

## 繰返しねじり荷重条件下での予き裂からのき裂進展と停留\*

田中啓介<sup>\*1</sup>, 秋庭義明<sup>\*1</sup>  
御厨照明<sup>\*1</sup>, 田中光一<sup>\*2</sup>Propagation and Arrest of Fatigue Cracks from a Precrack  
under Cyclic Torsional Loading in Medium-Carbon SteelKeisuke TANAKA, Yoshiaki AKINIWA,  
Teruaki MIKURIYA<sup>\*3</sup> and Kouichi TANAKA<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,  
Furo cho, Chikusa ku, Nagoya shi, Aichi, 464 8603 Japan

Fatigue tests of crack propagation from a pre crack in thin walled tubular specimens made of a medium carbon steel were performed under cyclic torsion with and without superposed static tension. The condition of the transition from shear to tensile mode and the propagation behavior during this transition were investigated from the viewpoint of fracture mechanics. The direction of fatigue crack propagation follows the direction of the maximum of the total range of the tangential stress,  $\Delta\sigma_{\theta,\max}$  near the crack tip and then gradually changes to the direction perpendicular to the maximum of the total range of the principal nominal stress. The propagation rate is faster than the uniaxial data when compared at the onset of crack extension and at high stress intensity factors. The former acceleration is caused by crack closure and the latter acceleration is due to the non singular  $T$  stress. The negative nonsingular stress induces excessive plasticity ahead of the fatigue crack, and then accelerates the fatigue crack.

**Key Words:** Fatigue, Crack Propagation, Mixed Mode, Mode I, Mode II, Cyclic Torsion, Body Force Method

## 1. 緒 言

実構造物の中には、動力伝達軸、発電用タービン軸あるいは配管等のようにねじりモーメントとともに、曲げ荷重を同時に受ける要素が多い。このよう複合荷重を受ける部材中のき裂は、混合モード負荷を受ける場合が多く存在する。このため、複合荷重下での疲労き裂の破壊力学的研究も行われているが、モードI単独の場合に比較して不明な点が多い。特にこのうち、繰返しねじり負荷を受ける丸棒においては、初期に軸方向に発生したせん断き裂が、進展と共に方向を変えモードIの進展を示すことが報告されている<sup>(1)</sup>が、このき裂進展方向の遷移の条件、遷移時のき裂の挙動に関して十分に明確であるとはいがたい。

村上ら<sup>(2)</sup>は、丸棒の微小円孔から軸力疲労で形成した予き裂を有する部材の繰返しねじり条件下での疲労限度の推定法を提案している。この場合、疲労限度では予き裂から分岐した状態でき裂は停留しており、き裂の連続進展が疲労限度を決定している。また、横堀ら<sup>(3)</sup>は薄肉円筒試験片の円周方向に導入したスリットからの、繰返しねじり条件下での疲労き裂進展挙動の

検討を行っている。ここでは、簡便法による応力拡大係数の評価を通してき裂進展法則を提案している。さらに、星出ら<sup>(4)</sup>あるいはIto<sup>(5)</sup>は、予き裂からの繰返しねじり条件下でのき裂進展のJ積分を用いた評価を試みている。予き裂からの繰返しねじり条件下での疲労き裂の進展に関しても、不明な点が多く、例えは負荷応力比の影響に関しても明確でない。

本研究では、切欠きからモードIで発生した予き裂を初期欠陥として、この予き裂に、繰返しねじり（モードII）単独および繰返しねじりと静的軸力（モードI）の重畠を加えた場合の疲労試験を応力比-1と0のもとで行い、予き裂からの疲労き裂の進展開始条件、進展モードの遷移条件および進展挙動の詳細な観察を行い、進展挙動の微視的機構について検討すると共に、破壊力学的パラメータとの関係を検討した。

## 2. 実験方法

**2.1 材料および試験片** 材料は機械構造用中炭素鋼 (JIS S45C) の直径32mmの圧延丸棒で、その化学成分はwt%でC 0.43, Si 0.19, Mn 0.81, P 0.022, S 0.02, Cu 0.01, Ni 0.02, Cr 0.14である。材料の組織は引抜した影響でフェライトとパーライトが層状になっている。なお、フェライト結晶粒径は18μmである。材料の完全焼きなまし後の機械的性質は、降伏応力は

\* 原稿受付 2001年5月21日。

<sup>\*1</sup> 正員、名古屋大学工学部(番号464 8603 名古屋市千種区不老町)。<sup>\*2</sup> ニチハ(株)(番号460 8610 名古屋市中区錦2-18-19)。

