

多連切欠き材の疲れ挙動について

(第四報 切欠きの干渉が、ねじり疲れ特性に及ぼす影響について)

若原 稔

FATIGUE BEHAVIOR OF STEELS WITH MULTIPLE NOTCHES

(Report 4 The Effect of Interaction between Notches on the Characteristics of Twisting Fatigue.)

Minoru WAKAHARA

The behavior of fatigue crack propagation was investigated regarding the effect of a number of notches by a round bar specimen of S35C with one to three sharp notches subjected to twisting.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) Both the fatigue limit for crack initiation τ_{w1} and the number of stress cycles at crack initiation increased by increasing the number of notches.
- 2) The length of non-propagation crack in the fatigue limit for failure τ_{w2} was found longer than that of rotary bending.
- 3) The behavior of fatigue crack propagation in twisting is complicated by branching and coalescence of cracks.

1. 緒 言

疲れ破壊に関する研究は、モードⅠ（開口形）、すなわち回転曲げ疲れ、平面曲げ疲れに関するものは多いが、伝達軸などの破壊に見られるモードⅢ（面外せん断形）、すなわちねじり疲れに関するものは、モードⅢき裂の応力拡大係数 K_{III} の評価⁽¹⁾、J 積分の評価⁽²⁾、そして寸法効果とき裂進展特性⁽³⁾などの報告があるが非常に少ない。

筆者は前報において、切欠きが連続して存在する多連切欠き材の回転曲げ疲れ⁽⁴⁾、平面曲げ疲れ⁽⁵⁾におけるき裂進展挙動について切欠き数が疲れ特性に及ぼす影響を調べ、また実験結果と破壊力学による解析結果との比較検討を行ない、さらに回転曲げ疲れにおいて複数の隣接するき裂間の干渉効果がき裂進展に及ぼす影響について検討した結果、重ね合せの原理によって干渉を考慮した応力拡大係数を用いることによってよく整理されることを報告した⁽⁶⁾。

本報告では、モードⅢ、すなわちねじり疲れの場合、隣接するき裂が干渉を受けながら進展する挙動を調べ、その応力拡大係数の適応性について検討を加えたものである。

2. 供試材料および試験片

供試材料は、市販の直径19mmの機械構造用炭素鋼 S35C を使用した。その化学成分を表1に示す。素材を870℃、30分焼ならしを行なったのち、図1、表2に示す形状、寸法の平滑および切欠き半径 $\rho = 0.15\text{mm}$ の単一より三連までの切欠き試験片を旋削し、その後加工による残留ひずみを除去するために窒素雰囲気中で600℃、1時間の焼なましを行なった。その機械的性質を表3に、加工材と焼鈍材の切欠き底の組織を写真1に示す。

き裂長さの測定は、所定の応力を繰返した試験片の切欠き部を輪切りにし、さらに直径面で縦割りしたものをミニメットで研磨し、5%ピクリン酸で腐食後400倍の倍率で直径上の対称4点のき裂長さを測定してその平均値をその切欠き部のき裂長さとした。二連切欠き試験片では二個の切欠き部のき裂長さの平均値を、三連切欠き試験片では外側二個の切欠き部のき裂長さの平均値をもってその応力繰返し数におけるき裂長さとした。

試験機は、島津曲げ・ねじり疲れ試験機 T B-10形 (98 Nm) を使用し、毎分繰返し数2000回で試験した。

表1 化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S
JIS規格 S35C	0.32 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	<0.030	<0.035
供試材料	0.34	0.25	0.64	0.022	0.009

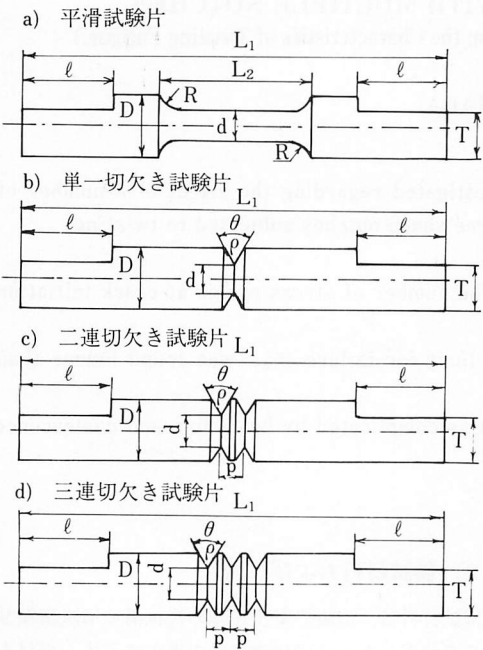
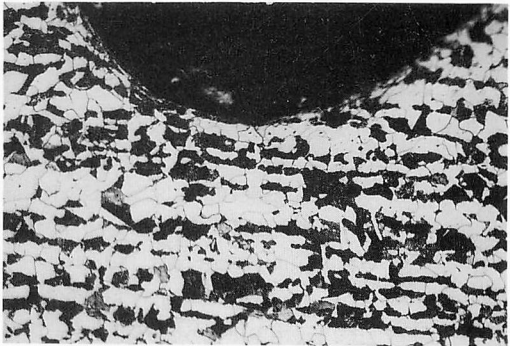
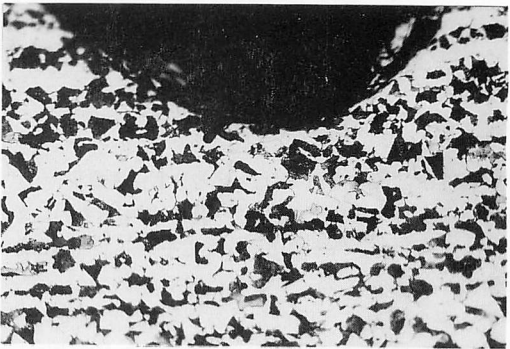


図1 試験片形状



a) 加工材



b) 焼鈍材

写真1 切欠き底の組織写真(×400)

表2 試験片寸法(mm)

D	d	L ₁	L ₂	ℓ	T	R	p	ρ
15	10	150	50	35	12	20	3.58	0.15

表3 機械的性質

	降伏点 σ_Y MP _a	引張強さ σ_B MP _a	真破断力 σ_T MP _a	伸び δ %	かたさ H _V (20)
JIS規格 S35C	>304	>510		>23	157 ~207
供試材料	356	571	1202	34	172

