

寸法の異なる試験片の腐食疲労寿命に及ぼす
複数表面き裂分布特性の影響*石原外美*¹, 宮尾嘉寿*¹, 三輪洋嗣*²Effects of Distributed Surface Cracks on Corrosion Fatigue Lives
of Specimens with Different Diameters

Sotomi ISHIHARA, Kazuyu MIYAO, and Hiroshi MIWA

Rotary bending fatigue tests were carried out in a sodium chloride aqueous solution by using specimens of 6 and 12 mm diameters in order to investigate the effects of the distributed surface cracks on corrosion fatigue lives or crack growth periods N_p . N_p for specimens of 6 mm diameter decreased with increasing crack density or sum total of crack lengths. On the other hand, N_p for specimens of 12 mm diameter increased with increasing crack density or sum total of crack lengths. These effects of the distributed surface cracks on the crack growth period N_p were explained by taking into account both crack coalescence behaviors and stress relaxation effects at cracked parts.

Key Words: Corrosion Fatigue, Stress Relaxation, Size Effect, Distributed Surface Cracks, Crack Coalescence, Crack Growth

1. 緒 言

平滑材の疲労過程では多数の表面き裂が発生、進展する。これらの多数のき裂間の干渉、合体挙動は平滑材の疲労寿命を支配する大きな因子の一つと考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。著者らはこれまでに腐食疲労下の表面き裂の分布特性に及ぼす2種類の試験片寸法の影響について検討した。腐食疲労低応力域では、一定の疲労寿命比において無次元き裂長さの分布 $F(2l/d)$ は試験片寸法によらず、一定であることを明らかにしてきた⁽³⁾。また、前報⁽⁴⁾では、ショットピーニング材と焼鈍材を用いて大気中および塩水中にて疲労実験を行い疲労寿命に及ぼすき裂分布特性の影響を検討した。すなわち、分布き裂の密度、総長さ等が大きいショットピーニング材では、大気中疲労過程では分布き裂の合体による寿命減少作用が支配的であるのに対し、腐食疲労低応力域では分布き裂の相互作用により疲労寿命は逆に増加する傾向を示した。このように、分布き裂は上述のような疲労寿命を増加させる効果ばかりではなく、大幅な寿命低下をもたらすという作用もあり、き裂の分

布特性と疲労寿命の関わりはこれまでに十分明らかにされていない。

本研究では、腐食疲労過程で比較的高密度のき裂が発生する試験片直径が12 mmのS45C丸棒と、き裂密度の高くない直径6 mmのS45Cの2種類の試験片⁽³⁾を用いて、食塩水中にて回転曲げ疲労試験を行い、き裂の分布特性と疲労寿命の関わりを検討した。

2. 試験片および実験方法

使用した試験片素材は市販の機械構造用炭素鋼S45C材であり、それを真空焼なまし処理を行ったものを供試材として用いた。その化学成分はC:0.46%, Mn:0.81%, Si:0.23%, P:0.022%である。試験片形状および寸法は図1に示す直径6 mm(以後φ6材と略記)および12 mm(以後φ12材と略記)の丸棒試験片である。納入材を図1の形状まで機械加工後、1173 K, 1 hの真空焼なまし処理を行い、さらに直径を20 μmほど電解研磨後実験に供した。試験片の焼なまし処理後の機械的性質は降伏強さ=317 MPa, 引張強さ=624 MPa, 伸び=48.7%であった。

腐食疲労実験は、分布き裂の疲労寿命に及ぼす影響が顕著に現れる低応力域98 MPaにてφ6およびφ12材それぞれ12本の試験片を用いて回転曲げ疲労試

* 平成元年3月10日 東海支部第38期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年7月27日。

*¹ 正員, 富山大学工学部(〒930 富山市五福3190)。

*² 学生員, 富山大学大学院。

験を行った。試験片表面の分布き裂の測定は任意の繰返し数ごとに試験機を停止させ、表面のレプリカを採取することにより行った。なお、応力繰返し速度は60 Hz、腐食液は液温298 K一定の3%食塩水である。その他の実験方法は既に報告しているもの⁽³⁾と同一なので、詳細は文献を参照されたい。