E-mail: mikuriya@mech.nagoya-u.ac.jp

319MPa, 引張強さは583MPa, 真破断力963MPa, 絞り49.4%であった。また、ヤング率は216GPa, そしてポアソン比は0.279である。ピッカース硬さは164である。本材料の平滑材の両振り回転曲げ疲労限度（振幅）は223MPaで、 $R=-1$ での長いき裂の下限界応力拡大係数（負側も含めた値）を荷重漸減法で測定した結果は $\Delta K_{th}=10.5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , また有効応力拡大係数範囲は $\Delta K_{effth}=2.9\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である<sup>(6)</sup>。

試験片は図1に示すような外径16mm, 内径14mm, 肉厚1mmの中空円筒試験片を使用した。試験片内部はホーニング仕上げ加工である。加工後、真空中で850°C, 1時間の焼きなましを行った。その後、試験片表面の平行部を#800までエメリー紙で研磨した後、電解研磨をし、0.05μmのアルミナの順で鏡面に仕上げた。さらに、試験片中央部には直径0.2mmのドリルで貫通穴を開いた後、650°Cで1時間のひずみ取りの真空焼きなましを行った。

**2.2 疲労試験** 試験機には電気油圧サーボ式引張圧縮ねじり複合疲労試験機（島津製作所製 EHF-ED 10/TQ-40L）を使用した。試験はすべて室温大気中で行った。

まず、試験片に引張・圧縮の繰返し応力（振幅 $\sigma_a=190\text{ MPa}$ ）を加えて、全長 $2a$ が約1mmの疲労予き裂を導入した。ここで応力比 $R$ は-1, 周波数は20~30Hz, 荷重波形は三角波である。その後、650°Cで1時間のひずみ取り焼鈍を行い、予き裂作製時に生じた硬化層や

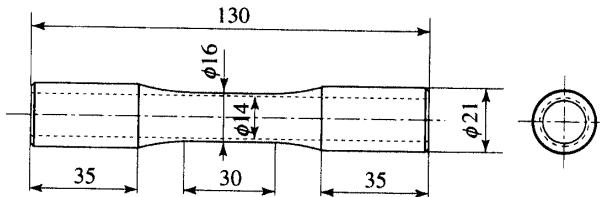


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

残留応力を除去した。予き裂はマクロには応力軸に垂直であるが、ミクロにはジグザグの屈曲を伴っている。

試験は以下に示す3通りについて行った。

(1) Case A : 応力比 $R=-1$ の繰返しねじりのみを負荷するモードII疲労試験

(2) Case B : 応力比 $R=0$ の繰返しねじりのみを負荷するモードII疲労試験

(3) Case C : 応力比 $R=-1$ の繰返しねじりによるせん断応力とそれと等しい大きさの静的引張応力を負荷する混合モード（I+II）疲労試験

なお、各試験周波数は5~30Hz, 荷重波形は三角波とした。

**2.3 き裂の観察** き裂の観察およびき裂長さの測定にはレプリカ法を用いた。試験中に採取したレプリカに金蒸着を施し、走査型電子顕微鏡（SEM, JEOL 6330F）で観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 き裂進展開始条件および連続進展条件

表1に、き裂進展開始およびき裂の連続進展条件の実験結果をCase A, B, Cについて示す。表中の進展した場合のき裂長さは予き裂からの平均的な進展方向への投影長さとし、応力拡大係数は予き裂長さ $2a_0$ に対して求めた値である。応力レベルが低いとき、き裂は片方の予き裂より発生し、モードIIのせん断形のき裂の状態で停留した。しかし、この応力は試験片によりばらついた。そこで本研究ではき裂進展開始条件として、予き裂の両端からき裂が進行し、かつ片方が10μm以上進展したときとした。この条件は、後述のように、き裂進展がせん断形から引張形となる分岐開始点はこれにほぼ等しくなる。

一方、き裂の進展開始応力以上でも、低応力ではき裂が引張形の分岐き裂となつた後停留した。ここで、停留条件はき裂進展速度が $1 \times 10^{-11}\text{ m/cycle}$ より小さく

Table 1 Onset and arrest conditions of crack propagation from pre-crack

Case	Stress ratio R	Torsional stress amplitude $\tau_a$ (MPa)	Tensile stress $\sigma_s$ (MPa)	Mode II stress intensity factor $\Delta K_{II}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	Mode I stress intensity factor $K_I$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )
A	Onset	-1	40~50	0	3.20~3.93
	Continuous propagation	-1	90~100	0	7.47~7.84
B	Onset	0	40~45	0	3.13~3.64
	Continuous propagation	0	80~90	0	6.58~6.91
C	Onset	-1	35~40	35~40	1.40~1.60
	Continuous propagation	-1	75~85	75~85	5.75~6.64

