



Title	交差貫通穴材における疲労き裂伝ば挙動
Author(s)	真壁, 朝敏; 大場, 克巳; 兼城, 英夫; 糸数, 真哉
Citation	日本機械学会論文集. A編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, 58(553): 70-75
Issue Date	1992-09-25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/252">http://hdl.handle.net/20.500.12000/252</a>
Rights	Copyright (c) 1992 日本機械学会

## 交差貫通穴材における疲労き裂伝ば挙動\*

真壁朝敏\*<sup>1</sup>, 大場克巳\*<sup>2</sup>  
兼城英夫\*<sup>3</sup>, 糸数真哉\*<sup>3</sup>Fatigue Crack Propagation Behavior from a Internal Notch  
of Perpendicularly Intersecting Two HolesChobin MAKABE, Katsumi OHBA,  
Hideo KANESHIRO and Masaya ITOKAZU

Fatigue crack propagation behavior was observed by means of the beach mark method on the fracture surface. In the specimen with perpendicularly intersecting two holes, the fatigue crack was initiated at the internal corners of two holes and propagated from the internal section to the outside. In the first stage of crack propagation, the crack front formed a straight line and the cracked area in the form of a triangle was observed. This shape gradually changed with the crack propagation. In the final stage of crack propagation, a parabola-like crack front was observed. The crack propagation was examined with the change in the cracked area  $S$ . The crack propagation rate of the area,  $dS/dN$ , was found to be proportional to the area  $S$ , and the crack propagation law could be expressed as  $dS/dN = C\Delta\sigma^n S$  ( $\Delta\sigma$  is the cyclic stress range,  $n$  and  $C$  are constant).

**Key Words:** Fatigue, Crack Propagation, Holed Specimen, Beach Mark, Cracked Area

## 1. 緒 言

疲労き裂が部材表面から発生、伝ばする際は、表面観察を行うことによって、その挙動が追跡できる。しかしながら、部材の内部から伝ばするき裂に関しては実験中に直接的な観察をするのは困難であり、表面き裂に対して、内部き裂の伝ば挙動を検討した研究は少ない。本研究においては、試験片内部から疲労き裂が生ずる場合の一例として、交差した貫通穴を有する試験片の疲労き裂伝ば挙動を検討した。き裂面が空気に触れることなどから、本研究での実験は完全な内部き裂の進展について検討したことにはならないが、表面き裂とは拘束条件の異なる内部方向から伝ばするき裂の様相を検討することを目的とした。直接観察のできない試験片内部におけるき裂伝ばの評価に際しては、ビーチマーク法<sup>(1)</sup>がよく用いられており、破面情報に基づいた解析がなされている。ビーチマークはタイムマークとも呼ばれ、荷重や環境の急激な変化に伴い、疲労破面上に残されるき裂前縁の痕跡である。荷重の

設定が適切であれば、ビーチマークをつけるための荷重変動はき裂伝ば挙動に影響を及ぼさないとされるため、本研究においてもビーチマーク法によりき裂伝ば挙動を解析した。機械要素の破壊事故は疲労によるものが多く、疲労寿命を評価することは工学的にも社会的にも重要な問題となっている。そして疲労寿命の評価法としてき裂の発生、伝ば挙動に着目した多数の研究が報告されている。また、その中でも、低サイクル疲労や高サイクル疲労の有限寿命域では、微小き裂伝ばに着目した研究がなされている<sup>(1)-(10)</sup>。

本研究では、特殊な場合について取扱っているが、基礎実験的な観点から、内部方向から表面にき裂が伝ばする場合、通常の表面き裂と同様なき裂伝ば則の整理が可能かどうかを調べることを目的とした。そして、疲労き裂伝ば挙動と疲労寿命の関係についての検討を行った。また、破壊の機構に関し考察を行う目的で、単一の貫通穴の場合の破面観察も行い交差貫通穴の場合と比較検討した。