窒素雰囲気中 600℃, 60分焼なまし

3. 試験結果および考察

3-1 疲れ限度

平滑試験片および切欠き試験片のS-N曲線を図2に示す。平滑試験片では繰返し応力 τ がほぼ190 MPaを境として、以上と以下では二つの直線で表わされ、190 MPa以上の応力では破断繰返し数すなわち時間強度が以下の応力の場合より大きくなっている。このことについては、高応力では試験片温度が150℃以上となり（試験片表面が酸化着色しているのが認められた）、青熱ぜい性の影響によって疲れ強さが増大したものであると思われる。

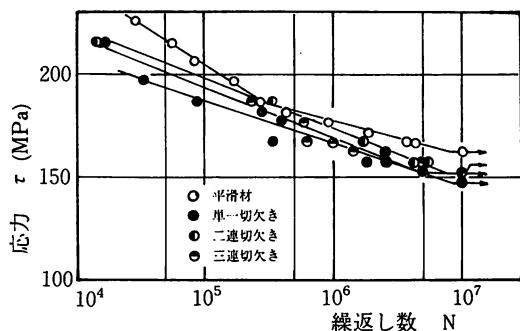


図2 S-N曲線

単一、二連、三連切欠き試験片について比較してみると、単一、三連、二連切欠きの順で時間強度が大きくなっている。複数切欠き試験片の方が単一切欠きの場合より切欠きの干渉効果により時間強度、疲れ限度とも大きくなることは当然であるが、二連切欠きと三連切欠きの場合の相違について検討してみる。切欠き底の応力集中係数については、一つの切欠きを持つ丸棒のねじりに関してPeterson⁽⁷⁾、Neuber⁽⁸⁾、西田⁽⁹⁾などの研究があり、ねじりの場合も曲げ同様に複数の切欠きが存在すると干渉効果により応力集中が緩和されることが知られており⁽⁹⁾、切欠きが周期的に無限個存在する場合についてのいくつかの報告⁽¹⁰⁾はあるが、有限個のものについては非常に少ない⁽¹¹⁾。これらの報告より単一、二連、三連と切欠き数が増加すると応力集中係数が緩和、すなわち切欠き底の最大応力が低下するということが考えられる。

しかし、図2に示されるように二連切欠き試験片と三連切欠き試験片の時間強度を比較すると二連切欠き材の方が大きくなっている。このことは、回転曲げの

場合と同様で⁽⁴⁾、き裂の発生は後述のように切欠き底の最大応力によって決まるが、その後の進展では二連切欠き材の方がき裂の干渉効果が大きくなる結果として現われたものと思われる。

平滑試験片および各切欠き試験片の疲れ強さ τ_{w1} とき裂強さ τ_{w2} の値を表4に示す。鋭い切欠き材($\rho = 0.15\text{mm}$)であるから停留き裂が存在する。そこで疲れき裂が発生する限界の応力、すなわち疲れ強さ τ_{w1} について比較すると表4に示すように単一、二連、三連の順に大きくなっている。き裂の発生が、応力集中係数、すなわち切欠き底の最大応力によって支配されるという種々の切欠き半径をもつ単一切欠き試験片によって得られた回転曲げ疲れの結果⁽¹²⁾より理解される。

表4 疲れ限度

	疲れ強さ τ_{w1} MPa	き裂強さ τ_{w2} MPa
平滑試験片	161.9	—
単一切欠き試験片	78.4	147.2
二連切欠き試験片	88.3	152.1
三連切欠き試験片	98.1	152.1

しかし、前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾で述べたように多連切欠き材では曲げの場合奇数切欠き材と偶数切欠き材では異なった挙動を示し、偶数切欠き材の方が疲れ強さ τ_{w1} が大きくなるという現象は見られず、このことは前報⁽⁴⁾で述べたように曲げの場合奇数切欠き材（試験片中央に谷部、すなわち切欠き底が存在）よりたわみ量が大きくなることを含めて繰返し応力下の切欠き底の変形挙動についてさらに検討する必要があるものと思われる。

一方破断の限界を示す応力、すなわちき裂強さ τ_{w2} については二連切欠き試験片と三連切欠き試験片ではほぼ同じ値が得られ、き裂の干渉による差がほとんど現われなかったためと考えられ、曲げ疲れの場合と同じ傾向を示している。

3-2 き裂進展挙動について

図3に、各き裂試験片の繰返し応力160 MPa、176.6 MPa、190 MPaにおけるき裂進展曲線を示し、図4に三連切欠き試験片の外側および中央切欠きにおける同じ応力でのき裂進展曲線を示す。図3よりき裂の発生する応力繰返し数は、各応力において単一、二

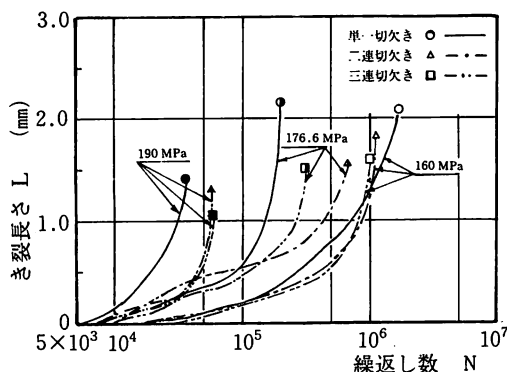


図3 き裂進展曲線

連、三連の順で増加しており、回転曲げ⁽⁴⁾⁽⁶⁾、平面曲げ⁽⁵⁾のような奇数切欠きと偶数切欠きによる干渉効果の差は認められず、き裂発生の限界応力 τ_{w1} と同様に切欠き底の最大応力のみによって支配されるものと思われる。

また、き裂の進展が停帯するき裂長さを比較すると、190 MPa と 160 MPa では応力の大きさによる停帯期間の差はあるがほぼ 0.20mm 程度であり、二連切欠き試験片と三連切欠き試験片ではほぼ相似の変化をしている。これに対して 176.6 MPa では 0.4~0.5mm 附近で停帯している。回転曲げ疲れの場合、この長さはき裂強さ σ_{w2} における停留き裂長さと同程度⁽⁶⁾⁽¹³⁾であるのに対して高応力 190 MPa と疲れ限度より少し大きい 160 MPa では停留き裂長さの半分以下であり、ねじり疲れの場合はき裂の分岐が起こるために停帯するき裂長さが短くなるものと思われるがこのことについては後で述べる。一方、176.6 MPa ではき裂強さにおける停留き裂長さと同程度であるが、ほぼ同じ長さの二本のき裂の干渉を生ずる二連切欠き試験片と、その間に存在する中央切欠き部のき裂の干渉が加わる三連切欠き試験片では干渉効果の差が大きく現われている。