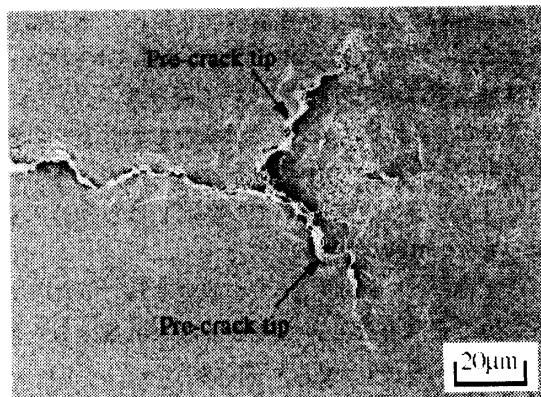
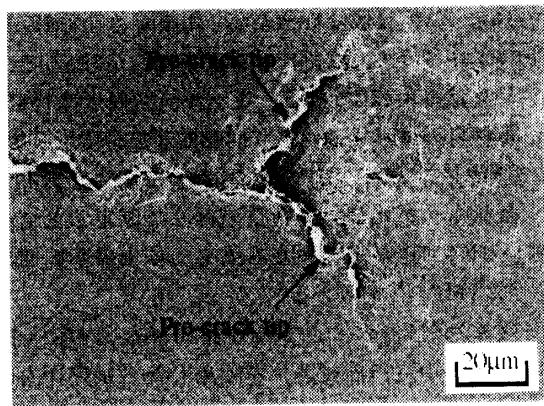
(a)  $\tau_a = 70 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 0 \text{ MPa}$ ,  $R = -1$ ,  $N = 2.1 \times 10^6$ (b)  $\tau_a = 90 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 0 \text{ MPa}$ ,  $R = -1$ ,  $N = 1.8 \times 10^6$ 

Fig. 2 Micrographs of arrested cracks in Case A

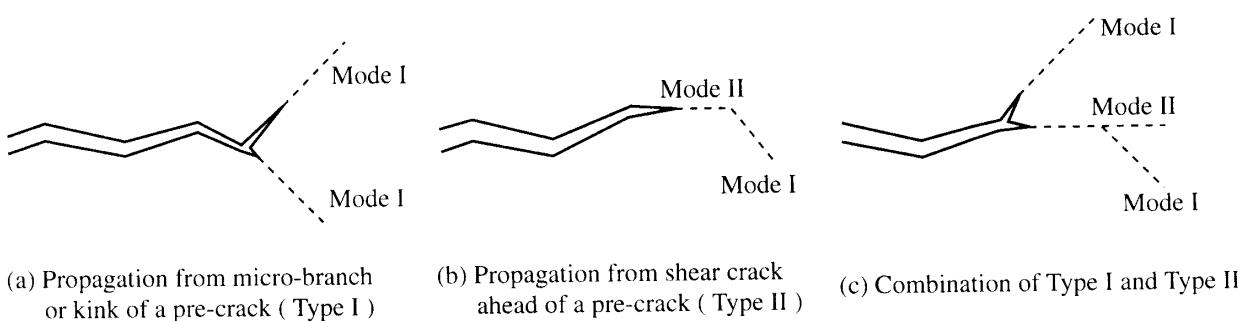


Fig. 3 Schematic illustration of crack branching types

なったときとした。つまり、予き裂材の疲労限度はき裂が進展開始する条件ではなく連続進展する条件で決まっている。表中には連続進展条件の結果も示した。

Case AとCase Bの疲労試験の結果を比較すると、疲労き裂進展開始限界はほぼ等しい値を示しているが、き裂連続進展限界はCase Bの応力比Rが高い方が低い。また、Case CはCase Aと比べ、疲労き裂連続進展限界は小さな値となった。これは静的な応力を加えることで、予き裂面の摩擦が減少するためと考えられる。しかし、この効果は本実験の範囲では非常に小さい。また、き裂進展開始限界に対しては静的引張の効果は小さい。さらに、この値はモードI単独で $R=-1$ の場合の $\Delta K_{th} = 10.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ よりは低く、 $\Delta K_{effth} = 2.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に非常に近い。

**3.2 疲労き裂の微視的観察** Case Aにおける疲労試験後の停留き裂のSEM写真を図2に示す。図2(a)の予き裂はすでに2つに分岐しており、その枝分かれした予き裂先端から引張形(モードI)にき裂が進展した後、停留している。図2(b)のき裂は、予き裂先端からせん断形(モードII)で少しき裂進展したのち、モードIになったところで停留した。同時に予き裂先端近傍の屈曲部の微視的な分岐き裂から別の分岐き裂が引張形の進展をし、途中で停留した。