## 2. 使用材料および実験方法

素材はS45C丸棒材(直径25mm)である。その化学成分と機械的性質を表1および表2に示す。これを845°Cで1時間焼きなました後、図1に示す試験片を

\* 平成3年10月16日 第69期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年12月16日。

<sup>1</sup> 正員、琉球大学短期大学部(〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

<sup>2</sup> 准員、九州電力(株)(〒810 福岡市中央区渡辺通り2-1-82)。

<sup>3</sup> 正員、琉球大学工学部。

作製した。試験片には内部から表面への疲労き裂伝ば挙動を検討するため、試験片中央部分に交差貫通穴をドリル加工した。その穴部断面形状を図2(a)に示す。また交差貫通穴の場合のき裂進展と比較するため図2(b)のような単一の貫通穴を有する試験片の破面観察も行った。穴の直径は0.5mmである。また、試験片は穴加工後に600°Cで1時間真空焼きなまして実験に供した。

疲労試験は、島津サーボパルサ Lab5 を用い、引張圧縮両振りの荷重制御方式で行った。繰返し応力幅は、図2(a)の交差貫通穴材においては $\Delta\sigma=315\text{ MPa}\sim 420\text{ MPa}$ 間で、4種類とし図2(b)の貫通穴材では $\Delta\sigma=420\text{ MPa}$ で行った。内部から進展するき裂の形状はビーチマーク法によって調べた。ビーチマークを導入する際の応力は、き裂伝ばの際の応力の1/4の応力幅にし、また、前者と後者の繰返し最大応力は同一値にした。このような条件に設定すれば $\Delta\sigma$ が一定の

表1 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.45	0.25	0.79	0.01	0.01	0.09	0.03	0.18

(wt%)

表2 機械的性質

Lower yield point $\sigma_{s1}$ (MPa)	Ultimate tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	True fracture stress $\sigma_T$ (MPa)	Reduction of area $\psi$ (%)
355	601	994	47.4

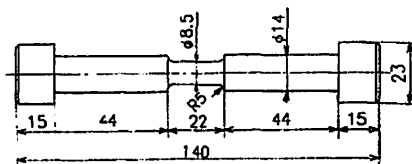
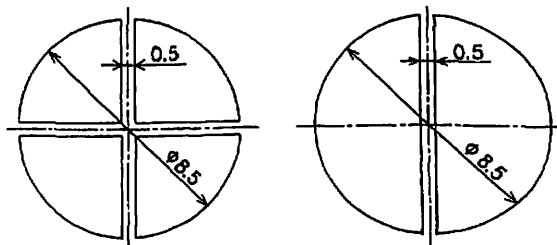


図1 試験片形状 (mm)



(a) 交差貫通穴の場合 (b) 貫通穴の場合

図2 穴部の断面形状 (mm)

もとのき裂伝ば速度にほとんど影響を及ぼすことなくビーチマークをつけることができる<sup>(2)</sup>。ビーチマークをつけるための繰返し数は、荷重レベルによって異なるが、 $10^4\sim 10^5$  回程度の範囲を選定した。本研究では破面の観察を通じてき裂伝ば挙動を調べたが、特に、き裂伝ば則とき裂面積との関係について検討した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 ビーチマークによるき裂伝ば挙動の観察

交差貫通穴材における最終破断面を図3に示す。本実験においては、疲労き裂は試験片内部から発生し、伝ばしていく。その伝ば過程は、破断面に残ったビーチマークから判断できる。き裂は試験片中央部分付近の穴の交差した角部から発生し、表面方向へ伝ばしていく。き裂伝ば初期では、き裂前縁は直線的であり、き裂面は三角形状である。しかし、その形状は、き裂伝ばとともに次第に変化していき、最終的にはき裂前縁が双曲線状になっている。き裂が試験片表面に達するのは、疲労寿命のかなり後半の部分であることが、破面からうかがえる。そして、き裂が比較的小さい間は、穴角部4箇所から発生したき裂がほぼ均等に伝ばしていることが図3よりわかる。そして、後に示すき裂伝ば曲線から判断すると比較的小さいき裂の伝ば過程が疲労寿命の大部分を占めている。き裂伝ば曲線とビーチマークの形態を対比すると比較的小さいき裂が伝ばする間はき裂面形状はほぼ三角形状であり、ほとんど相似な形でき裂が伝ばしている。