三連切欠き試験片の場合図4に示すように、どの応力においても外側切欠きとほとんど同時か、わずかに遅れて発生した中央き裂は両側き裂の干渉を受けるため進展速度も小さく、あるき裂長さに達すると進展を停止する。それに対して干渉効果の小さい二本の外側切欠き部き裂は、ほぼ同じ大きさで中央切欠き部き裂よりも大きい速度で進展を続けあるき裂長さに達すると断面減少に伴う正味応力の増大によってどちらか一方が急速に進展して破断に至るものと思われる。その進

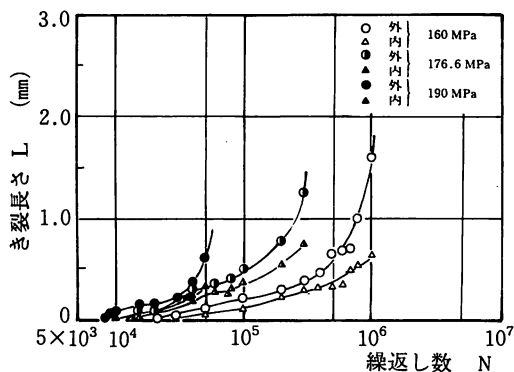


図4 三連切欠き試験片のき裂進展曲線

展の様相は、190 MPa と 160 MPa では外側切欠きき裂、中央切欠きき裂とも繰返し数の増加とともに比較的単調に増加してゆくのに対して、176.6 MPa ではき裂長さが外側切欠きで 0.4mm 附近、中央切欠きで 0.25mm 附近で大きな停帯現象が見られる。これらのことをき裂写真によって考察する。

写真2に繰返し応力 176.6 MPa における単一切欠き試験片のき裂写真を示す。写真 a) に見られるように切欠き底に発生したき裂は間もなく二本のき裂に分岐している。繰返し数の増加とともにさらに分岐を伴いながらき裂が進展していることが数本のき裂が存在している写真 b) によって認められる。この変化は三次元的に進みそれらのき裂の干渉効果によりき裂進展の停帯現象を生ずる。写真 c) は、枝分れした一本の主き裂が急速に進展し、大きく開口して破断に至る直前の状態を示している。

写真3は、同じ応力 176.6 MPa における三連切欠き試験片の外側切欠き部のき裂写真を示す。写真 a) よりき裂発生初期に単一切欠き材の場合と同様に分岐が起こり、写真 b) ではき裂の進展とともに分岐を繰返していることが観察される。単一切欠き材と三連切欠き材の相違は、単一切欠き材の場合初期に分岐したき裂のうち一本の主き裂が枝分れしながら進展してゆくのに対して、三連切欠き材の場合は写真 c) に示されるように分岐したき裂が同じように進展を続けており、さらに合体も起こり (写真 d)) き裂の進展挙動を複雑にしているものと思われる。したがって、前述のように分岐した二つの切欠き部のき裂が干渉する二連切欠き試験片と、その間に短かいき裂が加わって干渉する三連切欠き試験片ではその効果が異って来ることが考えられ、またお互に干渉しながら分岐すること

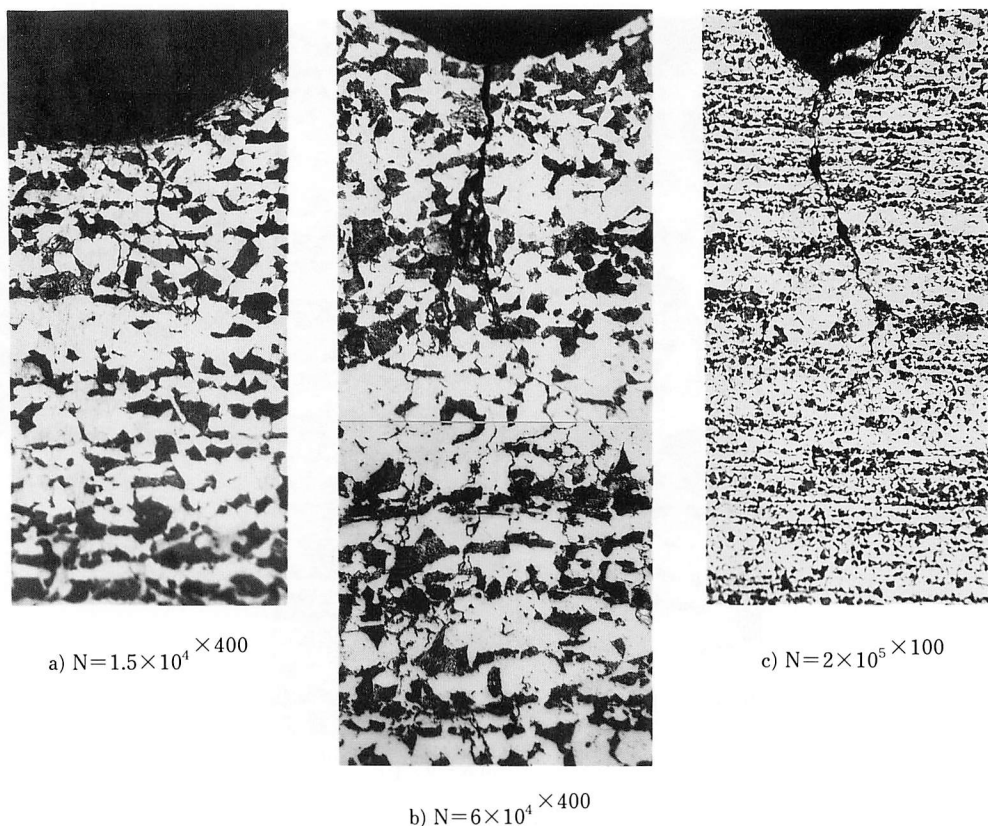


写真2 単一切欠き試験片き裂 ($\tau = 176.6 \text{ MPa}$)

なしに単純に進展してゆく複数切欠き試験片の回転曲げの場合とも異なった挙動を示すことが当然考えられる。

次にき裂が発生する限界の応力、すなわち疲れ強さ τ_{w1} (98.1 MPa) より少し大きい応力 103 MPa における三連切欠き試験片外側切欠きにおける停留き裂を写真4に示す。発生したき裂は分岐を生じているが、その一本のき裂のみが進展して停留していることがわかる。き裂強さ τ_{w2} における停留き裂においても同じ様相を示している。このことは、前述のき裂進展曲線において二連切欠き試験片、三連切欠き試験片ともき裂強さ τ_{w2} より少し大きい応力 160 MPa では単一切欠き試験片と同様に分岐を生ずるが一本の主き裂のみが進展するため単調な変化を示し、応力 176.6 MPa の場合は単一切欠き試験片と異なり複雑な変化を示すのは、き裂の分岐の繰返し、合体などき裂の進展の様相の相違に起因していることが理解される。また、大きい応力 190 MPa においては、き裂発生初期に分岐