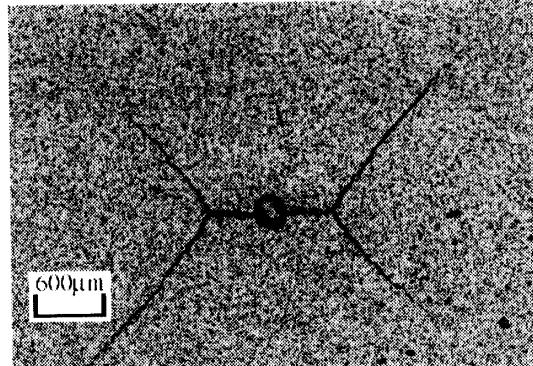
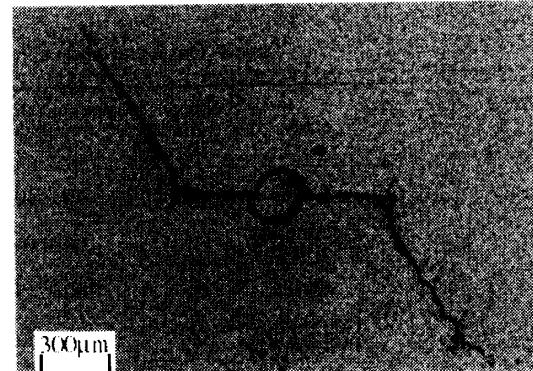
(a)  $\tau_a = 100 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 0 \text{ MPa}$ ,  $R = -1$ ,  $N = 1.89 \times 10^6$  (Case A)(b)  $\tau_a = 90 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 0 \text{ MPa}$ ,  $R = 0$ ,  $N = 1.57 \times 10^6$  (Case B)

Fig. 4 Micrographs of not arrested cracks

図3には予き裂からの分岐形成のタイプを模式的に示す。予き裂の微視分岐き裂からそのまま分岐き裂が成長する場合 (Type I), 予き裂からせん断形のき裂進展をした後、引張形に転じる場合 (Type II) があり、実際にはこれらが混在する。図2(a)はType Iで図2(b)は混在型である。進展開始限界直下の低い応力においても疲労き裂は形成されるが、これらはせん断形 (モードII) のまま停留する。これはステージIき裂であると考えられる。一方、進展開始以上で連続進展限界以下の応力レベルではき裂は分岐き裂の形成後、引張形き裂の状態で停留する。つまり、破断限界は分岐した引張形のき裂が成長するかどうかで決まっている。

応力比  $R=0$ においても、連続進展限界直下では上下に分岐した引張形き裂が停留している。

連続進展したき裂を図4に示す。繰返しねじり荷重が  $R=-1$  の時には、予き裂先端から上下方向に分岐して進展しているのが観察される。一方、 $R=0$ の場合両方に分岐はするが、一方の分岐き裂は成長を停止し、片一方のみが成長する。

**3.3 疲労き裂進展方向** 予き裂から進展したき裂の角度を測定した。停留したき裂についてはき裂に沿って0.01mm毎に、停留せずに進展し続けたき裂についてはき裂に沿って0.1mm毎にき裂の進展角度を測定した。き裂進展角度  $\theta$  は、図中の挿入図のように試験片の軸と垂直な予き裂方向からの角度とした。その結果を図5に示す。

Case Aの進展し続けた疲労き裂進展角度を図5(a)に示す。この場合、き裂進展の角度はかなり変化しているが、き裂進展初期には50~60度ぐらいであったが、進展するに従って40~50度程度に減少した。

Case Cでの進展した疲労き裂進展角度を図5(b)に示

す。き裂進展初期には50~70度程度であった角度が進展するに従って40~50度程度へと減少する傾向を示し、Case Aとほぼ同じ結果となった。

Case Bでは、図4(b)のき裂が長く進展した右下と左上のき裂の進展角度について測定した。き裂進展角度は大きく変化しているが、き裂進展初期には約60度であったものが、き裂進展に伴って約50度へと減少する傾向を示した。一方、右上と左下のき裂は、少しせん断形で進展した後分岐し、その後停留した。このき裂進展方向も60度程度であった。

き裂進展開始の0.1mm以下の長さの領域では、材料の結晶構造の影響を大きく受けて、き裂進展方向が大きくばらつく。停留したき裂の進展角度も大きなばらつきがあった。これは、き裂進展初期においては材料の微視組織の影響を大きく受けるためである。一方、連続進展したき裂の進展方向の角度の測定結果においても、き裂進展角度の増減はあるが、き裂進展初期(約100μmの平均の進展方向)は約50~60度である。き裂が長く進展するに従って約40~50度へと減少した。さらに、これらのき裂進展方向に対する静的負荷の影響はほとんどない。

予き裂からのき裂進展初期においては、き裂の進展方向はき裂先端の局所応力場によって支配される。そして、その方向はき裂が成長するに従って徐々に公称応力の主応力に垂直方向に移って行くものと予想される。局所応力場に基づくクライテリオンの一つとして最大接線応力 (Maximum tangential stress criterion : MTS criterion) がある<sup>(7)</sup>。これに対応する公称応力クライテリオンは、き裂は主応力方向に垂直に進展することになる。これを用いて疲労き裂の進展方向を検討する。このクライテリオンを疲労き裂に適用する場合、