3. 実験結果

3.1 疲労寿命分布およびき裂進展期間の分布

図2は、3%食塩水中における応力振幅98 MPaにおける12本のφ6およびφ12材の疲労寿命分布を示したものである。ワイブル確率紙上に平均ランク法によりプロットしている。図よりわかるように、φ12材の腐食疲労寿命はφ6材のそれに比較して約2倍ほど長い傾向にある。

次に疲労寿命 N_f をき裂発生までの期間 N_i とき裂進展期間 N_p の両者の和として、き裂進展期間 N_p を求めた。ただし、 N_i は、φ6材、φ12材ともに50 μm以上のき裂が発見された繰返し数と発見されない繰返し数の平均値を採った。図3は、図2の疲労寿命分布に関する実験結果を再整理し、 N_p 分布としてワイブル確率紙上にプロットしたものである。

図3よりわかるように、φ12材の N_p はφ6材のそれよりも明らかに長く、疲労寿命と同様の傾向を示すことがわかる。しかし、 N_i の分布にはφ6およびφ12

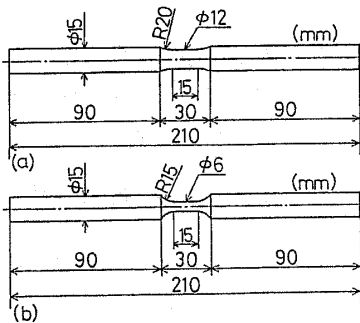


図1 試験片形状および寸法

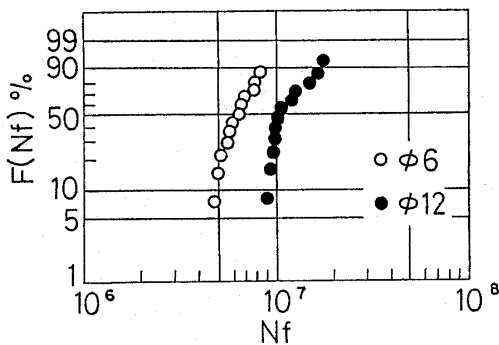


図2 腐食疲労寿命分布(塩水中, $\sigma=98$ MPa)

両材の差異は明確に観察されなかった。

3.2 腐食疲労過程のき裂密度の変化挙動

図4はき裂密度 n_i/A を縦軸に横軸にき裂発生後の繰返し数 $(N-N_i)$ をとり片対数グラフ上に整理したものである。(a)図はφ6材の結果を(b)図はφ12材の結果を示している。ここで n_i は発生するき裂個数、 A は観察面積を示す。

図よりわかるように、φ6材およびφ12材ともに、各試験片ごとにき裂発生挙動は大きくばらつき、さまざまな形態をとっている。このようなき裂発生挙動を次式で近似し⁽⁶⁾、 n_0/A ならびに β の確率分布を調査

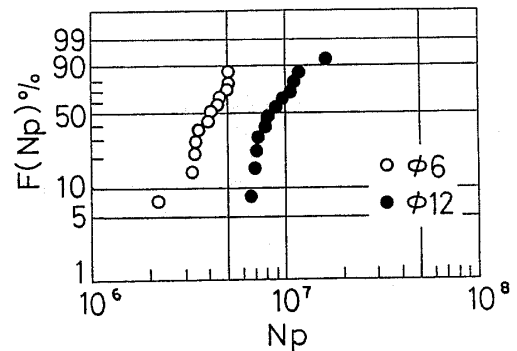


図3 き裂進展期間の分布(塩水中, $\sigma=98$ MPa)