交差貫通穴の場合との比較のため単一の貫通穴の場合における破断面を図4に示す。図4(a)の場合のように試験片取付け時の曲げの影響がほとんどない場合にはき裂は穴底に沿って発生し、穴軸にほぼ平行なき裂面を形成しながら破断に至るまで伝ばしている。交差貫通穴と単一の貫通穴の場合の破断面を比較することによって、交差貫通穴材のき裂進展機構が推察される。交差貫通穴材では穴角部での強い応力集中によりき裂の発生が穴角部で生じ、き裂伝ば初期ではシェvron形切欠きの場合にみられるようなき裂進展が生じている。しかしながら、き裂の進展に伴い、拘束状態が変化し、き裂伝ばの後半では穴底に沿ってき裂が進展するようになる。そしてその伝ばの様相は試験片取付け時の多少の曲げの影響を受ける単一の貫通穴の場合の図4(b)の様相と類似している。その理由としては、応力こう配のため穴縁の一部分(交差貫通穴材では中心付近、単一の穴材では片側の穴角部付近)で優先的にき裂が進展するため、それがき裂伝ば過程後半のき裂伝ば形態に影響することが考えられる。

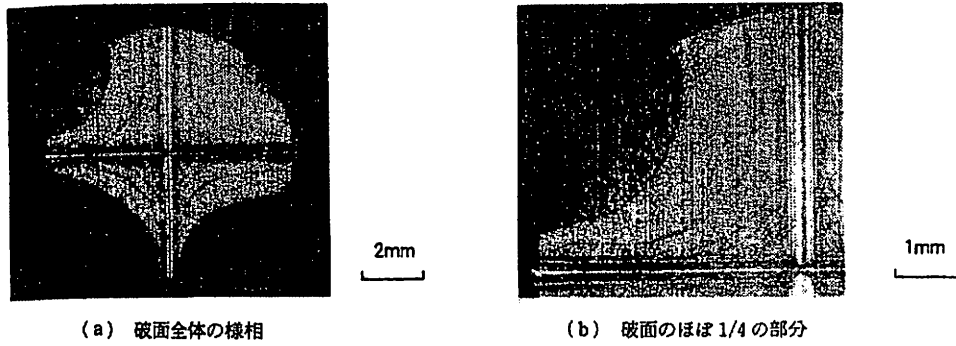


図3 交差貫通穴材の破断面とビーチマーク ( $\Delta\sigma=420$  MPa)

