]。しかしながらこれらの観察はき裂の表面における形状の観察であるため、正確な評価を行っている保証はない。一方、これまでに筆者らは放射光 μ CT イメージングを用いて微小き裂の3次元形状の観察を行ってきた[2]。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。

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。供試材の機械的性質は 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。

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 Fig. 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。

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.

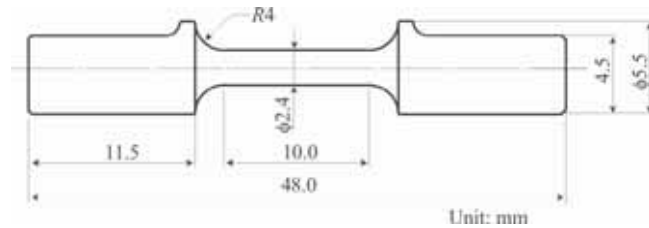


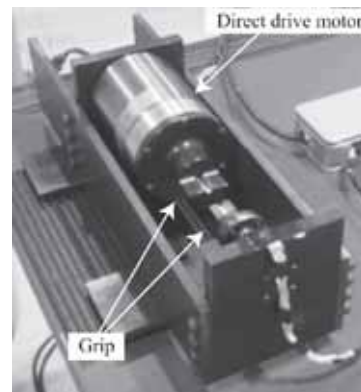
図 1 Geometry of specimen

(2) 観察方法

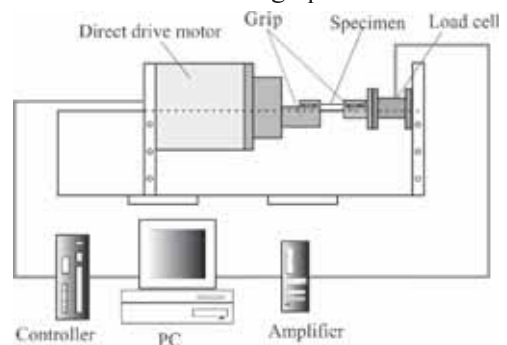
CT 撮影は SPring-8 の BL19B2 ビームラインで行った。検出器にはビームモニタ(BM2, $f=24$)と CCD カメラ(C4880-41)の組み合わせを用いた。この検出器における有効ピクセルサイズは $2.64\mu\text{m}$ である。測定条件では X 線のエネルギーを 37keV 、試料-カメラ間距離を 350mm とし、 0° から 180° まで 0.5° 刻みで回転させながら透過像を得た。これらの透過像から Field back projection 法を用いて三次元像を再構成した。ねじり疲労き裂の進展挙動を観察するために、測定ハッチの外側で可搬型疲労試験機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説明する。負荷繰返し数 $N=6.25\times 10^4$ (cycles) におけるき裂の再構成像を図 3 に示す。図 3 (a) では試験片軸方向に平行な断面像を線吸収係数分布で表しており、開口したき裂部分は線吸収係数が低く、暗色として現れる。図 3 (b) は軸方向に垂直な断面像を示しており、き裂形状を明瞭にするために、空気領域での線吸収係数を基準に二値化処理および反転処理を施した。図 3 (a) より、試験片表面では試験片軸方向にせん断型き裂が生じ、さらにせん断型き裂が分岐して、引張型への遷移が現れていることが分かる。観察されたせん断型き裂は全て軸方向に進展していた。これは圧延された材料の組織形状が影響したものと考えられる。また表面から内部のいずれの深さ位置においてもき裂の分岐が見られる。せん断型き裂の深さ c が最大となる付近の断面 (図 3-(b) (4)) に着目すると、深さ方向にもき裂の分岐が現れていることがわかる。このようにせん断型き裂の先端全域においてき裂の分岐が生じていた。表面のせん断型き裂長さ $2a$ とき裂深さ c のアスペクト比 c/a は 0.43 であり、他の観察されたせん断型き裂部のアスペクト比も約 0.45 であった。引張型へ遷移したき裂の分岐角度 2θ は試験片表面において約 60° であり、引張型き裂の進展方向は最大主応力方向よりも小さい。また最大き裂深さの位置におけるき裂の分岐角度は約 50° であった。このき裂では、試験片表面でき裂の遷移が確認された初期の段階で内部でもき裂の遷移が生じていた。



(a) Photograph.



(b) Schematic illustration.

図 2 Torsional fatigue testing machine.