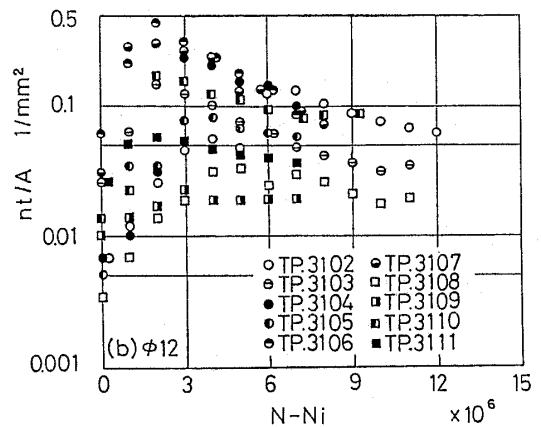
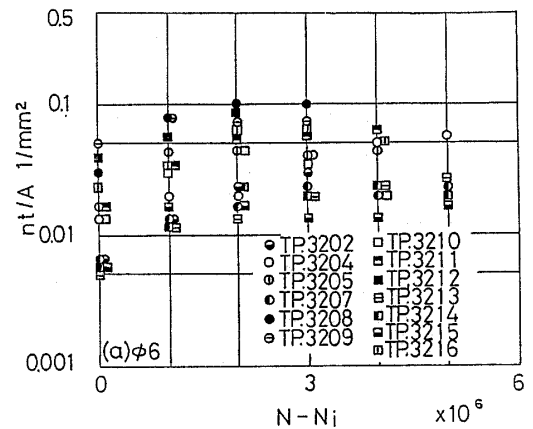


図4 応力繰返しに伴うき裂密度の変化

した。

$$n_i/A = (n_0/A)[1 - \exp\{-\beta(N - N_i)\}] \dots\dots (1)$$

これらをワイブル確率紙上にプロットした結果をφ6およびφ12材について図5および6に示す。これらの分布を3母数ワイブル分布で近似し、得られた各母数すなわち形状母数 m 、尺度母数 a 、位置母数 γ の値を図中に示した。図よりわかるように、個々の試験片によって n_0/A および β は種々に変化し、この傾向はφ6およびφ12材に共通している。

3.3 き裂の空間分布に及ぼす試験片寸法の影響

試験片長手方向にき裂が空間的にどのように分布しているのか調べるために、図7に模式図を示すように試験片平行部を5個の環状区間に分割し、各区間の $(1/A)\sum(2l_i/d)$ ($=S_j, j=1, 5$) を調査した。ここで、 $2l_i$ は個々のき裂長さ、 d は試験片の直径を表している。

試験片長手方向の各区間のき裂発生の一様性を調べるために、各試験片ごとに S_j の変動係数 C_v を求めた。そのヒストグラムをφ6およびφ12材について図8(a)および(b)に示す。φ6およびφ12材ともそれぞれ10本の試験片の疲労寿命比が80%の時点の結果を示したものである。

図よりわかるように、 C_v 値は各試験片ごとにばら

つきが大きい。φ6材の平均 C_v 値はφ12材のそれの3倍ほど大きい。

以上より、φ6材とφ12材のき裂の空間分布の差異は次のようにまとめられる。すなわち、φ6材ではき裂はある一つの区間に集中して発生するのに対し、φ12材ではより一様性が強く、しかもき裂の発生数が多いことが結論される。

3.4 き裂進展期間の分布に及ぼすき裂分布特性の影響
き裂の分布特性を表す尺度として、(イ)き裂密度 n_i/A 、(ロ)単位面積当たりの無次元き裂長さの総和 $(1/A)\sum(2l_i/d)$ および(ハ)き裂の空間分布を表す C_v を考える。

図9は N_p と $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の関係をφ6材とφ12材の両者に対して示したものである。図よりわかるように、φ6材では $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の増加に伴い N_p が単調に減少するのに対し、φ12材では、φ6材の傾向とは逆に $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の増加に伴い N_p は増加する傾向が見られる。このような傾向は N_p とき裂密度 n_i/A の関係においても共通して観察された。

図10は N_p とき裂の空間分布特性を示すパラメータ C_v の関係をφ6材とφ12材について示したものである。図よりわかるように、大略 C_v の増加(き裂発生が特定の環状区間に集中)に伴い、き裂進展期間 N_p は減少する傾向を示す。

