

炭素鋼 S 45 C 焼なまし材のねじり腐食疲労過程\*  
(回転曲げ腐食疲労過程との比較)石原 外 美\*<sup>1</sup> 塩 沢 和 章\*<sup>1</sup>  
宮 尾 嘉 寿\*<sup>2</sup>, 井 上 正 人\*<sup>3</sup>Torsional Corrosion Fatigue Process of an Annealed Carbon Steel S 45 C  
(Comparison with Rotating Bending Corrosion Fatigue Process)

Sotomi ISHIHARA, Kazuaki SHIOZAWA, Kazuyuki MIYAO and Masato INOUE

The corrosion fatigue process under cyclic torsion was investigated in annealed carbon steel. The results obtained were as follows. (1) During the fatigue process in laboratory air and salt water at the high stress amplitude region, slip bands appeared on the smooth specimen surface and cracks initiated from some of these slip bands. These cracks propagated in the direction of the specimen axis at mode II and thereafter branched and propagated in the direction inclined 45° to the specimen axis at mode I. (2) During the corrosion fatigue process at the low stress amplitude region, cracks initiated at corrosion pits and directly propagated in the direction inclined 45° to the specimen axis at mode I. (3) In torsional fatigue tests, the decreasing rate of fatigue strength due to the corrosive environment was smaller than that of rotating bending tests. (4) Differences in the initiations and growth behavior of corrosion pits between the torsional corrosion fatigue test and the rotating bending corrosion fatigue tests were not observed.

**Key Words:** Corrosion Fatigue, Torsion, Corrosion Pits, Crack Propagation, Crack Initiation, Carbon Steel

## 1. 緒 言

平滑材の腐食疲労過程では疲労初期から微小表面き裂が発生, 進展し試験片の最終破壊をもたらす。これらの腐食疲労き裂の発生, 進展挙動は試験片の材質, 負荷様式などによって大きく異なることが予想される。

腐食環境下の微小き裂の発生・進展挙動に関するこれまでの多くの研究<sup>(1)(2)</sup>は, 曲げ疲労および引張り・圧縮疲労実験によりなされてきたが, ねじり腐食疲労過程を明らかにした研究例<sup>(3)</sup>は少ない。

そこで本研究では, 炭素鋼 S 45 C 平滑丸棒試験片を用い, ねじり腐食疲労過程の連続観察を行い, き裂発生, 進展挙動に及ぼす応力振幅ならびに腐食性環境の影響を明らかにした。ついで, 回転曲げ腐食疲労過程との差異について検討した。特にき裂発生・進展特性に及ぼす一軸と二軸の垂直応力の差異ならびにその場合の腐食性環境の影響について考察を加えた。さらに回転曲げ腐食疲労およびねじり腐食疲労における腐

食ピット発生, 成長挙動の差異に関しても実験的に調査した。

## 2. 試験片および実験方法

**2.1 試験片** 本実験に使用した試験片素材は機械構造用炭素鋼 S 45 C であり, 化学成分および熱処理後の機械的性質をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。納入材を 1173 K で 1 h の真空焼なましを行った後, 図 1 に示す試験片形状まで機械加工した。その後エメリー紙 (# 100~# 1500) で表面仕上げを行い, 923 K, 1 h の真空焼なましを行った。さらに試験片平行部を電解研磨により直径で 20~30 μm 除去し実験に供した。疲労過程の試験片表面の連続観察はレプリカ法により行った。疲労過程の主なき裂発生場所の発見を容易

表 1 化学成分(wt%)

C	Mn	Si	P
0.46	0.81	0.23	0.022

表 2 機械的性質

Yield Strength (MPa)	317
Tensile Strength (MPa)	624
Elongation (%)	48.7

\* 原稿受付 平成 3 年 5 月 16 日。

<sup>1</sup> 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。<sup>2</sup> 正員, 富山大学名誉教授。<sup>3</sup> 准員, 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町 1-1)。

にするために、連続観察用試験片には図1に示すような部分切欠きを付した。

**2・2 実験方法** ねじり疲労試験は、偏心機構を利用した自作のねじり疲労試験機を用いて行った。その応力繰返し速度は30 Hzである。疲労実験は、試験機の応力棒に貼り付けたストレインゲージの信号をオシロスコープによりモニターし、応力棒に加わるトルクの変動が±3%以内におさまるように、その都度ねじれ角の設定をやり直して定応力振幅実験になるようにして行った。一方、回転曲げ疲労試験は、容量98.1 N-mの小野式回転曲げ疲労試験機を用いて行った。その応力繰返し速度は60 Hzである。なお、繰返し速度30 Hzの実験も併せて行った。腐食液は、液温 $298 \pm 0.5$  K一定に保たれた水道水を溶媒とする3.0%食塩水である。合成樹脂製ポンプにより、6 Lの食塩水を試験部と腐食槽の間に循環させながら腐食疲労実験を行った。なお、食塩水は一日ごとに新しい液と交換している。