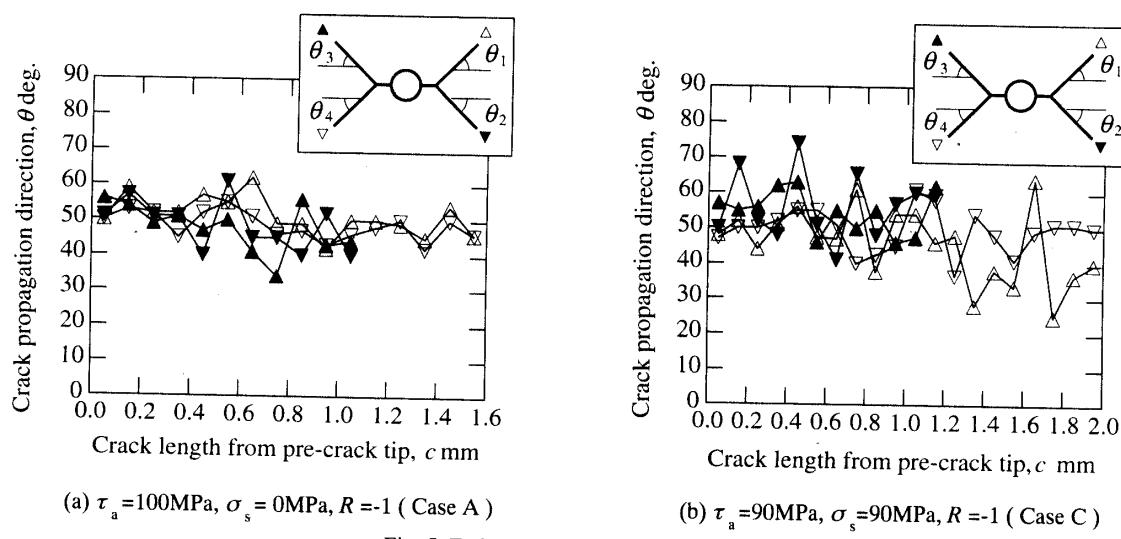


Fig. 5 Fatigue crack propagation path

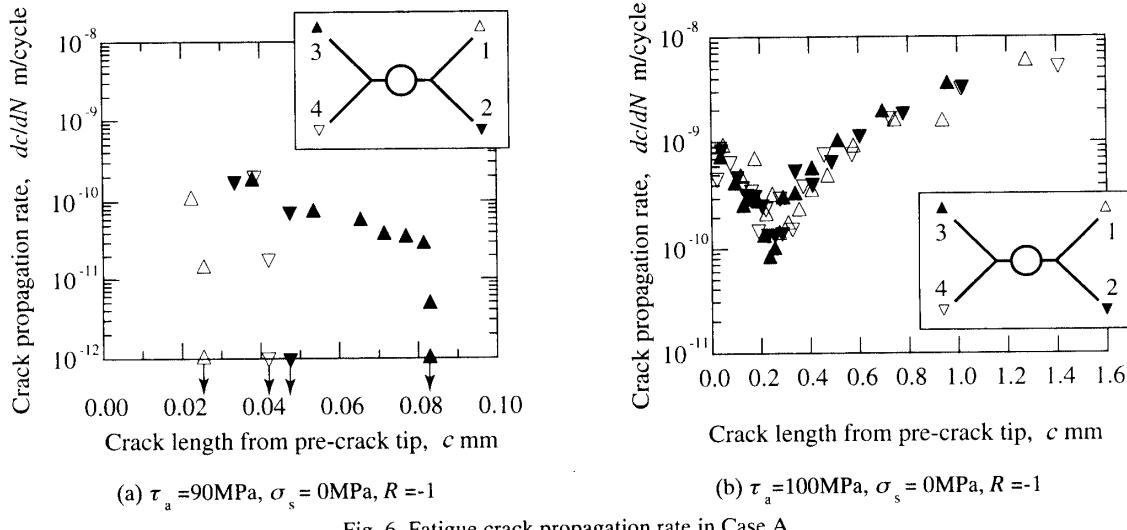


Fig. 6 Fatigue crack propagation rate in Case A

き裂進展方向を決定するパラメータとして接線応力の全振れ幅の最大値  $\Delta \sigma_{\theta_{\max}}$  あるいは、き裂が圧縮側で閉口していることを考慮した接線応力の正の振れ幅の最大値  $\Delta \sigma_{\theta_{\max}^+}$  が考えられる。前者のクライテリオンによるとCase A, B, C全てにおいて、き裂進展初期においてき裂は±70.5度方向で、十分進展した後は±45.0度と予測された。一方、後者のクライテリオンでは、Case Bでは、Case Aと同一で、進展直後は-70.5度方向で進展後は-45.0度方向となる。また、Case Cでは、進展直後は±53.1度方向で、進展後は±31.7度方向と予測される。