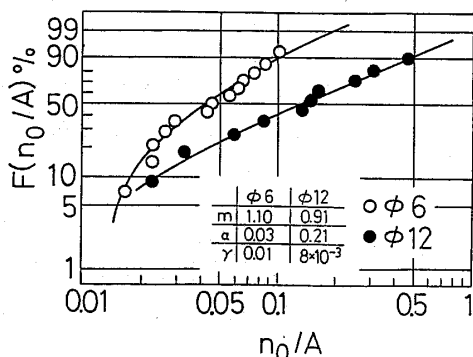


図5 n_0/A の確率分布 (腐食疲労, $\sigma=98$ MPa, ワイブル確率紙)

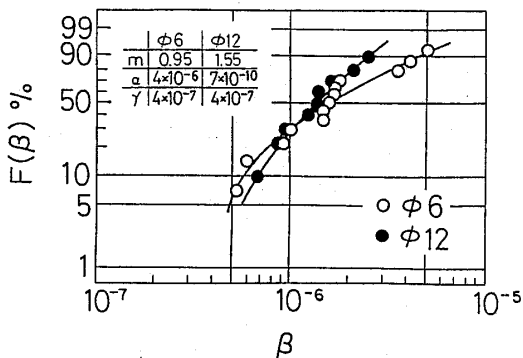


図6 β の確率分布 (腐食疲労, $\sigma=98$ MPa, ワイブル確率紙)

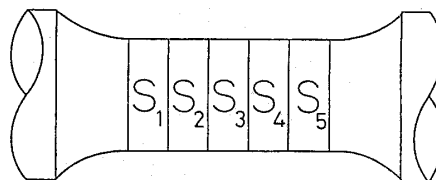


図7 試験片の環状区間

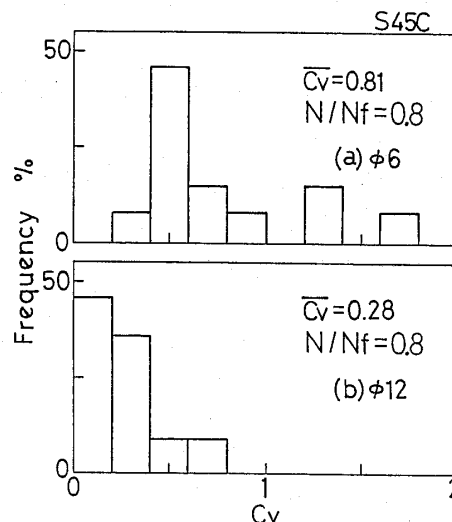


図8 試験片長手方向のき裂の分布状況

4. 考 察

これまでに述べたき裂進展期間 N_p とき裂分布特性に関する実験結果より、複数試験片の N_p のばらつきは複数き裂の分布特性と対応することが明らかとなった。また、疲労過程で単位面積当たりに多数個のき裂が発生した場合、必ずしも N_p の低減をもたらすわけではない。 $\phi 6$ 材では、き裂が多数発生すればするほど N_p が減少するのに対し、 $\phi 12$ 材では逆に、き裂が多数発生すればするほど N_p が増加する傾向を示した。すなわち、 N_p に及ぼすき裂分布特性の影響は、試験片寸法依存性を示すことが明らかとなった。本章ではこの点に関して考察する。