試験片表面のき裂の測定は、任意の繰返し数ごとに採取したレプリカを光学顕微鏡( $\times 200$ )を用いて観察することにより行った。

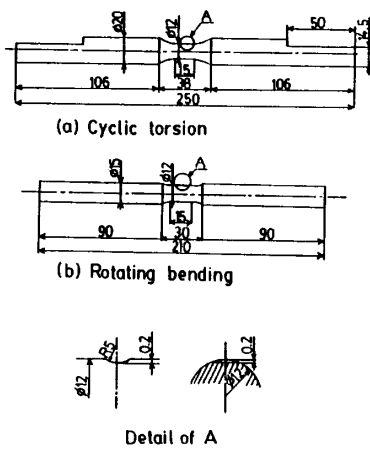


図1 試験片形状および寸法

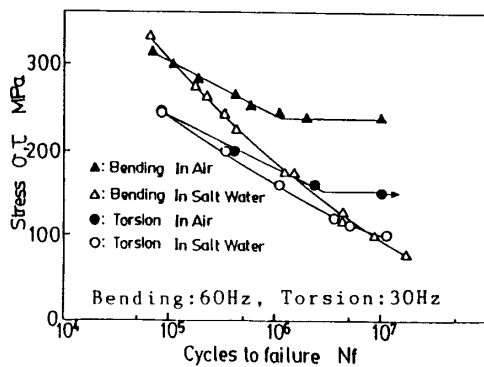


図2 S-N線図

### 3. ねじり疲労強度ならびにねじり疲労過程

**3・1 S-N線図** 図2にねじり疲労下の大気中と塩水中におけるS-N線図を示す。図中には回転曲げ疲労実験におけるS-N線図<sup>(4)</sup>も併せて示してある。図よりわかるように、両試験とも大気中では疲労限度が存在し、ねじりでは $\tau_{wo} \approx 155$  MPa、回転曲げでは $\sigma_{wo} \approx 240$  MPaの値をとる。一方、食塩水中ではねじり、曲げ両疲労試験とも10<sup>7</sup>回付近でも曲線は下降の一途をたどり疲労限度は存在しない。また、 $N_f = 10^7$ 近傍の腐食疲労強度には、ねじり疲労と曲げ疲労の差異が現れないことがわかる。

#### 3・2 ねじり疲労過程の連続観察

**3・2・1 大気中疲労** 図3は大気中疲労の応力振幅 $\tau = 245$  MPaにおける試験片表面の連続観察結果を示したものである。

図よりわかるように、応力繰返しによってすべり帯が現れ、繰返し数の増加に伴い徐々に被害の程度を増し、き裂へと変化する。その後、これらのき裂はモードII形のき裂として試験片軸方向に進展し、き裂長さが約2.2 mm以上で、き裂は分岐しその後試験片軸に対して約45°の方向にモードI形で進展し、破壊に至る。

**3・2・2 腐食疲労** 応力振幅 $\tau = 245$  MPa, 200 MPa, 112 MPaの3種類の応力振幅のもとでねじり

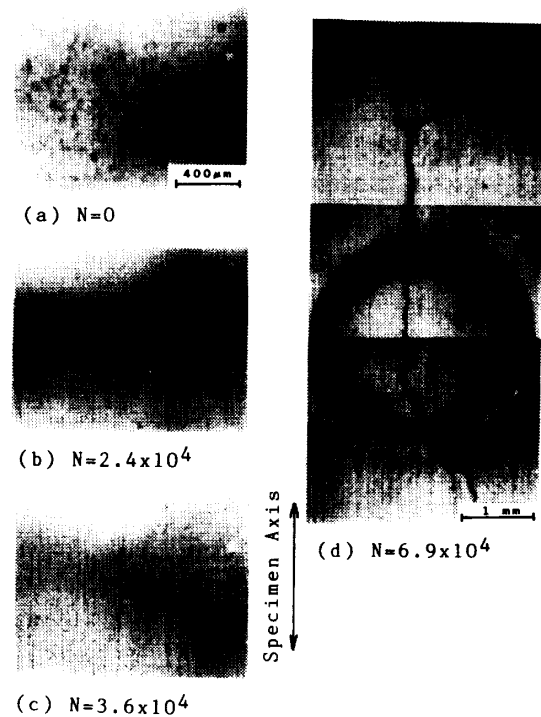


図3 大気中疲労過程の連続観察( $\tau = 245$  MPa)

腐食疲労過程の連続観察を行った。図は省くが  $\tau=245$  MPa および 200 MPa の高応力では、まず試験片表面に多数のすべり線が現れ、そのすべり線から試験片軸方向にせん断形き裂が発生する。このき裂はモード II 形である程度伝ばした後、軸と  $45^\circ$  をなす方向へ分岐し、モード II 形からモード I 形へとき裂進展様式は変化する。このような特性は図 3 の大気中疲労の場合と同様であった。