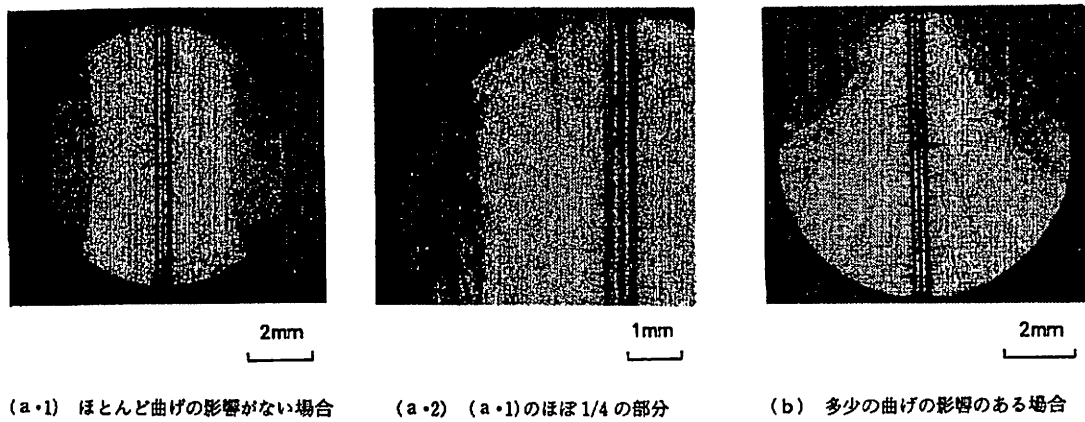


図4 単一貫通穴材の破断面のビーチマーク

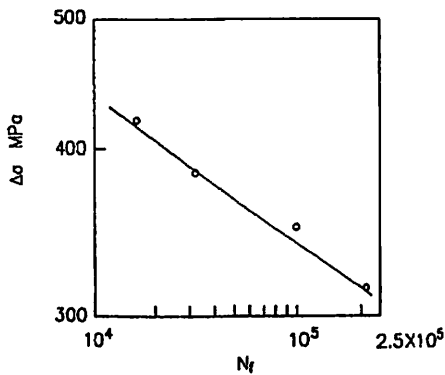


図5 応力幅  $\Delta\sigma$  と破断繰返し数  $N_f$  の関係

3.2 疲労寿命とき裂伝ば挙動について 交差貫通穴材の  $S-N$  曲線を図5に示す。これから繰返し応力幅  $\Delta\sigma$  と破断繰返し数  $N_f$  との関係は式(1)のようになることがわかる。

$$\Delta\sigma^{2.1} N_f = 1.04 \times 10^{28} \dots\dots\dots (1)$$

き裂が表面き裂の場合は、き裂寸法として直接測定し

た表面き裂長さを用いてき裂伝ば挙動を評価できるが、本実験のように試験片の内部からき裂が進展し、刻々とき裂形状が変化する場合は、き裂寸法の代表長さをどのように選ぶかは、き裂の形や、伝ば挙動によって異なってくるものと思われる。そこで本研究では簡便のため、き裂寸法を代表長さでなくき裂の面積で評価することを試みた。そしてき裂面積と、き裂伝ば則にどのような関係があるのかを検討した。

き裂伝ば則を整理するに当たっては、き裂面積  $S$  を式(2)のように試験片最小断面積  $S_0$  で無次元化したき裂面積比  $C$  を用いた。 $S$  は穴部の面積を含まない図3にみられる4箇所なき裂面積の総和である。

$$C = S/S_0 \dots\dots\dots (2)$$

破断面から得られたき裂面積によって整理したき裂伝ば曲線を図6, 7に示す。縦軸には、き裂面積比  $C$  (図6) または  $C$  の対数 (図7) を取り、横軸には破断繰返し数  $N_f$  で無次元化した相対繰返し数  $N/N_f$  を取っている。これらの図より  $N/N_f = 0.1$  ですでにき裂が発生しており、寿命のほとんどがき裂伝ば過程である

ことがわかる。また、特に図7からほぼき裂面積比の対数  $\ln C$  と相対繰返し数  $N/N_f$  の間にはほぼ比例関係があり次式が成り立つことがわかる。

$$dC/dN \propto C \quad \dots\dots\dots (3)$$

き裂面積比  $C$  と相対繰返し数  $N/N_f$  の関係は応力幅にほとんど依存せず最小二乗法によって整理すると式(4)で示される図中の実線のようになる。