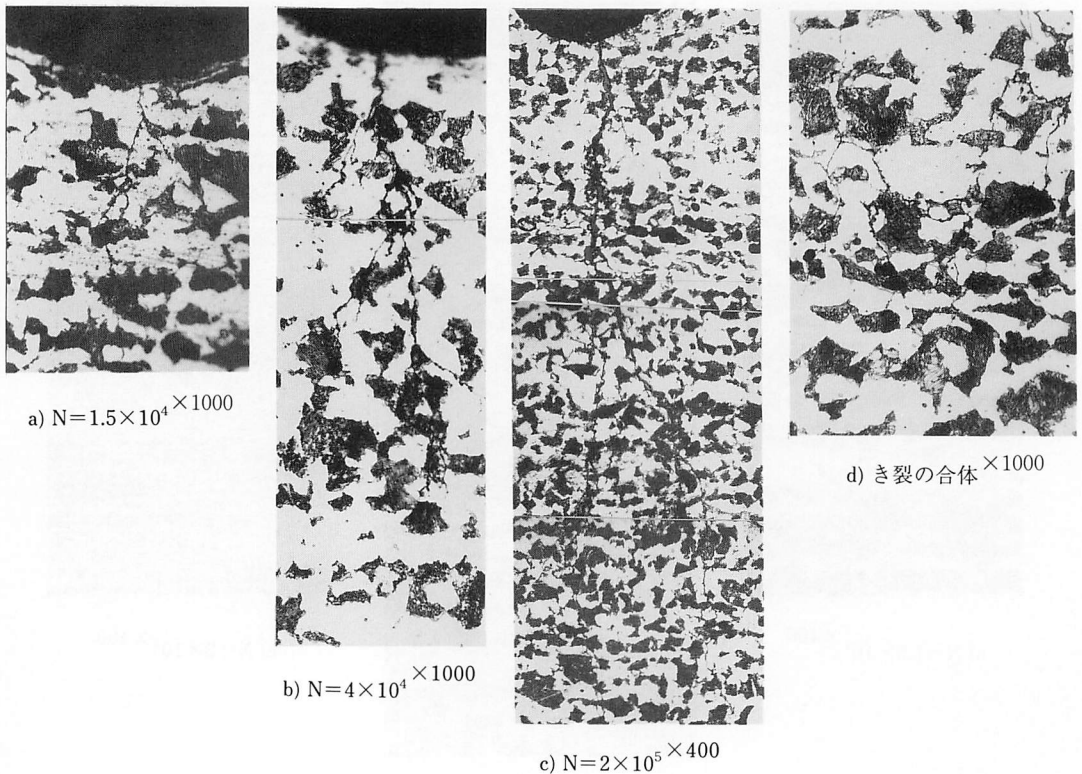
を生ずるがき裂先端の応力が非常に大きいために一本の主き裂のみが急速に進展し、低応力 160 MPa の場合と同様に比較的単調な進展挙動を示すものと思われる。

3-3 き裂進展速度曲線と応力拡大係数

図5に単一、二連、三連切欠き試験片の繰返し応力 160 MPa, 176.6 MPa, 190 MPa におけるき裂進展速度曲線を示し、表5に各切欠き試験片のそれぞれの応力におけるき裂進展速度曲線の変曲点におけるき裂長さとき裂強さ τ_{w2} における停留き裂長さを示す。

回転曲げ疲れ、平面曲げ疲れにおけるこの曲線の傾向としては、応力が大きいときはき裂進展速度は大きく、変曲点におけるき裂長さも大きい、応力が小さくなるにしたがってき裂進展速度は小さくなり、変曲点におけるき裂長さも小さくなりき裂強さ σ_{w2} における停留き裂長さに近づく⁽⁵⁾⁽¹²⁾。

ねじり疲れの場合、図5に見られるように大きい繰

写真3 三連切欠き試験外側き裂($\tau = 176.6$ MPa)

返し応力 190 MPa とき裂強さ τ_{w2} より少し大きい応力 160 MPa においては、変曲点におけるき裂長さは表5に示されるようにいずれの切欠き試験片においても τ_{w2} における停留き裂長さより非常に小さい。また、二連および三連切欠き試験片では、き裂間の相互干渉により単一切欠き試験片と比較して応力が小さくなった場合と同じ効果を生ずるのでき裂進展速度は小さくなるがき裂進展が停滯して進展速度が最小値となる変曲点のき裂長さは少し大きくなっている。繰返し応力 176.6 MPa でも傾向はほとんど同じであるが変曲点におけるき裂長さは他の応力の場合と比較して大きい。しかし、 τ_{w2} における停留き裂長さと比較すると二連切欠き試験片のみがそれよりも大きく、単一、三連切欠き試験片では可成り小さい値を示している。これらのことと、表5に示すき裂強さ τ_{w2} における停留き裂長さ 0.2~0.3 mm と比較して非常に大きいということは、ねじりの場合前項でき裂写真について述べたようにき裂発生初期における三次元的分岐がき裂の停留・進展挙動に複雑に影響することに起因するもの

と思われる。

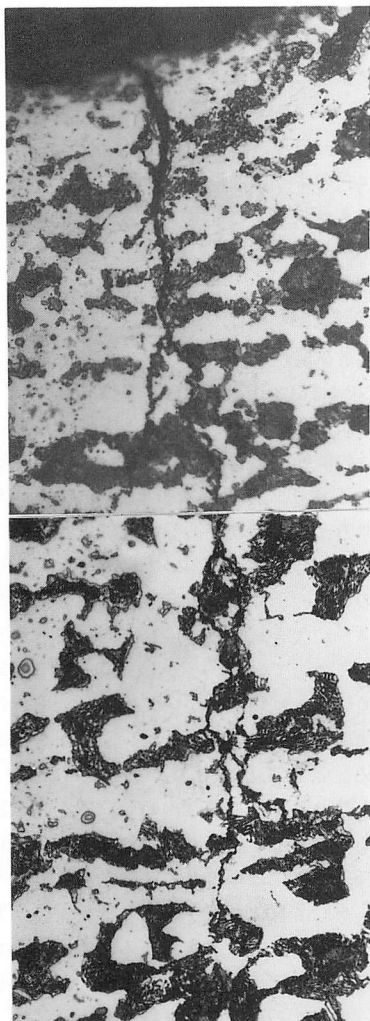
前報において、単一および多連切欠き試験片の回転曲げ疲れおよび平面曲げ疲れに関して応力拡大係数の適応性について検討し、第三報⁽⁶⁾で多連切欠き試験片の場合、隣接するき裂の干渉効果を重ね合せの方法で考慮した応力拡大係数によって非常によく整理されることを導いたが、ねじり疲れの場合、すなわちモードⅢ（面外せん断形）についての適応を試みた。