一方、図 4 の  $\tau=112$  MPa の低応力では、大気中の疲労限度 155 MPa 以下の応力振幅であることもあって、明りょうなすべり線の発生は認められず、腐食疲労き裂の発生箇所は腐食ピットからである。また、高応力域とは異なり、腐食ピットから発生したき裂はモード II のせん断形き裂進展を示さず、発生直後から垂直応力にほぼ垂直にモード I のき裂進展形態を示す。また巨視的には図 4(f) のようなクロスマーク状のき裂形態を示している。

図 5 は、き裂発生からき裂の分岐の生じるまでの期間 ( $N_b - N_i$ ) とき裂進展期間  $N_p$  の比  $(N_b - N_i)/N_p$  を応力振幅  $\tau$  について整理したものである。ここに、 $N_i$  は 100  $\mu\text{m}$  のき裂が発生するまでの繰返し数であり、 $N_b$  はき裂の分岐の生じるまでの繰返し数を示している。図中には大気中疲労と腐食疲労の実験データの両者を併せてプロットしている。図よりわかるように、 $\tau=245$  MPa 前後の高応力域では、き裂進展寿命の約半分がモード II のせん断形き裂進展期間で占められ

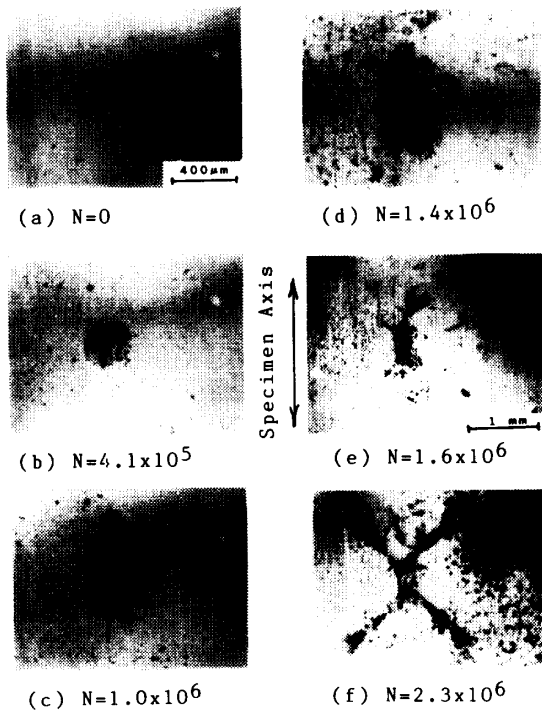


図 4 腐食疲労過程の試験片表面の連続観察 ( $\tau=112$  MPa)

る。応力振幅の低下に伴いモード II 形のき裂進展期間は減少し、 $\tau=100$  MPa 前後ではき裂進展寿命の大半が引張り、圧縮二軸応力下のモード I 形進展過程で占められることがわかる。

図 6 はき裂の分岐の生じるき裂長さ ( $2a_b$ ) と応力振幅  $\tau$  の関係を示したものである。図より、分岐するまでのき裂長さ ( $2a_b$ ) は応力振幅の低下に伴い減少することがわかる。

#### 4. ねじり疲労における初期き裂進展方向およびき裂分岐に関する考察

前章で述べたように、ねじり疲労過程の高応力域では、き裂は進展初期にモード II 形で進展し、その後分岐しモード I 形で進展し破壊に至ることがわかった。また、低応力振幅域では、モード II 形の進展期間は表れにくく、最初からモード I 形で進展し破壊に至ることがわかった。このような実験傾向は、箕島らの高強度 SCM 435 低合金鋼のねじり疲労実験<sup>(3)</sup> および阿部、村上の微小穴を有するマルエージング鋼のねじり低サイクル疲労実験<sup>(5)</sup> においても観察されている。

まず、高応力域のき裂の挙動について考察する。本実験の大気中疲労および腐食疲労高応力域でのき裂発生は図 3 に示すようにすべり帯からである。これらのすべり帯から最大せん断応力の作用方向である試験片

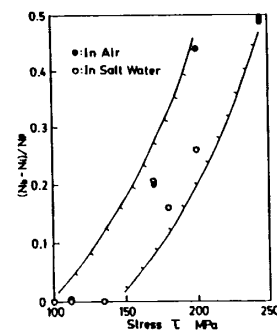


図 5 き裂の分岐期間と応力振幅  $\tau$  の関係

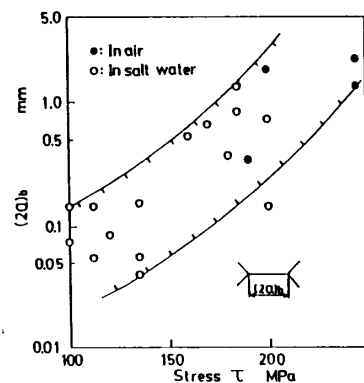


図 6 き裂の分岐長さ ( $2a_b$ ) と  $\tau$  の関係

軸方向と軸に直角方向にき裂が進展するものと予想されるが、本実験において、試験片軸方向に優先的にモードII形き裂が発生、進展しているのは試験片組織の異方性に基づくものと考えられる<sup>(15)</sup>。