$$\ln C = 5.87N/N_f - 7.21 \quad \dots\dots\dots (4)$$

小規模降伏状態においては応力拡大係数範囲  $\Delta K$  がき裂伝ば則を整理するための有効なパラメータとなる。しかし、小規模降伏状態を逸脱すると  $\Delta K$  が使えなくなる。本実験材料の降伏応力は 355 MPa であり、疲労試験を行った最低の繰返し応力幅  $\Delta\sigma$  は 315 MPa である。したがって、穴の交差部分での高い応力集中度を考慮すると、本研究においては、小規模降伏状態は満たされていない可能性がある。そして、このような場合、西谷ら<sup>(3)</sup> は表面き裂の場合において  $\sigma^n l$  ( $\sigma$ : 繰返し応力振幅,  $l$ : 表面き裂長さ,  $n$ : 材料定数) をパラメータとしたき裂伝ば則の整理を行っている。また村上ら<sup>(4)(5)</sup> による低サイクル疲労試験結果でも、 $\Delta\epsilon_p l$  ( $\Delta\epsilon_p$ : 塑性ひずみ幅,  $l$ : 表面き裂長さ,  $n$ :

材料定数) をパラメータとして、西谷らと類似な整理を行っている。そこで本研究では、図6, 7の結果を根拠として、これらの場合と似通った整理を行うことにした。図8はき裂伝ば速度に及ぼす応力幅の影響を検討するため、式(4)を考慮して  $(dC/dN)/C$  と繰返し応力幅  $\Delta\sigma$  の関係を調べたものである。 $(dC/dN)/C$  の実験値は各応力レベルにおいて  $C$  の値によらずほぼ一定となる。そして村上ら<sup>(4)</sup> の研究に基づくと  $(dC/dN)/C$  の値は式(4)を微分して得られる式(5)によって精度よく近似できる。

$$(dC/dN)/C = 5.87/N_f \quad \dots\dots\dots (5)$$

図8の横軸の  $\Delta\sigma$  は  $N_f$  に対応する応力幅から決まる。 $(dC/dN)/C$  は無次元化き裂伝ば速度と見なせるが、その値は、村上ら<sup>(4)</sup>, 桜井ら<sup>(6)</sup> の研究のき裂長さ  $l$  に対する  $(dl/dN)/l$  と同様に破断繰返し数  $N_f$  と密接に関係している。図8の直線の傾きが9.1であることからき裂伝ば速度に及ぼす応力幅とき裂面積比の影響は次式のように表せる。

$$dC/dN = 5.22 \times 10^{-28} \Delta\sigma^{9.1} C \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(6)のように、き裂伝ば則がき裂面積で整理できる背景としては、破断面に観察されるように、寿命の大部分で、き裂の形状がほぼ相似な三角形状に伝ばして