Case Bの場合、き裂進展初期においてき裂先端から2方向に分岐していることから、最大接線応力範囲  $\Delta \sigma_{\theta_{\max}}$  がき裂進展に有効であると推測される。また、Case AとCase Cとでき裂進展方向に大きな違いは見られなかったことからも、き裂進展方向の決定に対しては負側を含めた変動全幅  $\Delta \sigma_{\theta_{\max}}$  クライテリオンを支持している<sup>(8)</sup>。

**3.4 疲労き裂進展速度** き裂の連続観察を行うことにより、き裂の進展速度を求め、き裂進展速度  $dc/dN$  と予き裂からのき裂進展量  $c$  との関係を求めた。ここでのき裂長さは進展した平均方向へき裂を投影した長さである。

Case Aで停留した場合の疲労き裂進展速度とき裂進展量の関係を図6(a)に示す。き裂は発生した後、わずかに進展し、停留した。その時の進展量は0.1mm未満であった。一方、き裂が進展し続けた場合について図6(b)に示す。き裂進展量が約0.3mmまでは、4つのき裂の伝ば速度は約  $10^{-10} \text{ m/cycle}$  まで減少した。しかし、き裂進展量が0.3mm以上になると、伝ば速度は上昇した。

Case B, Cにおいてもほぼ同様で、停留することなく進展し続けたき裂においては、き裂発生後から約

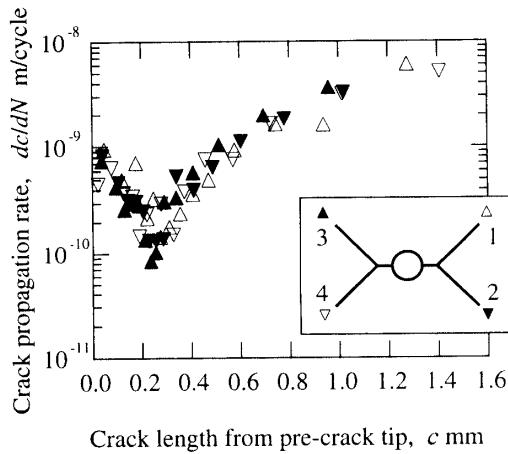


Fig. 7 Simple model for kinked cracks

0.3mmまでは伝ば速度が減少し、その後、き裂は加速した。これはき裂が成長することによって形成されるき裂閉口の影響であると考えられる。実際、モードI予き裂からのき裂進展においても、き裂進展とともに伝ば速度が低下することが示されている。

一方、き裂が停留する場合はすべて0.3mm以下のき裂長さで停留している。

**3.5 疲労き裂進展速度と簡便法による応力拡大係数との関係** ねじり応力  $\tau_a$  が作用するとき、図7に示すように、き裂には45度方向の引張応力  $\sigma_1$  と-45度方向に同じ大きさの圧縮応力  $-\sigma_1$  が作用している場合と同等である。き裂は長くなると公称応力変動成分の主応力を垂直方向に進展する。したがって、簡便的に45度方向の主応力  $\sigma_1$  に垂直な方向にき裂を投影した長さをき裂長さ  $2a$  とし、この直線き裂の応力拡大係数で、実際のき裂の応力拡大係数を代用することが考えられる<sup>(3,4)</sup>。この場合について、次式で最大応力拡大係数を評価する。