次にき裂の分岐に関して検討する。大塚らは、低炭素鋼を用いてせん断形き裂進展から引張形進展への遷移条件を調査し、遷移条件はき裂の応力拡大係数のモードIの成分 $K_I$ が $K_I=5.9\sim 6.2\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で生じることを報告している<sup>(13)</sup>。そこで本実験の $\tau=245\text{ MPa}$ の分岐点におけるモードIの成分 $K_I$ を、き裂長さを試験片軸に $45^\circ$ なす方向に投影し、曲げを受ける丸棒中の表面き裂に対する応力拡大係数の計算結果<sup>(16)</sup>を用いて評価すると、 $6.1\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と得られた。これは、上述の大塚らの遷移条件とほぼ一致する。しかし、高応力域から低応力域までの全応力域においてき裂の分岐が生じ、分岐条件が上述のモードIに対する限界値で生じるものと仮定すると、低応力域程き裂が分岐するまでのき裂長さは長くなり、図6の本実験傾向と逆の結果を生むことになる。

そこで、次に腐食疲労低応力域におけるき裂の挙動に関して検討する。図4に示すように、腐食疲労低応力域では腐食ピットからき裂が発生している。

阿部、村上<sup>(5)</sup>は一樣なせん断応力を受ける微小穴を有する無限板の降状域の解析を行っているが、これによれば低応力域では、試験片軸に対して $\pm 45^\circ$ 方向の微小穴縁に最初の降状域が発生し、応力の増加に伴い試験片軸方向へと降状域の成長することが示されている。また、腐食疲労では応力繰返しに伴い発生するすべり帯に腐食反応が優先的に生じることが明らかにされている<sup>(14)</sup>。

腐食ピットを微小穴と等価とみなし、上述のこれまでの研究結果を考慮すると、以下の推論が可能である。

腐食疲労低応力では、応力繰返しに伴い寿命の初期に腐食ピットが発生、成長する。腐食ピットは応力集中源として作用し、試験片軸に対して $\pm 45^\circ$ 方向の腐食ピット縁に生じた降状域が選択的に腐食溶解される。このような腐食溶解により腐食ピット縁から試験片軸に対して $\pm 45^\circ$ 方向にモードI形の腐食疲労き裂の進展が促進されるものと考えられる。また、中間の応力域では、上記 $45^\circ$ 方向に加えて、試験片の軸方向への降状域の発生が期待されるので、ピットは試験片軸方向に細長く成長し、その後腐食ピット縁から試験片軸方向に $\pm 45^\circ$ 方向にモードI形の腐食疲労き裂が進展するものと考えられる。

図7は応力振幅 $\tau=100\text{ MPa}$ のねじり腐食疲労過

程において発生、成長する腐食ピットの一例を示したものである。図より、応力繰返しに伴い腐食ピットが発生し、ピットは軸方向に成長後、先端から試験片軸に対して $45^\circ$ の方向へモードI形のき裂が進展しており、上述の推論を裏付けている。

なお、図5および図6において、大気中疲労の実験結果も腐食疲労の実験結果と同様の傾向を示している。これは大気中疲労の低応力域では、き裂発生の際に介在物等の欠陥に対する感受性が高くなり、このような欠陥は、腐食疲労下の腐食ピットと類似の効果をもつためと考えられる。

したがって、図5および図6の実験結果は、高応力域の力学的要因に基づくモードIIからモードIへの遷移現象と、中間応力域ならびに低応力域での腐食ピット等の微小欠陥に基づくき裂発生という、異なる機構の複合した結果として考えることができる。

## 5. ねじり腐食疲労と 回転曲げ腐食疲労との比較

**5.1 腐食効果** ある指定破壊繰返し数 $N_f$ における腐食作用による疲労強度の低下率を腐食効果 $K$ と定義し、図2のS-N線図より求めた $K$ と $N_f$ の関係を図8に示す。図中には回転曲げ疲労試験の結果も併せて示している。図よりわかるように、回転曲げお