ねじり疲れの場合もき裂進展曲線の変曲点以後の第Ⅱ期では、塑性域寸法がき裂長さに比して十分小さい、いわゆる小規模降伏状態にあり応力拡大係数の適応が可能と思われる。

単一切欠き試験片の応力拡大係数 K_{III1} は Benthem らの多項近似式⁽¹⁴⁾により

$$K_{III1} = \frac{2T}{\pi r^3} \sqrt{\pi r} F_{III1} \left(\frac{r}{R} \right) \quad (1)$$

ここで



$$\tau = 103 \text{ MPa} \times 1000$$

写真4 三連切欠きの停留き裂

$$F_{III1} = \frac{3}{8} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{5}{16} \left(\frac{r}{R} \right)^3 + \frac{35}{128} \left(\frac{r}{R} \right)^4 + 0.208 \left(\frac{r}{R} \right)^5 \right\} \sqrt{1 - \frac{r}{R}} \quad (2)$$

T：ねじりモーメント

r：き裂底半径

R：丸棒半径

で表わされる。

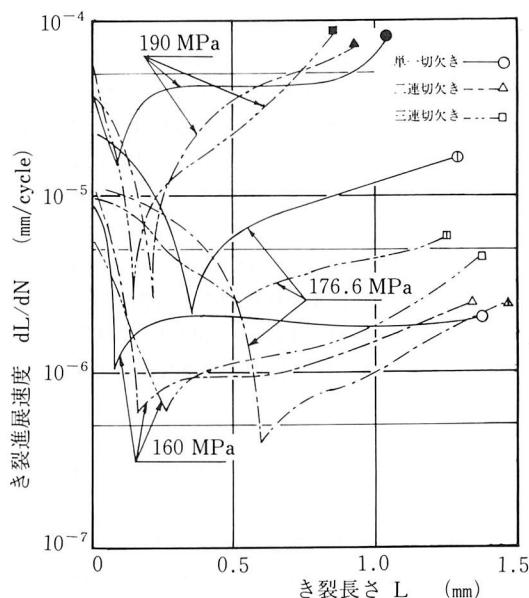


図5 き裂進展速度曲線

表5 変曲点き裂長さと停留き裂長さ (mm)

	160MPa	176.6MPa	190MPa	停留き裂長さ
単一切欠き	0.093	0.355	0.102	0.699
二連切欠き	0.154	0.603	0.158	0.521
三連切欠き	0.285	0.497	0.143	0.643

一方、二連切欠きおよび三連切欠き試験片では、平行に複数のき裂が進展するので、それらき裂先端の応力場の干渉を生じ(1)式をそのまま適用することはできない。

二連切欠き試験片では、曲げの場合と同様に等しい長さの二本の平行なき裂が同じ進展速度で成長し、分岐、合体などによる影響を無視して考えると、その応力拡大係数 K_{III2} は、Smith⁽¹⁵⁾の無限平行き裂群の面外せん断に対する補正係数 F_{III} より

$$F_{III2} = \sqrt{\left(\frac{d}{\pi l_e} \right) \tanh \left(\frac{\pi l_e}{d} \right)} \quad (3)$$

ここで

d：き裂間の距離

l_e ：き裂長さ

を(1)式の F_{III1} の項に代入することによって近似できる。ここでき裂長さ l_e としては、鋭い切欠き材であるからき裂長さ l と切欠き深さ t の和、すなわち有効

き裂長さを用いた。

三連切欠き試験片では、前項で述べたように中央切欠き部のき裂は両外側切欠き部き裂の干渉を受けるためき裂長さは短い。長さの異なる平行き裂間の干渉効果を考慮した補正係数 F については、モードⅠに関して石田の研究⁽¹⁶⁾があり、第3報においてその適応性について検討を行なった。しかし、モードⅢについての報告は見られない。本研究ではその場合の近似値として、等しい長さをもつ両外側のき裂は間隔 d が2倍になるので、モードⅠの場合より類推して無視できるものとし、外側き裂長さ l_s と中央き裂長さ l_c の平均き裂長さ $l_m = (l_s + l_c) / 2$ をもつ二本の等長き裂に対する補正係数 F_{III} を(3)式より求め、その値を(1)式に代入することによって三連切欠き試験片の応力拡大係数 K_{III} とみなした。

図6に各切欠き試験片のき裂進展速度 dl/dN と応力拡大係数の振巾 K_{III} との関係を示す。疲れき裂の進展速度 dl/dN は応力拡大係数の振巾 K の4乗に比例するというParisら⁽¹⁷⁾の提案があり、その後の多くの人の研究によって一般に式 $dl/dN = CK^m$ で整理され、定数 m の値は材料、 K の大きさ、応力状態によって2～7の範囲内にある⁽¹⁸⁾と報告されている。