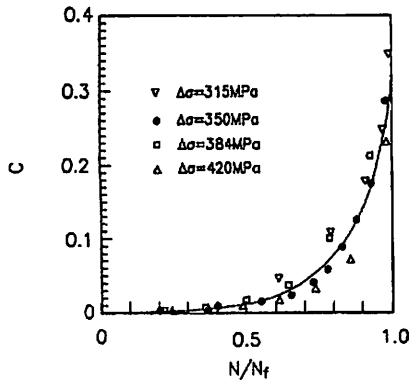


図6 き裂面積比  $C$  と相対繰返し数  $N/N_f$  の関係

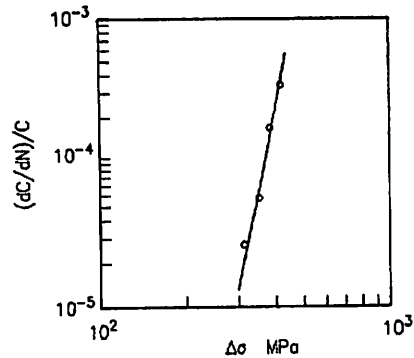


図8  $dC/dN/C$  と  $\Delta\sigma$  の関係

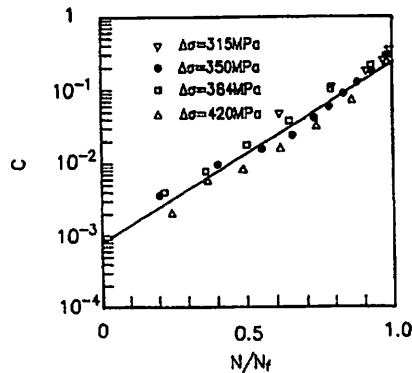


図7 き裂面積比  $C$  の対数と相対繰返し数  $N/N_f$  の関係

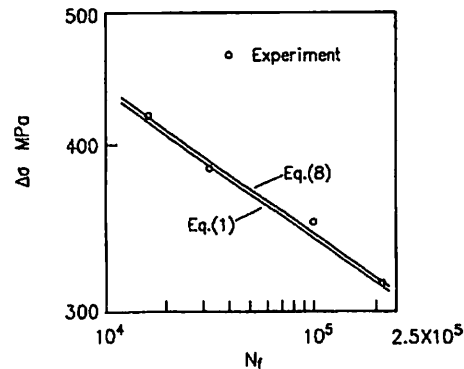


図9 実験とき裂伝ば則から導いた寿命則の関係

いることが考えられる。式(6)を積分すると

$$\ln C_f/C_0 = 5.22 \times 10^{-28} \Delta \sigma^{9.1} (N_f - N_0) \dots \dots \dots (7)$$

ここで  $C_0$  は  $N=N_0$  回 (き裂発生繰返し数) におけるき裂面積比,  $C_f$  は破断時のき裂面積比である。簡便的に, き裂発生繰返し数  $N_0=0$  とし,  $C_0$  および  $C_f$  の値は式(4)あるいは図7において  $N/N_f=0$  および  $N/N_f=1$  の時の  $C$  の値として求めた。それらの値,  $N_0=0$ ,  $C_0=0.00074$ ,  $C_f=0.26$  を式(7)に代入すると次式を得る。

$$\Delta \sigma^{9.1} N_f = 1.13 \times 10^{28} \dots \dots \dots (8)$$

図9に  $S-N$  曲線として, 実験結果とその実験式である式(1)およびき裂伝ば則から導いた式(8)の結果を示す。これから式(1)と式(8)はよく一致していることがわかる。

丸棒平滑試験片においては低サイクル疲労寿命法則である Coffin-Manson 則<sup>7)</sup> が実質的に微小き裂伝ば則と等価であることが村上ら<sup>4)(5)</sup> によって報告されている。また高サイクル疲労についても同様な整理がなされている<sup>6)</sup>。本実験においても, これらの場合とほぼ同様な結果が得られている。したがって, これまで表面き裂の場合で示されていたき裂伝ば曲線と疲労寿命の対応関係が本実験結果にも適用できることになる。さらに, このことを逆に言えば, 本実験のように, 内部からき裂進展が生ずる部材でも, あらかじめ疲労寿命曲線である  $S-N$  曲線とある数例の応力振幅についてのき裂伝ば曲線を求めておけば, 有限寿命域での任意の応力振幅下での疲労き裂状態が繰返し数によってある程度推定できる可能性がある。

実験データにはある程度のばらつきは当然含まれる。しかしながら, 相対繰返し数  $N/N_f$  で評価したき裂伝ば則にはばらつきが少なくなること<sup>9)</sup> や高応力下においては, 鋭い切欠きを有する部材ではき裂発生寿命が極めて短く, 平滑材に比べて, 結晶組織的因子に基づくき裂伝ば挙動のばらつきが少ないことなどから, 本実験のような切欠きから発生したき裂においては, 定性的なき裂伝ば挙動は図6, 7に示したようなデータ範囲である程度検討可能と思われる。小林<sup>10)</sup> が解説しているようにある狭い実験範囲においては, ある特定の見掛け上のき裂伝ば則が成り立つことがある。しかしながら, その法則の応用範囲が広く, 何らかの近似的評価を示しておれば, 工学的には簡便的手法として有用であると考えられる。本研究においても, 見掛け上の伝ば則が成り立っている可能性があるが, 今後さらに内部あるいは表面から発生, 伝ばするき裂の評価を統一的行う場合の目安になると考えている。