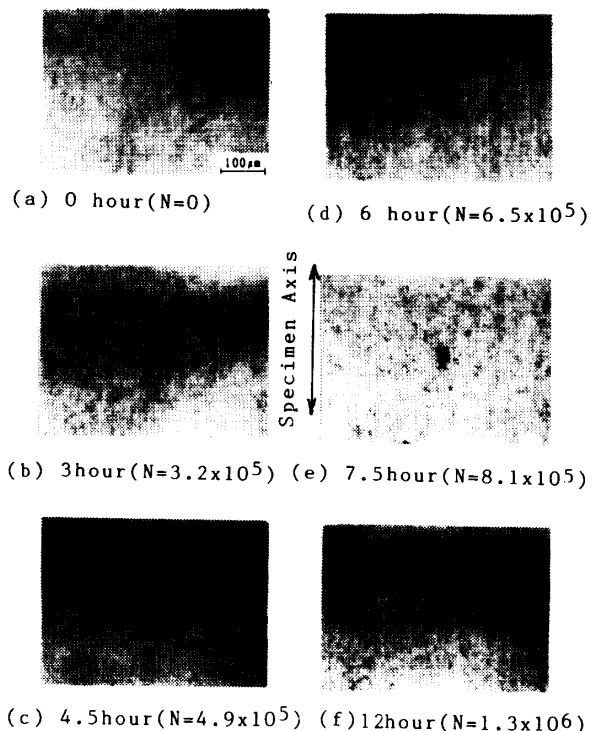


図7 ねじり腐食疲労下の腐食ピットの発生状況  
( $\tau=100\text{ MPa}$ )

よびねじり疲労の両者とも応力が高く、短時間で破断する場合(曲げ  $N=1.0 \times 10^5$ , ねじり  $N=3.6 \times 10^5$  以下), 腐食の影響はほとんど現れないが, 破断までの時間が長びくにつれ腐食の影響が次第に大きくなっていくことがわかる。この傾向は負荷様式の影響を受けない。また, ねじり疲労と曲げ疲労を比較した場合, 前者に比較して後者のほうが  $K$  の低下率が大きい。したがってねじり腐食疲労では, 回転曲げ腐食疲労に比較して腐食環境による強度低下が少ないことがわかる。このような傾向は, 西原, 遠藤<sup>(6)</sup>らの炭素鋼焼なまし材に対する実験結果においても報告されている。次節では, この原因について検討する。

**5.2 回転曲げおよびねじり疲労下のき裂発生, 進展挙動の比較** 腐食疲労過程の連続観察によれば, 全寿命の70~90%程度はき裂進展過程であり, しかも, ねじり腐食疲労の高応力域を除いて, 曲げおよびねじり腐食疲労過程の大半は, モードIの進展過程で占められていた。このような寿命の大半がモードIのき裂進展過程で占められる曲げとねじりの腐食疲労過程を比較するには,  $\tau_{max}$  を揃えた実験よりは  $\sigma_{max}$  を一定とする実験( $\sigma = \tau$ )を行うほうが好都合と考えた。そこで, 本節では, 応力振幅  $\sigma$  と  $\tau$  が等しい条件で回転曲げとねじり疲労下のき裂発生, 進展挙動を調査した。

### 5.2.1 大気中疲労および腐食疲労高応力域の場合

図9は, 大気中疲労過程の応力振幅245MPaにおけるき裂発生, 進展挙動を, 回転曲げ疲労とねじり疲労に対して調査した結果を示したものである。ここで, き裂長さは, 曲げの場合は試験片軸方向に対して直角方向に, ねじり場合は, 寿命初期のモードIIのき裂進展を便宜的にモードIのき裂進展に置き換えるために, き裂長さを試験片軸に45°なす方向に投影した長さをとっている。

図より, ねじり負荷のほうが回転曲げ負荷に比較してき裂発生およびその後の進展速度が速いことがわか

る。疲労き裂発生は, 最大せん断応力  $\tau_{max}$  と応力こう配により規定されることが明らかにされている<sup>(7)</sup>。本実験では, 曲げとねじりの試験で用いた試験片直径が互いに等しいため, 応力こう配の影響は考えなくともよい。最大せん断応力に関しては, 曲げ  $\sigma$  とねじり  $\tau$  の応力振幅が等しい場合, ねじり疲労の最大せん断応力は回転曲げ疲労のその2倍になる。したがって, 一定の応力振幅のもとでねじり疲労下のき裂発生が曲げ疲労に比較して早くなるのは, ねじり疲労の最大せん断応力が回転曲げ疲労のそれよりも2倍大きくなるためと考えられる。

次に, き裂進展速度における曲げ疲労とねじり疲労の差異を考える。曲げ疲労では試験片軸方向に一軸の垂直応力が作用し, き裂はこれにほぼ垂直方向にモードIの様式で進展する。一方, ねじり疲労では試験片軸方向に対して45°および135°方向にそれぞれ引張りと圧縮の二軸の垂直応力が作用している。き裂は初期には試験片軸方向にモードIIの様式で進展し, その後分岐しほぼ垂直方向にモードIの様式で進展する。したがってねじりと曲げのき裂進展速度を比較するには, 二つの領域に分割して比較する必要がある。すなわち, 寿命初期の(イ)ねじりのモードII形進展領域と曲げのモードI形進展領域の比較, 寿命後半の(ロ)ねじり疲労の二軸直応力作用下のモードI形進展領域と曲げ疲労の一垂直応力作用下のモードI形進展領域の比較である。