図6において、繰返し応力190 MPaに対する結果は単一、二連、三連切欠き試験片のいずれの場合も他

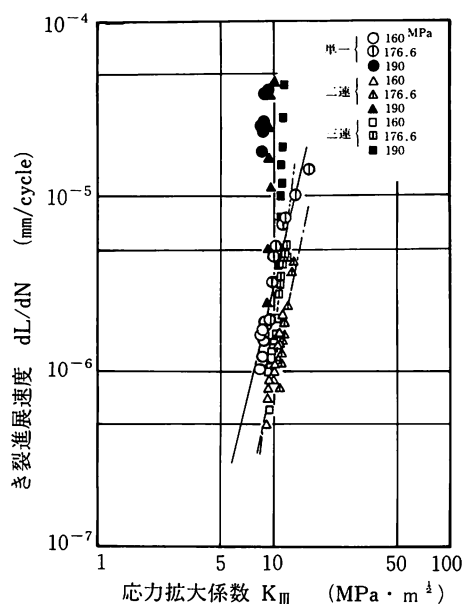


図6 応力拡大係数とき裂進展速度の関係

の応力と異なった傾向を示している。このことは、3-1項で述べたように応力が非常に大きいことによって生ずる靱性脆性の影響によるものと思われる。

繰返し応力160 MPa, 176.6 MPaにおいては、両者の関係は単一、二連、三連切欠き試験片ごとにそれぞれ直線で次式のように近似される。

単一切欠き試験片

$$dl/dN = 1.923 \times 10^{-10} \cdot K_{III}^{4.201} \quad (4)$$

二連切欠き試験片

$$dl/dN = 1.294 \times 10^{-11} \cdot K_{III}^{4.876} \quad (5)$$

三連切欠き試験片

$$dl/dN = 6.761 \times 10^{-15} \cdot K_{III}^{8.406} \quad (6)$$

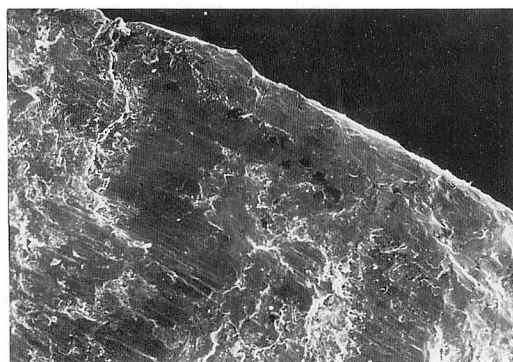
三連切欠き試験片については、干渉を考慮した二連切欠き試験片の関係式によって近似したものであるが単一切欠き、二連切欠きと異なり勾配 m の値が大きく、この近似方法では無理があるように思われる。

一方、二連切欠き試験片については、平行で等しい長さの二本のき裂の干渉効果を考慮した式を用いたものであり、単一切欠き試験片の場合と同様にそれぞれには $\sqrt{2}$ 乗則に従っている。しかし、第三報で回転曲げ疲れの多連切欠き試験片について検討した場合のように一つの関係式で表わすことには少し無理があるように思われる。このことは、(2)式の補正係数 F_{III} は面外せん断を受ける平行で長さの等しい二本のき裂の進展という条件のもとで計算された値であるが、ねじり疲れの場合、実際には写真2, 3に見られるようにき裂の分岐、そして合体などが起こりその干渉効果が二本の等長き裂の場合より大きくなることによるもので、き裂の進展速度は小さくなり安全側にあることを示している。また、三連切欠き試験片の場合には、さらに長さの短い中央き裂の干渉が加わるので一層干渉効果も複雑となるので、その取扱いについては今後検討の余地があるものと思われる。

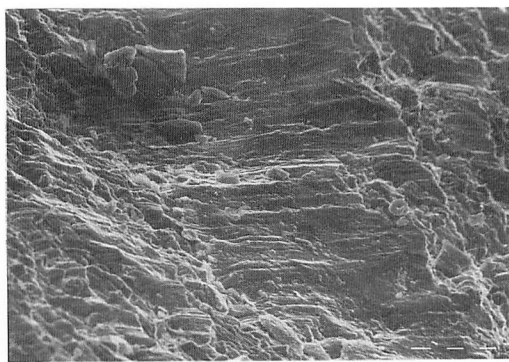
3-4 破面解析

写真5は、平滑試験片の繰返し応力166.8 MPaにおける破面の走査型電子顕微鏡による写真である。

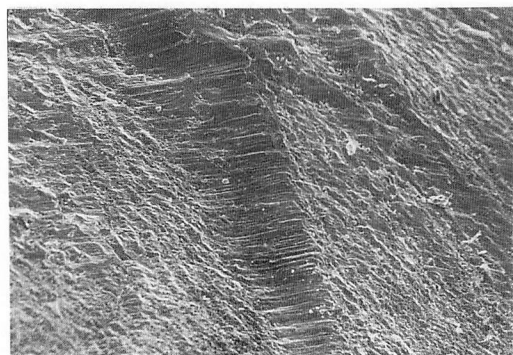
写真a)は、き裂発生点附近を示したもので表面より中心に向かってき裂進展方向に垂直な縞模様が見られるが破面は概して平坦である。写真b)はき裂発生点より進展方向に約1.0mm内部を示し、写真c)は、その中の縞模様を拡大したものである。この模様は、き裂先端周辺の繰返し塑性変形によって形成されたすべり線に沿ってき裂が進展したために形成されたストライ



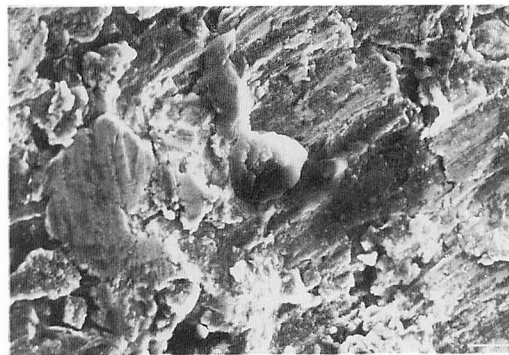
a) き裂発生点 100 μ



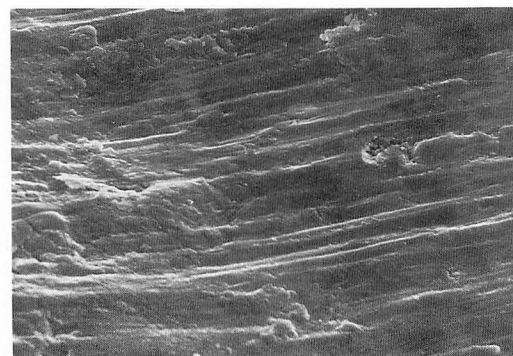
d) き裂の合体 10 μ



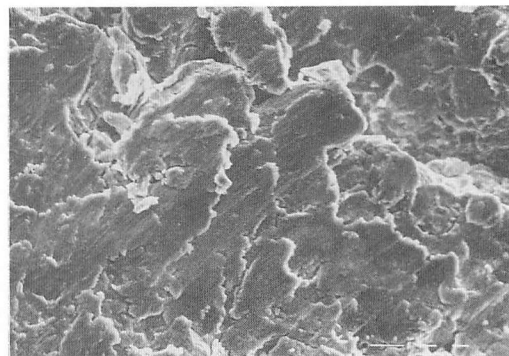
b) 100 μ



e) ラブ・マーク 10 μ



c) ストライエーション状模様 10 μ

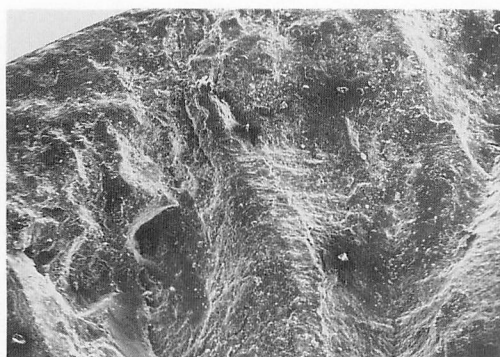


f) 最終破断域 10 μ

写真5 平滑試験片 ($\tau = 166.8 \text{ MPa}$)