村上ら<sup>11)-13)</sup> は, 解析的に  $\sqrt{\text{area}}$  (area: 欠陥や微小き裂の投影面積) が欠陥から発生した微小き裂の応力拡大係数を評価するためのパラメータとなることを示し, 微小欠陥を有する部材や高硬さ材の疲労強度を合理的に評価している。また, 本実験の場合は, 解析的根拠はないが, き裂面積で交差貫通穴材のき裂伝ばが整理できる結果になっている。そして, 欠陥材の延性破壊における破断延性値の評価においても, 村上ら<sup>14)</sup> は欠陥投影面積率が体積率よりも合理的パラメータであることを提案している。このように, 欠陥やき裂の面積に基づく破壊挙動の評価が行われているが, このような整理方法が, 簡便手法として, どのように応用・拡張できるのかは興味深いことであると思われる。

#### 4. 結 言

交差貫通穴材を用いて, 試験片内部から疲労き裂が生ずる場合の疲労き裂伝ば挙動をピーチマーク法を用いて観察し, き裂面積によるき裂伝ば則評価の可能性について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 交差貫通穴材においては, き裂は試験片中央部付近の穴の交差した角部から発生し, 試験片表面に向かって伝ばする。また, き裂伝ば初期では, き裂前縁は直線状であり, き裂面は三角形状である。しかし, その形状は, き裂の伝ばとともに次第に変化していき, 最終的には, き裂前縁が双曲線状になる。

(2) 交差貫通穴材における破断までの寿命のほとんど100%がき裂の伝ば過程に費やされる。

(3) き裂の代表寸法としてき裂面積を採用し, き裂伝ば則を整理した。き裂面積比の対数  $\ln C$  と相対繰返し数  $N/N_f$  の間には比例関係が成り立つ。この結果から, き裂面積に比例してき裂が伝ばすることがわかった。また, き裂面積比  $C$  と相対繰返し数  $N/N_f$  の関係にはほとんど応力依存性がない。

(4) き裂面積比  $C$  で整理したき裂伝ば則から求めた疲労寿命は  $S-N$  曲線で示した実験値とほぼ一致する。したがって, 丸棒平滑材の場合と同様に,  $S-N$  曲線とき裂伝ば則の間には密接な係わり合いがあることがわかった。

最後に卒業研究として実験を手伝って頂いた山元裕樹君に感謝する。

#### 文 献

- (1) 小林(国尾・中沢・林・岡村共編), 破壊力学実験法, (1988), 134, 朝倉書店。
- (2) 北川・高橋, 機論, 45-399(1979), 1289。

- (3) 西谷・皮籠石, 機論, 49-440, A(1983), 431.  
 (4) 村上・真壁・西谷, 機論, 50-459, A(1984), 1828.  
 (5) Murakami, Y., Harada, S., Endo, T., Tani-ishi, H. and Fukushima, Y., *Eng. Fract. Mech.*, 18-5(1983), 909.  
 (6) 桜井・宇佐美・福田・富田, 材料, 35-396(1986), 1023.  
 (7) Coffin, L. F. Jr., *Trans. ASME.*, 76(1954), 931.  
 (8) 西谷・後藤, 機論, 51-462, A(1985), 332.  
 (9) 後藤・福島・西谷, 第3回機械・構造物の強度, 設計評価シンポジウム (日本材料学会), (1991), 124.  
 (10) 小林, 機械の研究, 20-4(1968), 603.  
 (11) Murakami, Y. and Nemat-nasser, S., *Eng. Fract. Mech.*, 17-3(1983), 193.  
 (12) 村上・遠藤, 材料, 35-395(1986), 911.  
 (13) 鳥山・村上・牧野, 材料, 40-458(1991), 1497.  
 (14) 村上・真壁・西谷, 機論, 51-427, A(1985), 2721.
-