図9の中のねじりのき裂進展曲線にモードIIからモードIへの遷移点を矢印で示す。図中の遷移点と図5より, ねじり疲労過程におけるき裂進展期間の約半分はモードIIき裂で占められる。したがってねじり疲労と曲げ疲労にき裂進展期間の差異の一部は, 領域(イ)においてねじりにおけるき裂進展速度が曲げよりも速くなる<sup>(8)</sup>ことに起因していると考えられる。また, 領域(ロ)の垂直応力作用下でのモードI形進展領域では, ねじり疲労では二軸応力間の相互作用によりき裂

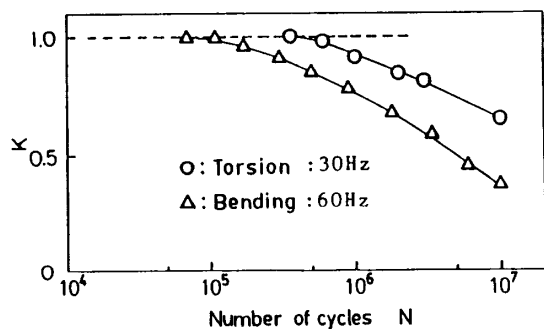


図8 腐食効果

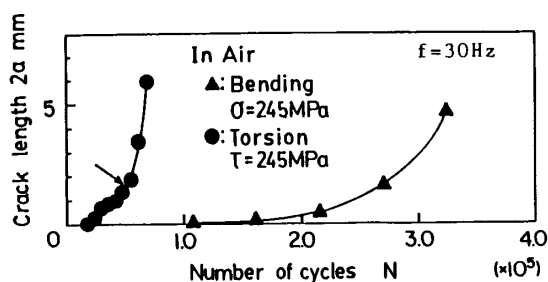


図9 回転曲げおよびねじり疲労下のき裂発生・進展挙動(大気中, 応力振幅245MPa)

先端の力学的厳しさが曲げ疲労のそれよりも増し、き裂進展速度が増すことが報告されているが<sup>(9)</sup>、本実験でもその効果が認められる。図は割愛するが、腐食疲労の高応力域のき裂発生・進展挙動も基本的に大気中疲労の場合と同様であった。

**5・2・2 腐食疲労低応力域の場合** 図10は腐食疲労下の応力振幅112 MPaにおけるき裂発生、進展挙動を回転曲げとねじり疲労に対して示したものである。き裂長さの測定法は大気中疲労と同様である。図より腐食疲労の低応力域では、き裂発生、進展挙動には曲げ疲労とねじり疲労の差異が認められず、大気中疲労ならびに腐食疲労高応力域の傾向とは異なることがわかる。

図4に示すようにねじり腐食疲労低応力域におけるき裂発生は、力学的因子に規定されたすべり帯からのき裂発生ではなく、主としてメカノケミカルな因子に支配された腐食ピットから生じている。図11は回転曲げ腐食疲労の低応力域 $\sigma=112$  MPaにおけるき裂発生状況を示したものである。き裂発生が腐食ピットから生じる現象はねじり腐食疲労と同様であることがわかる。したがって、腐食疲労低応力域では、応力負荷様式によらずき裂発生は腐食ピットからであり、腐食ピットの発生、成長挙動には次節で述べるように力学的き裂発生因子である最大せん断応力の影響が入り難い。

また、き裂進展速度に関していえば、低応力域では、図5, 6からもわかるように、モードII形の進展領域がほとんど現れず、モードI形進展領域が大半であった。曲げ疲労とねじり疲労とで一軸と二軸の応力多軸性の差異があるけれども、腐食疲労低応力域では、応力振幅が低く腐食性環境に律速されたき裂進展挙動へ変化すること、さらには長いき裂の発生による局部的応力緩和<sup>(10)</sup>の影響が支配的になることなどの理由により、応力の多軸性の影響が顕著に現れなかったもの

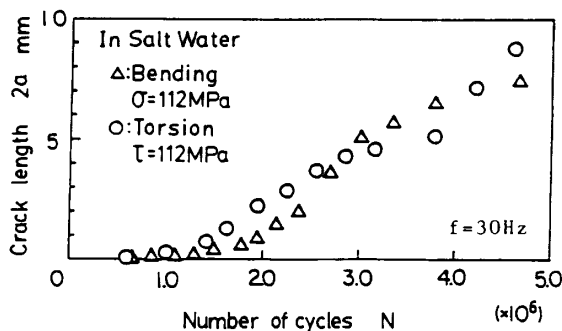


図10 回転曲げおよびねじり疲労下のき裂発生・進展挙動(腐食疲労, 応力振幅 112 MPa)