$$K_{\max} = \sigma_1 \sqrt{\pi a}$$

き裂進展速度も投影長さ  $2a$  をもとに決定した。この

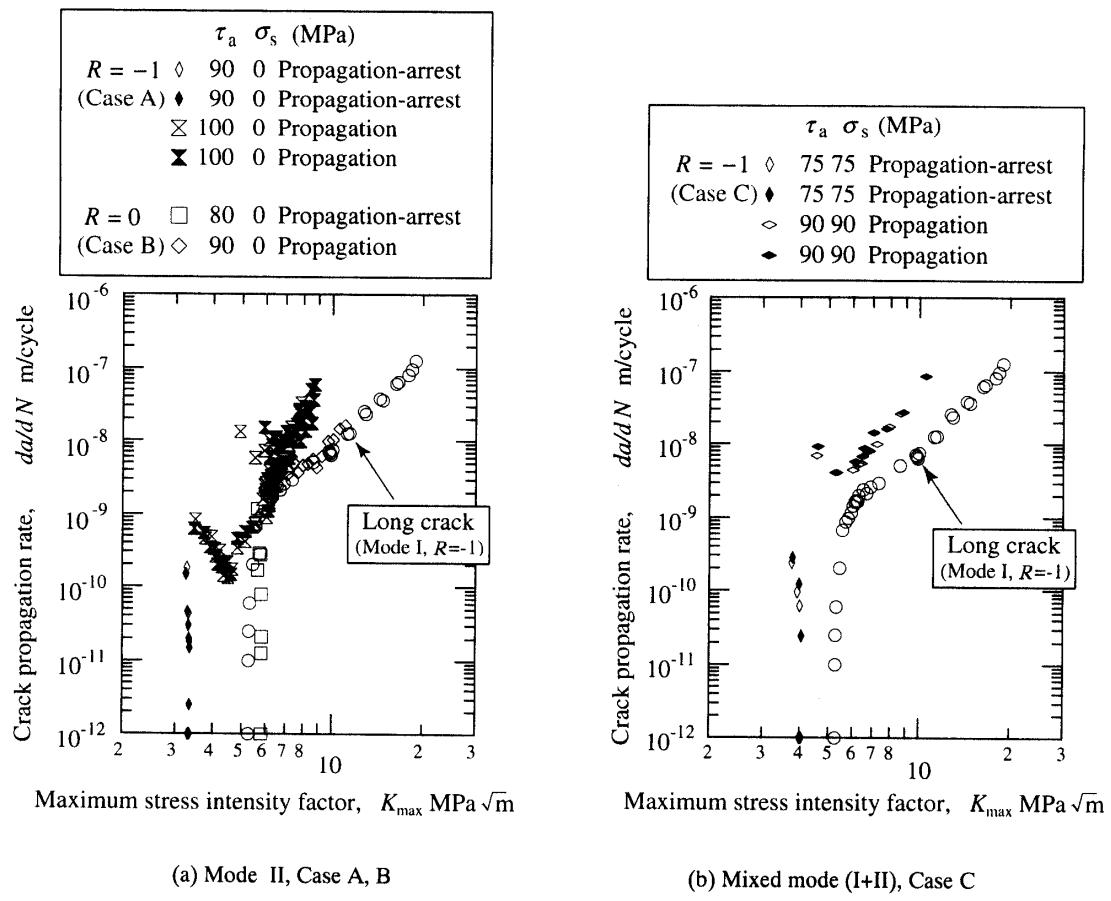


Fig. 8 Relation of fatigue crack propagation rate and stress intensity factor obtained by simple method

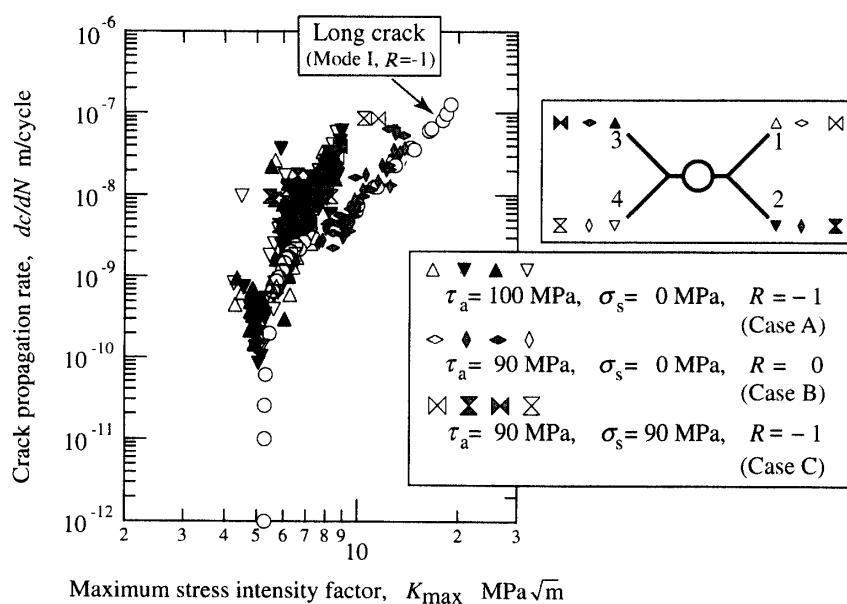


Fig. 9 Relation of fatigue crack propagation rate and stress intensity factor obtained by body force method

$da/dN$ と簡便法による応力拡大係数との関係を図8に示す。図中の○印はモードI荷重下での応力比 $R=-1$ の長いき裂におけるき裂進展速度と最大応力拡大係数の関係であり、この関係は $R=0$ から-1の範囲ではあまり変わらない。

Case A, Bのき裂進展速度と最大応力拡大係数との関係を図8(a)に示す。Case Aでは低応力で停留するき裂は、長いき裂より低い下限界値となる。き裂が長くなると長いき裂の関係に近づくが、その後高速側になる。一方、Case Bではき裂が長くなったとき、長いき裂のデータとほぼ一致している。