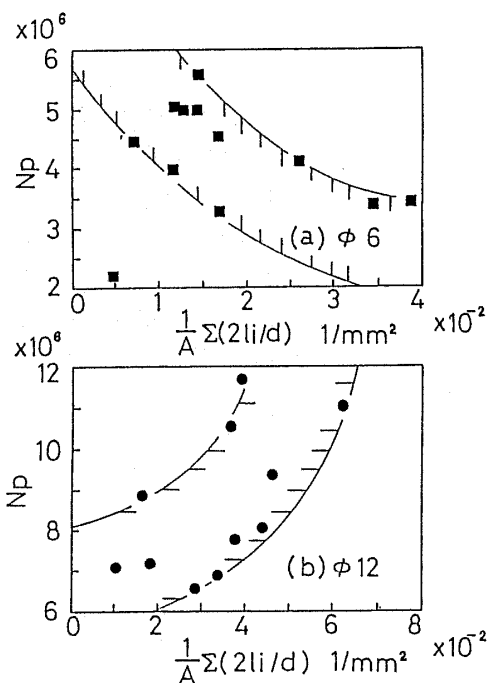


図 9 N_p と無次元き裂長さの総和 $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の関係

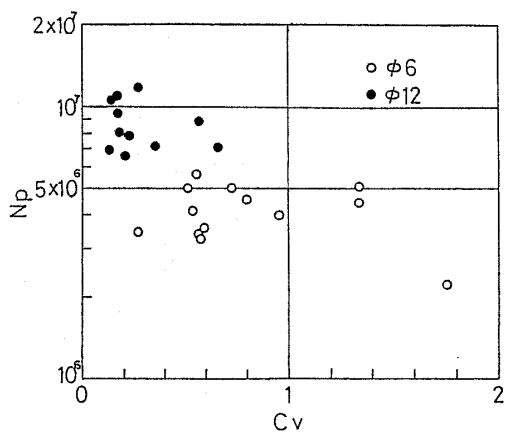


図 10 N_p と C_v の関係

分布き裂のき裂進展期間に及ぼす影響は大略次の二点に分類できると考えられる。すなわち、(イ)複数き裂間の合体に基づくき裂進展の加速効果⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、(ロ)き裂発生部の剛性低下による応力緩和に基づくき裂進展の減速効果である⁽⁴⁾。(イ)の複数き裂間の合体に基づくき裂進展の加速効果のみを考慮したコンピュータシミュレーションはすでに北川ら⁽¹⁾によって行われている。そこで、北川らによって開発されたシミュレーション⁽¹⁾をベースに、新たにき裂発生密度およびき裂発生速度の確率分布を考慮し、複数試験片の腐食疲労過程のコンピュータシミュレーションを行った。そのフローチャートを図 11 に示す。

確率的なき裂発生挙動のシミュレーションは、き裂発生位置が一様でランダムであると仮定し、さらに初期き裂長さを、 $\phi 6$ 材および $\phi 12$ 材に対して $50 \mu\text{m}$ 一定とした。また、応力繰返しに伴うき裂密度の変化は式(1)を用いた。各試験片ごとに発生する最大き裂密度 n_0/A ならびにき裂発生速度 β は、3.2 節で述べた図 5 および図 6 の実験結果を 3 母数ワイブル分布で近似し、得られた母数を用いてワイブル乱数を発生させることにより変化させた。