と考えられる。

以上の実験と考察より、ねじり腐食疲労の腐食効果が回転曲げ腐食疲労のそれに比較して小さい理由は、大気中疲労においては、応力振幅一定条件のもとで、力学的負荷様式の差異によりねじり疲労寿命が回転曲げ疲労寿命よりも減少するのに対し、腐食疲労低応力域においては、腐食性環境の影響により曲げとねじりの負荷様式の差異が現れにくいためであるということが出来る。すなわち、大気中疲労過程では、最大せん断応力の差異によってき裂発生過程における曲げ疲労とねじり疲労の差異を生じる。またき裂進展過程では、進展期前半の曲げ疲労のモードI形に対するねじり疲労のモードII形の進展様式の差異、ならびに進展期後半の、曲げ疲労の一軸の垂直応力作用下とねじり疲労の引張り、圧縮二軸垂直応力の作用下という進展様式の差異によって、両者の進展寿命の大小をもたらす。一方、腐食疲労低応力域においては、曲げ疲労、ねじり疲労ともき裂発生様式が腐食ピット経路に基づくき裂発生へと変化するため、き裂発生過程に両負荷様式の差異が現れにくくなる。またき裂進展過程については、曲げ疲労、ねじり疲労ともモードI形のき裂進展様式が支配的になるが、腐食性環境の影響により、両負荷様式における応力の多軸性の差異が現れにくくなる。

**5・3 曲げおよびねじり腐食疲労下の腐食ピットの発生、成長挙動** 腐食疲労低応力域では、き裂発生挙動に及ぼす応力負荷様式の影響が消失することを述べた。この原因として腐食ピットの関与を推測した。

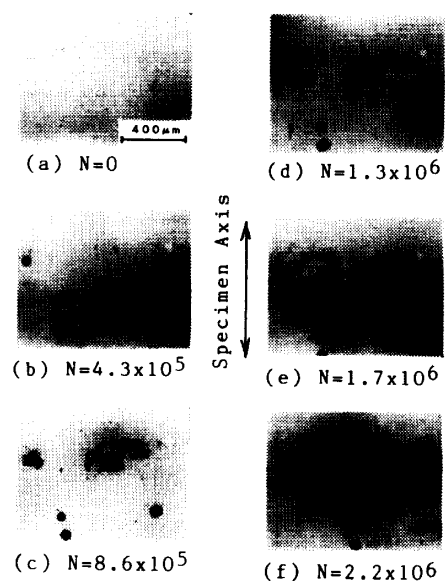


図11 回転曲げ腐食疲労下の試験片表面連続観察 ( $\sigma=112$  MPa)

そこで、き裂発生源となる腐食ピットの発生、成長挙動を曲げとねじりの腐食疲労下で調査し、両者の差異について検討した。

図 12 は応力振幅 = 100 MPa の腐食疲労低応力域での腐食ピットの発生、成長挙動を調査した結果を、縦軸にピット直径  $2c$ 、横軸に時間  $t$  をとり整理したものである。なお、応力繰返し速度は両疲労とも 30 Hz 一定である。

図より、腐食ピット発生、成長挙動には、回転曲げとねじりの負荷様式による差異が明確に現れていないことがわかる。また、腐食ピット直径  $2c$  と時間  $t$  の間には両対数グラフ上でほぼ直線関係が存在し、次式が成立する<sup>(11)</sup>。ここに、 $k$ 、 $m$  は定数である。

$$2c = kt^m \dots\dots\dots (1)$$

回転曲げにおいては最大垂直応力  $\sigma_{\max}$  と最大せん断応力  $\tau_{\max}$  の比が 2、ねじり疲労においては 1 になることを考慮すると、応力振幅一定の図 12 の実験は、結局  $\sigma_{\max} = \text{一定}$  で、 $\tau_{\max}$  が異なる条件で実験を行ったことになる。以上の負荷応力に対する考察と、上述の実験結果より次の予想が導かれる。すなわち、腐食ピットの発生、成長挙動は  $\sigma_{\max}$  の影響を受ける<sup>(12)</sup> が、せん断応力の存在には明確な影響を受けないことが予想される。

箕島<sup>(3)</sup> は高強度材料を用いて、曲げ疲労とねじり疲労における腐食ピットの発生・成長挙動を調査している。その結果によれば、幾分曲げ腐食疲労のピット成長速度はねじり腐食疲労のそれよりも速くなるけれども両腐食疲労過程のピット発生・成長挙動の差異はそれほど大きくなく、本実験傾向と矛盾しない。

回転曲げ腐食疲労過程では、試験片表面に一方方向の腐食液の流れがあるのに対し、ねじり腐食疲労過程では、一方方向の腐食液の流れは存在しない。両腐食疲労過程の腐食ピットの発生・成長挙動を比較する場合、