Case Cのき裂進展速度と最大応力拡大係数との関係を図8(b)に示す。○印に比べ全体的に高速側に位置しているのが分かる。

**3.6 き裂進展速度とBFMによる応力拡大係数との関係** 屈曲したき裂の応力拡大係数を正確に評価するため、3.3で求めたき裂の進展角度をもとにしたき裂モデルに対して、BFM (Body force method: 体積力法) を用いてモードIの応力拡大係数を求めた<sup>(9)</sup>。解析はすべて平面応力状態で弾性解析を行った。ねじり応力方向によって閉じる側のき裂は存在しないものとして計算した。応力拡大係数は連続進展したき裂についてのみ求めた。その応力拡大係数とき裂進展速度 $dc/dN$ との関係を図9に示す。図中の○印はモードI荷重下での長いき裂におけるき裂進展速度と最大応力拡大係数の関係である。Case Aの場合、き裂が短いときは長いき裂の関係に近くなるが、長くなると3.5と同様に高速側になる。一方、Case Bでは長いき裂のデータとほぼ一致している。さらに、Case Cでは長いき裂のデータに比べ高速側の結果が得られた。

以上のように、Case A, Cの場合では、応力拡大係数を正確に評価した場合も、予き裂からの進展直後、およびき裂が長くなった後も長いき裂よりも高速側になる。前者はき裂閉口が形成されていないことが主な原因であり、一方、後者はき裂に平行な圧縮応力( $T$ 応力)が作用するためき裂先端の塑性変形の領域が増大するためである<sup>(10)</sup>。実際このことはき裂の開口変位とトルクのヒステリシスループで大きな幅広がりが認められ、塑性変形が大きく生じていることが確認された。今後 $\Delta J$ をパラメータとした検討が必要である<sup>(4,5)</sup>。一方、Case Bの $R=0$ では、ループの広がりは大きくなない。なお、BFMで求めたモードII応力拡大係数 $K_{II}$ は、き裂進展と共に急速に小さくなる。

#### 4. 結論

予き裂をもつ中空円筒試験片を用いて、繰返しへじり

り単独および繰返しへじりと静的引張複合負荷条件での疲労試験を行い、疲労き裂の進展開始条件、進展挙動、進展方向、応力拡大係数を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 予き裂材の疲労限度は予き裂から形成される引張形き裂の連続進展条件で決定される。この疲労き裂の連続進展応力は、ねじりの応力比の増加と静的引張応力の重畠で低下する。

(2) 予き裂からの分岐き裂の進展方向は、き裂進展初期においてはき裂先端の局所応力場の接線応力範囲の全幅の最大値 $\Delta \sigma_{\theta_{max}}$ により決定される。一方、き裂が進展すると、徐々に公称応力の変動成分の最大主応力に垂直な方向に変化してゆく。

(3) 予き裂からの分岐き裂が連続進展する場合、き裂発生後約0.3mmまで減速し、その後加速して破壊に至る。ここで進展速度が一番低いときのき裂長さは約0.3mmである。一方、停留する場合は0.3mm以下の長さで停留した。き裂進展の減速もしくは停留は、き裂進展に伴って形成されるき裂閉口の影響によるものと考えられる。

(4) 予き裂に対して斜めに進展する分岐き裂を45度に投影してき裂進展速度と応力拡大係数との関係を求めたが、 $R=-1$ の繰返しへじり単独および静的荷重重畠条件下では、単軸応力の長いき裂の関係より高速であった。 $R=0$ の場合、き裂が長くなると単軸の関係にほぼ一致した。

(5) BFMを用いて屈曲き裂の応力拡大係数を求め、き裂進展速度との関係を求めた。 $R=0$ の場合、単軸の長いき裂のデータとよく一致したが、 $R=-1$ では単軸の場合より高速側となった。き裂平行応力が圧縮である二軸応力下では、疲労き裂先端の塑性域の広がりが疲労き裂進展の加速に影響をおよぼすことが確認された。

#### 文 献

- (1) J. A. Bannantine and D. F. Socie, *ASTM STP 942* (1988), 899-921.
- (2) 村上敬宣, 高橋宏治, *材料*, 47-8(1998), 846-851.
- (3) 横堀寿光, 磯貝毅, 横堀武夫, 小泉幸久, *材料*, 39-443 (1990), 1106-1112.
- (4) 星出敏彦, 河端亮介, 山川倫央, 井上達雄, *材料*, 38-426 (1989), 280-286.
- (5) T. Ito, *Inter. J. Fatigue*, 21-10 (1999), 1087-1097.
- (6) 張洛明, 秋庭義明, 田中啓介, 日本機械学会論文集(A編), 64-621(1998), 1221-1228.
- (7) F. Erdogan and G. C. Sih, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 85 (1963), 519-527.
- (8) 大路清嗣, 辻昌弘, 久保司郎, 小野嘉雄, 八幡篤, 梅井健司, 日本機械学会論文集(A編), 59-562 (1993), 1429-1436.
- (9) 西谷弘信, 陳玉代王行, 才木明秀, 体積力法による二次元応力解析汎用プログラム, (1994), 培風館。
- (10) T. Hoshida, K. Tanaka and A. Yamada, *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 4 (1981), 355-366.