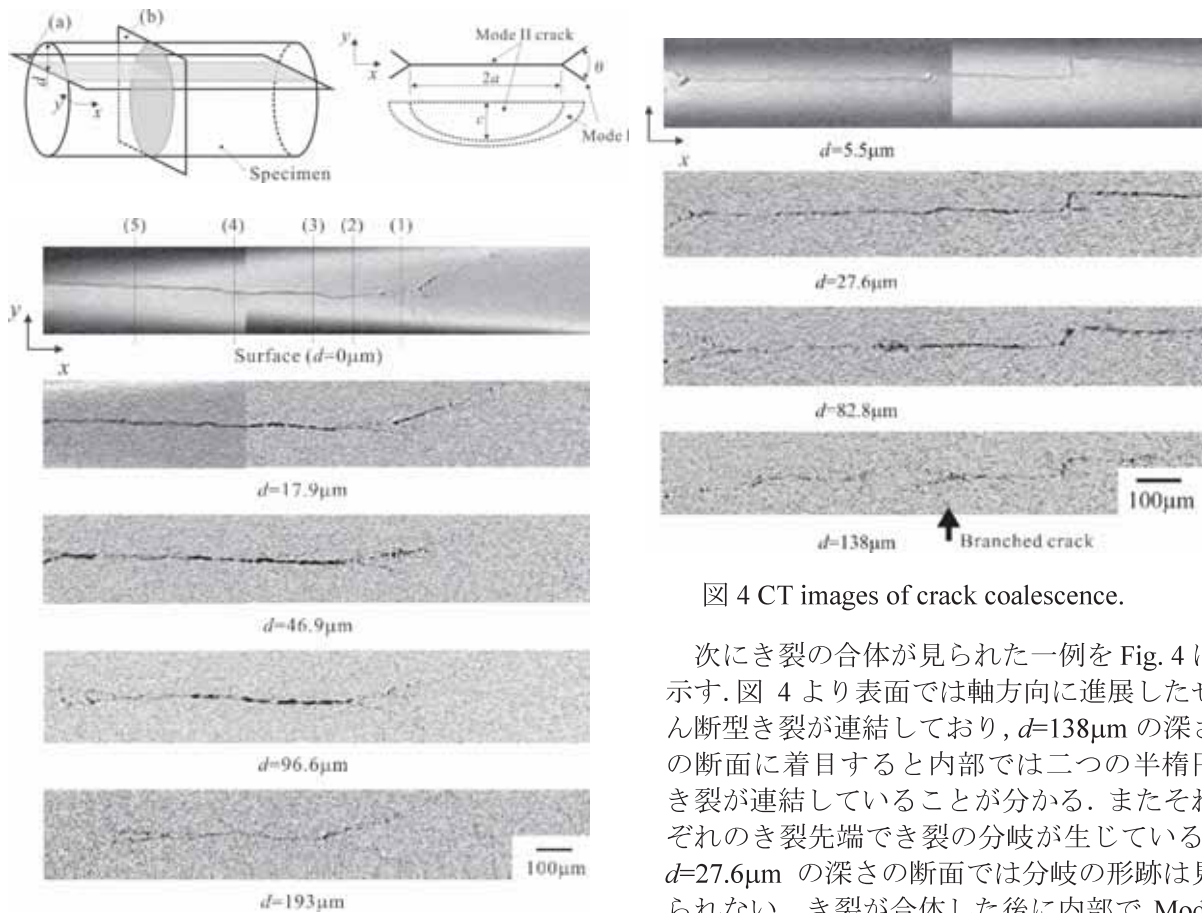
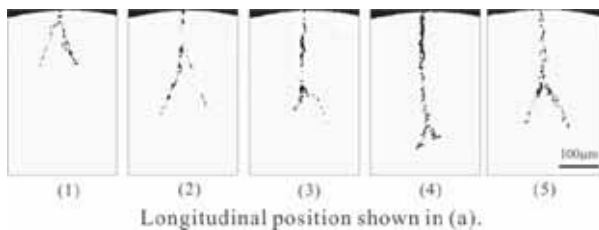


図 4 CT images of crack coalescence.

次にき裂の合体が見られた一例を Fig. 4 に示す. 図 4 より表面では軸方向に進展したせん断型き裂が連結しており, $d=138\mu\text{m}$ の深さの断面に着目すると内部では二つの半楕円き裂が連結していることが分かる. またそれぞれのき裂先端でき裂の分岐が生じている. $d=27.6\mu\text{m}$ の深さの断面では分岐の形跡は見られない. き裂が合体した後に内部で Mode II から Mode I への遷移条件に達して, き裂の分岐が生じたものと考えられるが, 進展メカニズムおよび遷移条件を解明する上で表面でのモードの遷移の影響を受けず内部のみでき裂の分岐が生じたことは興味深い. $\tau_i=500\text{MPa}$ の疲労試験ではき裂進展モードの遷移を示さず, き裂は最大せん断応力方向(軸方向)にのみ進展した様子が観察された. このように表面観察では評価できない多軸応力状態における複雑なき裂進展挙動を観察することが可能であることが明らかとなった.

(a) In the circumferential section (parallel to the surface).



(b) In the transverse section.

図 3 CT images of torsional fatigue crack.

今後の課題 :

可搬型ねじり疲労試験機を開発し, 放射光 μCT イメージングによるねじり疲労き裂の進展挙動の非破壊的かつ 3 次的に観察する手法を構築した. 本手法により, 内部で分岐するねじり疲労き裂の進展挙動を観察することに成功した.

今後は内部き裂形状を考慮した進展モデルを構築すると共に, 進展挙動に及ぼす試験片の材質や結晶粒形状の影響について検討し, 材料表面改質への知見を得る予定である.

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, 田中拓, 尾角英毅, 宮下卓也, 梶原堅太郎, ”放射光マイクロイメージングによる鋼中のき裂観察”, 材料, vol.56 no.10, pp.951-957 (2007).