き裂進展速度は本来確率論的特性を示すことが予想されるが⁽⁵⁾、ここでは確定的進展挙動をとるものとし、次次のパリス則に従うものとした。

$$dl/dN = C\Delta K^m \dots\dots\dots (2)$$

既報⁽³⁾で述べたように、 C および m 値は $\phi 6$ 材と $\phi 12$ 材でいくぶん異なるが、ここではき裂進展期間の分

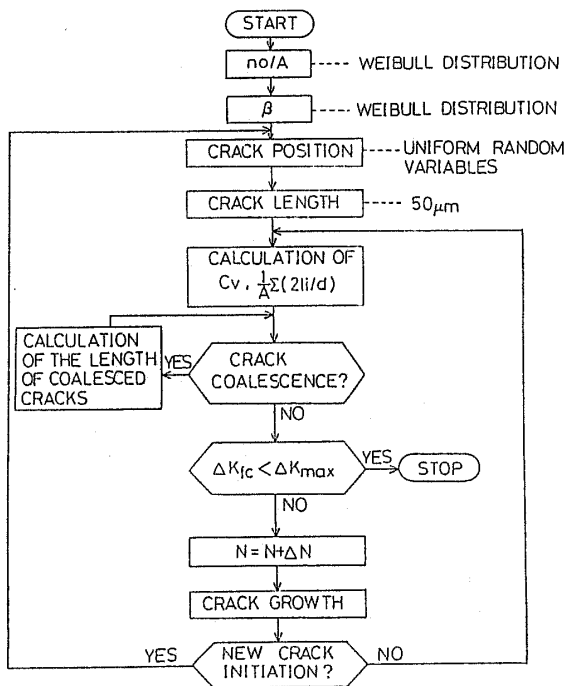


図 11 フローチャート

布に及ぼすき裂の分布特性を明らかにすることが目的であるから、両材の C および m 値は等しいものとして $C=1.654 \times 10^{-11}$, $m=2.41$ として計算を行った。また、き裂進展の下限界値は $\Delta K_{th}=0$ として計算を行った。

試験片の最終破壊は、 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の疲労破壊靱性値 ΔK_{rc} を $9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 一定として、最大のき裂長さが臨界のき裂長さ $2l_c$ に達した時点で生じるものとした。なお、回転曲げを受ける表面き裂の応力拡大係数は不明であるから、第一近似として次式を用いて $2l_c$ を計算した。

$$\Delta K_{rc} = \sigma \sqrt{\pi l_c} \dots\dots\dots (3)$$

き裂の合体の判定は、き裂先端に北川らによって考案された多角形のき裂合体領域⁽¹⁾を描き、この合体領域に他のき裂先端が入ると両き裂の合体が生じるとした。

$\phi 6$ および $\phi 12$ 材それぞれ 200 本の複数試験片に対する腐食疲労過程のコンピュータシミュレーション結果を $\phi 6$ 材および $\phi 12$ 材についてそれぞれ図 12(a) および (b) に示す。図は縦軸にき裂進展期間 N_p を横軸に最終破壊時のき裂密度 n_i/A をとり整理したものである。図よりわかるように、 $\phi 6$ 材および $\phi 12$ 材とも、 n_i/A の増加とともに N_p は徐々に低減する傾向が認められる。図中に示した破線はき裂が 1 本だけ発生した場合に予想される N_p であるが、き裂個数の増加に伴い、シミュレーションによる N_p は破線よりも低下する傾向にあり、き裂合体による寿命減少効果が明確に認められる。このような傾向は横軸に $(1/A) \sum (2l_i/d)$ をとって整理した結果でも同様に認められた。

$\phi 12$ 材において、き裂間の合体のみを考慮したシミュレーション結果の傾向 [図 12(b)] と実験結果の傾向 [図 9(b)] とが食い違うことから、 $\phi 12$ 材の低応力域の腐食疲労過程では、き裂進展寿命に及ぼす分布き裂の影響として、き裂間の合体が支配因子となっていないことがわかる。一方、 $\phi 6$ 材の低応力域の腐食疲労過程では、シミュレーション結果 [図 12(a)] と実験結果 [図 9(a)] とが同一の傾向を示すことから、き裂進展寿命に及ぼす分布き裂の影響として、複数き裂間の合体が支配因子となっていることがわかる。

以上の考察・検討の結果、 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の腐食疲労低応力域のき裂進展期間とき裂分布特性に関する実験結果は大略次のように説明できる。

3.3 節で述べたように $\phi 6$ 材では、比較的小数のき裂が試験片長手方向に局所的に発生するのに対し、 ϕ

12 材では、多数のき裂が試験片長手方向に一樣に分布する傾向を示す。このようなき裂の分布状態の差異に起因して、 $\phi 6$ 材では、き裂発生部の剛性低下による応力緩和の影響よりも試験片円周方向のき裂合体の影響を受けやすく、多数のき裂が発生するほどき裂合体確率が高くなり N_p は減少する。一方、 $\phi 12$ 材では試験片長手方向に多数のき裂が一樣に発生するので、き裂合体の影響よりもき裂発生部の剛性低下による応力緩和の影響をより強く受ける。そのため、 $\phi 12$ 材では、多数のき裂が発生するほどき裂発生箇所の剛性低下に起因する負荷応力の緩和が顕著になりき裂進展速度が低下する。結果として N_p の増加をもたらす。