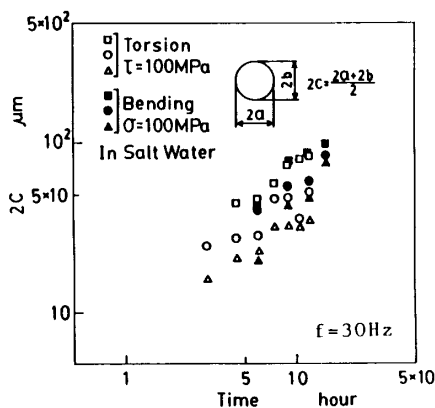


図 12 腐食ピットの発生・成長挙動

腐食液の流速の影響<sup>(12)</sup>を考慮する必要がある。

しかしながら、ねじり腐食疲労においては、一定の方向へ流れる腐食液の流れがなくとも、試験片の微細振動による腐食液の流れが存在すると考えられるので、曲げ腐食疲労とねじり腐食疲労の腐食ピットの発生・成長挙動における、一方方向の腐食液の流れの有無の影響は大きくないものと考えられる。事実、曲げ(平面曲げ)、ねじりともに一方方向の腐食液の流れがない状態で得られた箕島<sup>(3)</sup>の実験結果と曲げ腐食疲労(回転曲げ腐食疲労)のみ、一方方向への腐食液の流れのある状態で得られた本実験結果が、定性的に合致することを考慮すれば以上の推論は肯定できる。

## 6. 緒 言

炭素鋼 S 45 C 平滑丸棒試験片を用い、ねじり疲労過程を調査し以下の結果を得た。

(1) 大気中疲労過程では、応力繰返しによってすべり帯が現れ、徐々に被害の程度を増しながらき裂へと変化する。これらのき裂はモード II 形のき裂として試験片軸方向に進展し、その後、き裂は分岐しモード I 形で進展して破壊に至る。

(2) 腐食疲労高応力振幅域でのき裂発生、進展特性は大気中疲労におけるそれとほぼ類似している。一方、腐食疲労低応力域では、き裂発生箇所は腐食ピットからであり、き裂発生直後から垂直応力にはほぼ垂直にモード I 形のき裂進展形態を示す。また、き裂の分岐の生じるき裂長さは応力振幅の低下に伴い減少する。

(3) 回転曲げ疲労とねじり疲労の腐食効果を比較したところ、後者では、前者に比較して腐食効果が小さく腐食環境による強度低下が少ない。これは、大気中疲労においては、疲労寿命に対して曲げとねじりの負荷様式の差異が現れるのに対し、腐食疲労低応力域においては両負荷様式の差異が現れにくいためである。

(4) (3)の理由は、大気中疲労過程では、応力振幅一定条件で曲げとねじりの両疲労の最大せん断応力が異なるため、き裂発生過程に両者の差異を生じる。き裂進展過程では、進展期前半の曲げ疲労のモード I 形に対するねじり疲労のモード II 形の進展様式の差異ならびに進展期後半の応力の多軸性の影響によって、両疲労過程の進展寿命の大小をもたらす。一方、腐食疲労低応力域においては、曲げ、ねじり両疲労ともき裂発生様式が腐食ピット経路に基づくき裂発生であり、両負荷様式の差異が現れにくい。またき裂進展様式は、両疲労ともモード I 形が支配的であり、腐食性

環境の影響により負荷様式の差異が現れにくくなる。

(5) 腐食ピットの発生・成長挙動における回転曲げとねじりの負荷様式の差異は明確に現れない。腐食ピットの発生・成長挙動は  $\sigma_{\max}$  の影響を受けるが、せん断応力の大小の影響を受けないことが推察された。

終わりに本研究にご協力いただいた当時富山大学生、新田慎一君並びに神谷英司君に謝意を表する。

### 文 献

- (1) 石原・ほか2名, 機論, 50-454, A(1984), 1123.
- (2) 北川・ほか2名, 機論, 51-464, A(1985), 1026.
- (3) 箕島・ほか2名, 材料, 37-417(1988), 670.
- (4) 石原・ほか2名, 材料, 33-370(1984), 901.
- (5) 阿部・村上, 機論, 55-511, A(1989), 443.
- (6) 西原・遠藤, 材料試験, 4-21(1955), 154.
- (7) 西谷編, 疲労強度学, (1985), 15, オーム社.
- (8) 加藤・中野, 文献(2)の1208ページ.
- (9) 北川・ほか3名, 機論, 45-395(1979), 707.
- (10) 石原・ほか3名, 機論, 57-533, A(1991), 32.
- (11) 近藤, 機論, 53-495, A(1987), 1983.
- (12) 石原・ほか3名, 機論, 57-540, A(1991), 1775.
- (13) 大塚・ほか3名, 機論, 42-357(1976), 1313.
- (14) Gough, H. J. and Sopwith, D. G., *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 135(1932), 392.
- (15) 横堀・ほか2名, 機論, 43-376(1977), 4353.
- (16) Murakami, Y., *Stress Intensity Factors Hand Book*, 2 (1987), 657, Pergamon Press.