エーション状模様 (Striation-like marking) であると思われる。ストライエーションのように応力サイクルの一サイクルごとに形成されたものでなく、不規則であることが写真 c) の縞模様の間隔が一樣でないことより判断できる。写真 d) は、ストライエーション状模様の最終地点である。写真 d) に示されるようにせ

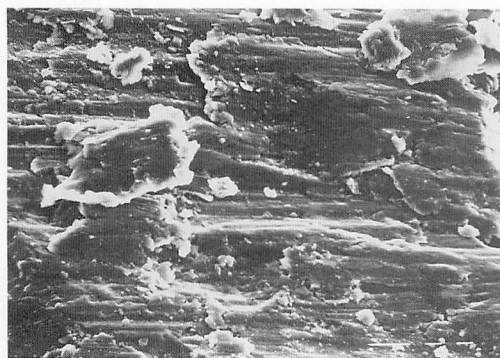
ん断形の破面ではき裂発生初期よりストライエーション状模様の左側と右側では面の傾きが異なる、すなわち進展方向がずれており、この最終地点で左側と右側の破面が合体している。写真 e) は、き裂発生地点附近のストライエーション状模様の左側破面を示したものでラブ・マーク (rub mark) が観察される。これは



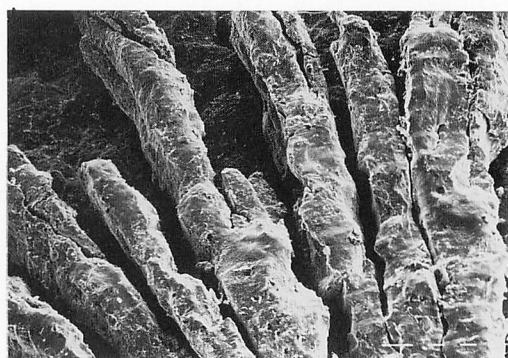
a) き裂発生点附近

100 μ 

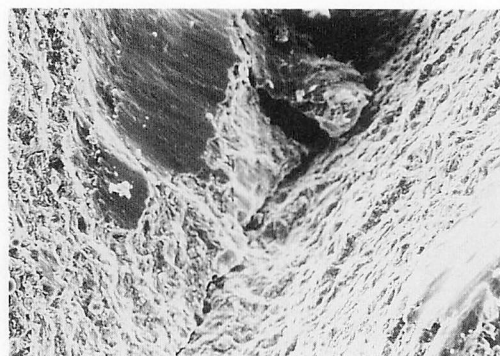
d) 最終破断域

100 μ 

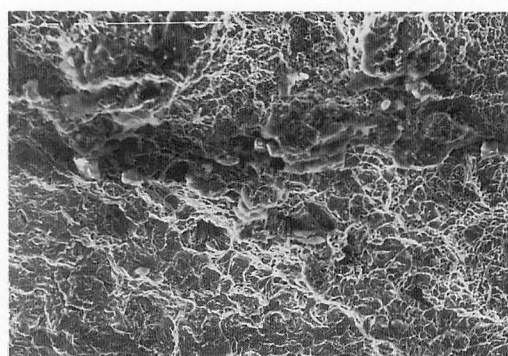
b) ラブ・マーク

10 μ 

e)

100 μ 

c)

100 μ 

f) 最終破断域

100 μ a) ~ d) $\tau = 157 \text{ MPa}$ e), f) $\tau = 215.8 \text{ MPa}$

写真6 単一切欠き試験片

き裂が形成されたのち相対する破面が繰返し応力によりこすり合わされた跡で、その方向よりせん断応力の方向（写真の左下より右上の方向）、き裂の進展方向が判断できる。写真 f) は最終破断域の拡大写真で、き裂進展に伴う断面積の減少によって高応力となっ

た高き裂伝ば速度域を示すもので引き伸ばされた様相が認められる。

写真 6 は、単一切欠き試験片の繰返し応力 157 MPa と 215.8 MPa における破面の電顕写真を示す。

写真 a) は、切欠き底より約 2.0mm までの範囲の破面

を示している。切欠き底直下約0.2mm程度の平坦な部分があり、そのあとが山脈状の凸凹面となっている。この山脈状模様は、き裂発生初期は二次元的に進展するが直ちに分岐して三次元的進展に移行することを示している。写真中央の山脈状部分にラブ・マークが見られ、この部分を拡大したものが写真 b) である。横方向の縞模様はせん断力の方を示し、こすり合わされたためにはがれた鉄の薄片が観察される。写真 a) の下方の谷部を拡大したものが写真 c) である。破面は左右約45°に傾斜しており、中央の細い溝はき裂が三次元的に進展していることを示している。また、左側上部にすべり面破壊したことを示すリップル (ripple) と呼ばれる波状模様が認められる。写真 d) は最終破断部を示す。部分的に縞模様が見られる比較的平坦な破面で、大きな塑性変形ののちすべり面で延性破壊したことを示している。比較のために、青熱脆性の影響によって時間強度が低応力の場合と異なった傾向を示す高応力 215.8 MPa における破面の全体的様相は、応力が大きくなるにつれて切欠き底直下の平坦な部分が広くなり、き裂進展速度が大きくなるほどき裂の分岐の始まる位置が表面より深くなることを示しているが、写真 e) はその破面中間部を示したものでき裂の進展方向（左上より右下方向）に多くの深い溝が走り、き裂進展における分岐・合体の様相がより複雑であることを示している。また、写真 f) は最終破断面を示すが、微小なくぼみの形より等軸デインブルであり、ねじり応力が加わっているにもかかわらず最終破断時には破面に垂直な引張り応力によって延性破壊したことを示している。