次に、 $\phi 6$ 材と $\phi 12$ 材のき裂の分布状況(密度、単位面積当たりのき裂の総長さおよび空間分布)が異なる原因について考察する。

図 13 は疲労寿命比 80% における単位面積当たりの無次元き裂の総長さ $(1/A) \sum (2l_i/d)$ とき裂の空間特性を示すパラメータ C_v の関係を $\phi 6$ 材と $\phi 12$ 材について示したものである。図よりわかるように $(1/A) \sum (2l_i/d)$ と C_v の間には一価関係が存在し、 $(1/A) \sum (2l_i/d)$ の増加とともに C_v は低下する。この関係

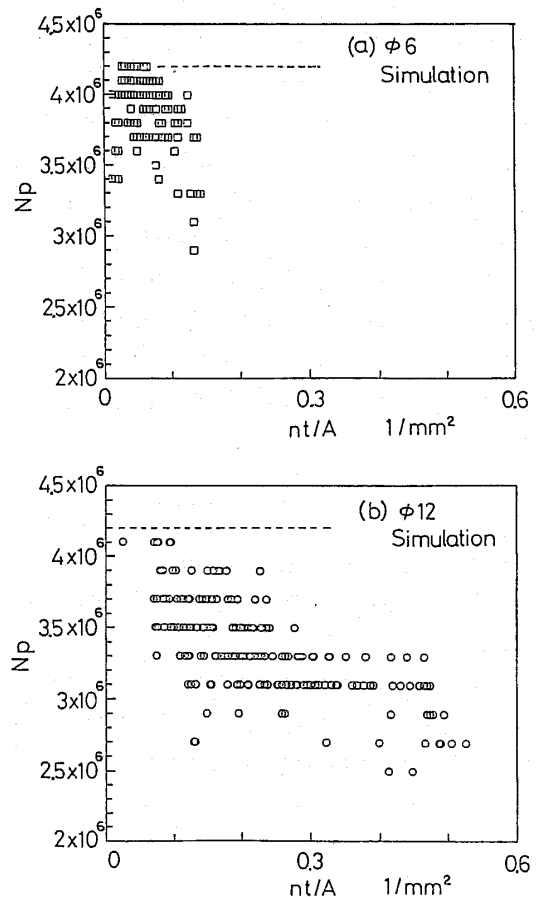
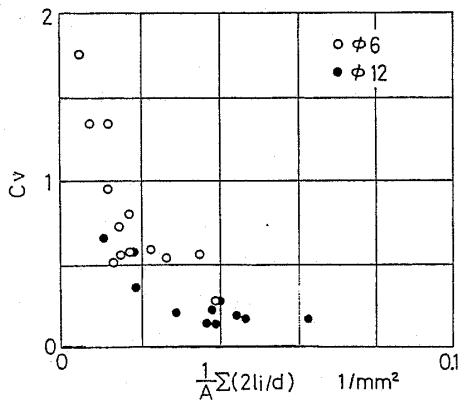


図 12 N_p と n_i/A の関係 (腐食疲労, 98 MPa, シミュレーション)

図 13 $(1/A)\Sigma(2l_i/d)$ と C_v の関係

には、 $\phi 6$ 材と $\phi 12$ 材の差異は認められない。したがって、図8で示した $\phi 6$ および $\phi 12$ 材のき裂発生空間分布(C_v 値)の差異は、両材の $(1/A)\Sigma(2l_i/d)$ の差異に起因するといえよう。

一定の疲労寿命比 N/N_f において、 $\phi 12$ 材の $(1/A)\Sigma(2l_i/d)$ およびき裂密度 n_i/A が $\phi 6$ 材のそれよりも大きくなる理由は既に前報⁽⁹⁾において述べた。しかし、図4に示すように、一定の繰返し数においても $\phi 12$ 材のき裂密度 n_i/A は $\phi 6$ 材のそれよりも高い。この理由は現時点では明確ではないが、試験片寸法の差異に基づき、試験片表面上での流速が変化することがその一因として考えられる。すなわち応力繰返し速度一定の条件で、 $\phi 12$ 材の試験片表面と腐食液の相対速度は $\phi 6$ 材におけるそのほぼ2倍であるから、 $\phi 12$ 材の試験片表面では $\phi 6$ 材に比し腐食液中の溶存酸素の拡散が起こりやすく、酸素供給量が多くなる。塩素イオンを含む中性溶液中では、流速が速く酸素量が多いほど試験片と腐食液との電気化学的応答が顕著となるから⁽⁹⁾、 $\phi 12$ 材では $\phi 6$ 材に比較し試験片表面での電気化学反応が促進され、その結果多数のき裂が発生するものと考えられる。

5. 結 論

試験片直径の異なる複数本の $\phi 6$ および $\phi 12$ 材のき裂進展期間 N_p とき裂分布特性の関係を調査し、次の結論を得た。

(1) 一定の腐食疲労実験条件下で行われた $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の複数試験片の疲労過程では、各試験片ごとに発生するき裂密度ならびに発生速度は種々に変

化する。

(2) 腐食疲労低応力域において、 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の複数試験片のき裂進展期間 N_p は、個々の試験片の複数き裂の発生・分布状況に明確に依存し変化する。

その変化傾向には試験片寸法依存性が存在する。すなわち、 $\phi 6$ 材では疲労過程で多数のき裂が発生したり、あるいは発生き裂の総長さが大きいほど、 N_p の減少傾向を示すのにたいし、 $\phi 12$ 材では、 $\phi 6$ 材とは逆に N_p の増加傾向を示す。

(3) $\phi 6$ 材では、比較的小数のき裂が試験片長手方向に局所的に発生するのに対し、 $\phi 12$ 材では、多数のき裂が試験片長手方向に一樣に分布する傾向を示す。このようなき裂の分布状態に起因して、 $\phi 6$ 材では多数のき裂が発生するほどき裂合体確率が高くなり N_p は減少する。一方、 $\phi 12$ 材では、試験片長手方向に多数のき裂が発生するので、き裂合体の影響よりも、き裂発生部の剛性低下による応力緩和の影響をより強く受ける。そのため、 $\phi 12$ 材では、多数のき裂が発生するほどき裂発生箇所の剛性低下に起因する負荷応力の緩和が顕著になり N_p の増加をもたらす。

(4) 試験片長手方向へのき裂発生の一様性を表現するパラメータ C_v は、発生する単位面積当たりの無次元き裂の総長さ $(1/A)\Sigma(2l_i/d)$ と一価関係にあり、 $(1/A)\Sigma(2l_i/d)$ の増加とともに C_v は低下する。すなわち、多数のき裂が発生するほどき裂は空間に一樣に分布する傾向を示す。また、この関係には $\phi 6$ 材と $\phi 12$ 材の明確な差異は認められない。

終わりに本研究にご協力いただいた当時富山大学生、浅井英明君、富山大学院生、竹花伸一君に謝意を表す。

文 献

- (1) Kitagawa, H., ほか2名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 642 (1978), 98.
- (2) Baxa, M. S., ほか2名, *Met. Trans.*, A (1978), 1141.
- (3) 石原・ほか2名, 機論, 54-504, A (1988), 1482.
- (4) 石原・ほか2名, 機論, 54-507, A (1988), 1967.
- (5) 石原・ほか2名, 機論, 50-454, A (1984), 1123.
- (6) 星出・ほか3名, 機論, 52-474, A (1986), 406.
- (7) 田中・ほか2名, 機論, 51-467, A (1985), 1780.
- (8) 岡村, 線形破壊力学入門, (1976), 99, 倍風館.
- (9) 岡本・井上, 腐食と防食, (1977), 84, 大日本図書.