写真 7 は、単一切欠き試験片のき裂強さ $\tau_{w_2} = 143.1 \text{ MPa}$ における停留き裂破面写真を示す。試験片を液体窒素中につけて冷却し、残り断面をぜい性破壊させた破面である。写真 a) は全体写真で、上端の切欠き底附近のき裂が二次元的に進展した平坦部分、そしてき裂の分岐により三次元的に進展した山脈状部分と、その下方のぜい性破壊させた部分よりなっている。写真 b) は平坦部分を拡大したもので、き裂発生初期は二次元的に進展し、その部分が 10^7 cycle の応力繰返しによって相対する面とこすり合わされるため板状のはがれた薄片が観察される。写真 c) は、停留き裂先端部分と液体窒素によって低温として破壊させたぜい性破面より成り、停留き裂が三次元的に分岐して進展を停止していることが観察される。前項で述べたようにねじり疲れにおける停留き裂長さが回転曲げの場

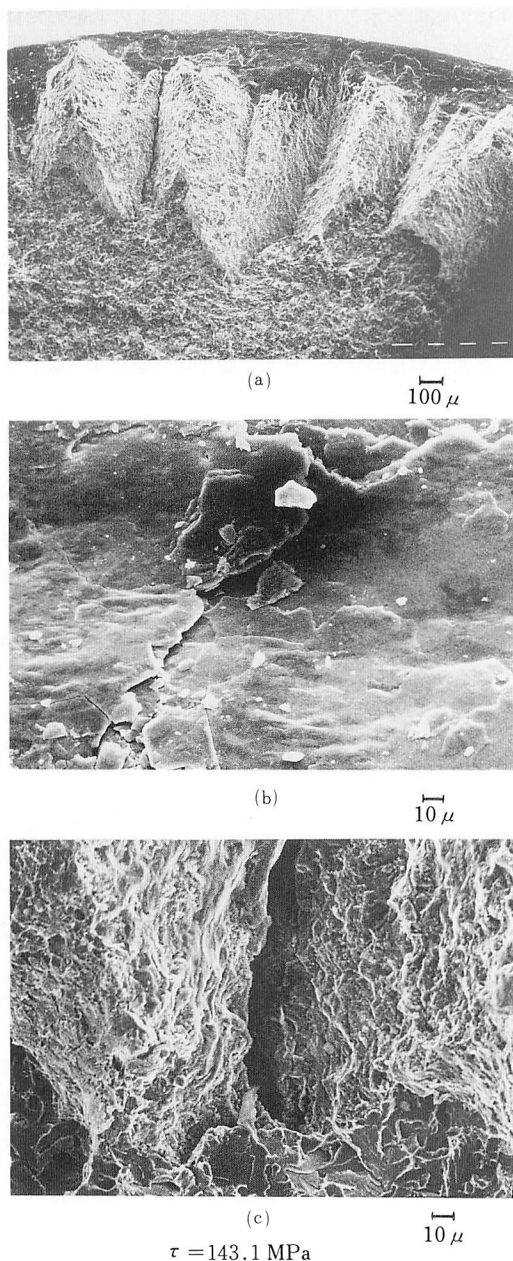


写真 7 単一切欠き試験片停留き裂

合と比較して非常に長くなることは、停留き裂の場合も分岐して三次元的に進展するため、その相互の干渉効果によって応力が減少するので最終破断面積が小さくなる、すなわち停留き裂長さが長くなるものと考えられる。

多連切欠き試験片の場合も単一切欠き試験片とほゞ

同様の傾向を示し、き裂強さ τ_{w_2} 直上の低応力ではき裂発生直後に分岐を示す写真 7 a) に示すような完全な山脈状模様が見られ、一方大きい応力ではき裂発生後の平坦部分が長くなり、その後の分岐、合体を示す山脈状模様が多少複雑な様相を呈した。

4. 結 論

以上、鋭い切欠きを持つ単一、二連、三連切欠き試験片についてねじり疲れ試験を行ない、き裂進展特性を調べ、切欠きの干渉を考慮した応力拡大係数によるき裂進展挙動の評価、そして電子顕微鏡による破面解析を行なった結果、次のような結論を得た。

- 1) 疲れ強さ τ_{w_1} は切欠き数の増加に伴って大きくなるが、き裂強さ τ_{w_2} は二連切欠きと三連切欠き試験片ではほぼ等しい。
- 2) 隣接する切欠きの干渉効果は二連切欠き試験片の方が三連切欠き試験片より大きく、従って時間強度も大きい。
- 3) き裂発生応力繰返し数は、単一切欠き、二連切欠き、三連切欠き試験片の順に大きくなる。
- 4) き裂進展速度曲線の変曲点におけるき裂長さは、き裂強さ τ_{w_2} における停留き裂長さより非常に小さい。
- 5) ねじり疲れの場合の τ_{w_2} における停留き裂長さは、曲げ疲れにおけるき裂強さ σ_{w_2} における停留き裂長さより非常に大きく、4)の結果も併せて疲れき裂の進展、停留の挙動がき裂の分岐によって支配されるためと思われる。
- 6) 疲れき裂が分岐を開始する位置は、応力が大きくなるほど内側に移る。
- 7) ねじり疲れにおける二連切欠きおよび三連切欠き試験片については、き裂の分岐・合体を堪案した応力拡大係数の導入が必要と思われる。

文 献

- 1) 真武ほか, 機論, 48-433, A (昭57), 1145.
- 2) 大路ほか, 機論, 52-477, A (昭61), 1300.
- 3) 永田ほか, 機論, 51-464, A (昭60), 1184.
- 4) 若原ほか, 鹿児島大学工学部研究報告, 30 (昭63), 197.
- 5) 若原ほか, 鹿児島大学工学部研究報告, 30 (昭63), 207.
- 6) 若原ほか, 鹿児島大学工学部研究報告, 30 (昭63), 215.
- 7) R. E. Peterson, Stress Concentration Design Factor, (1953), 55 John Wiley & Sone.
- 8) H. Neuber, Kerbspannungslehre, (1958), 148 Springer.
- 9) 西田, 応力集中, (昭48), 624 森北出版.
- 10) 例えば 大久保, 機誌, 62-488, (昭34), 1272.
西谷, 機論, 28-188, (昭37), 427.
- 11) 長谷川ほか, 機論, 49-433, A (昭58), 838.
- 12) 若原ほか, 機論, 41-352, (昭50), 3315.
- 13) 小林ほか, 機論, 37-288, (昭45), 1238.
- 14) H. Tada et al., The Stress Analysis of Crack Handbook, (1973), 27-3 Del Research Corporation.
- 15) E. Smith, Proc. Roy. Soc. London, 282, (1964), 422.
- 16) 石田, 機論, 45-392, (昭54), 306.
- 17) P. C. Paris et al., Trans. ASME, Ser. D, 85 (1963), 528.
- 18) 小林ほか, 材料, 18-190, (昭44), 627.