

複数き裂の発生による応力の緩和を考慮した 腐食疲労過程のコンピュータシミュレーション*

石原 外美^{*1}, 塩沢 和章^{*1}
宮尾 嘉寿^{*1}, 三輪 洋嗣^{*2}

Computer Simulation of Corrosion Fatigue Process Considering Stress Variation Due to Crack Initiation and Crack Propagation

Sotomi ISHIHARA, Kazuaki SHIOZAWA,
Kazyu MIYAO and Hiroshi MIWA

In order to investigate the stress relaxation behaviors at the specimen surface during the corrosion fatigue process caused by the initiation and propagation of many cracks, rotary bending fatigue tests were carried out in a sodium chloride aqueous solution by using specimens of 6 and 12 mm diameters. Stress decreases of about 25~50 % were observed during the corrosion fatigue process performed at low stress amplitude. These stress relaxation behaviors are well evaluated by calculating the compliance increase of the specimen. Computer simulations of the corrosion fatigue process of unnotched specimens were conducted. The results showed good agreement with the experimental results. In the simulations, probabilistic crack initiation behaviors during the corrosion fatigue process, the stress relaxation effect at the cracked parts and crack coalescence behaviors among many distributed cracks are taken into consideration.

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

1. 緒 言

平滑材の腐食疲労過程では多数のき裂が発生、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であると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。前報⁽³⁾では直径6 mm (φ6材)および12 mm (φ12材)の2種類の試験片を用いて、腐食疲労過程で発生するき裂分布特性と腐食疲労寿命との関係を調査した。その結果によれば、φ12材では多数のき裂が発生するほど腐食疲労寿命が増加するのに対し、φ6材ではφ12材とは逆に多数のき裂が発生するほど腐食疲労寿命が減少する傾向が観察された。この原因として、φ6材では、き裂合体現象が腐食疲労寿命の支配因子となるのに対し、φ12材ではφ6材に比べて比較的長大なき裂が多数分布するため、き裂発生部の剛性低下による応力の緩和が疲労寿命に大きな影響を与えることが予想された。

本研究では、上述の応力の緩和作用を実験と理論の両側面から検討を加えた。ついで、これらの応力の緩和挙動を組込んだ腐食疲労過程のコンピュータシミュ

レーションを実施し、実験結果との比較を通じて考察を加えた。

2 試験片および実験方法

使用した試験片素材は機械構造用炭素鋼S45C材であり、これを1173 K、1時間の真空焼なまし処理を行った後、試験片表面を電解研磨し実験に供した。その化学成分および機械的性質は既報⁽³⁾に述べているので省略する。また、試験片形状および寸法は、既報⁽³⁾と同様、直径が6 mmおよび12 mmの2種類である。

腐食疲労実験は、φ6材およびφ12材を用いて、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にて行った。用いた疲労試験機は小野式回転曲げ疲労試験機であり、応力繰返し速度は60 Hzである。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報⁽³⁾に述べているものと同じなので、記述を省略する。

腐食疲労過程におけるき裂の発生、成長に伴う試験片表面のひずみ変化は、ゲージ長0.2 mmのストレインゲージを用いて測定した。試験片母材のヤング率がき裂発生前後で変化しないと考えると、き裂発生部のひずみ変化がそのまま応力変化を示すことになる。試験機を任意の繰返し数で停止させ、試験片表面の油脂

* 原稿受付 平成2年4月16日。

*¹ 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。

*² 准員、(株)豊田自動織機製作所 (〒448 刈谷市豊田町)。

をアセトンで除去し、発生しているき裂をまたがないように、ストレインゲージを貼り付け、最大の曲げモーメントを負荷した場合の試験片表面の引張ひずみを測定した。この際、ゲージ貼付け部に依らないで、試験片全体の平均的ひずみ値の変化を得るために、ゲージ貼付け部を変えて複数回の測定を行った。同時に試験片表面のき裂の発生状況を調べるためにレプリカを採取した。

3. 実験結果

3.1 複数表面き裂を含む試験片の曲げモーメントの増加に伴う表面ひずみの変化 応力 98 MPa にて腐食疲労実験を行い、最終破壊前に試験を中断した。図 1 は、中断した $\phi 12$ 材を用いて、試験片に負荷する曲げモーメントを $0 \text{ N}\cdot\text{m}$ から $16.63 \text{ N}\cdot\text{m}$ まで $1.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ ずつ変化させながら、その都度、試験片表面の最大の引張ひずみを調べた一例である。

図中の 4 本の実線は、き裂を含んだ中断した試験片の任意の 4 箇所において調べたひずみ変化であり、また破線は、き裂の発生前のひずみの変化を示している。図よりわかるように、一定の曲げモーメントにおいて、き裂を含んでいる試験片の表面ひずみは、き裂

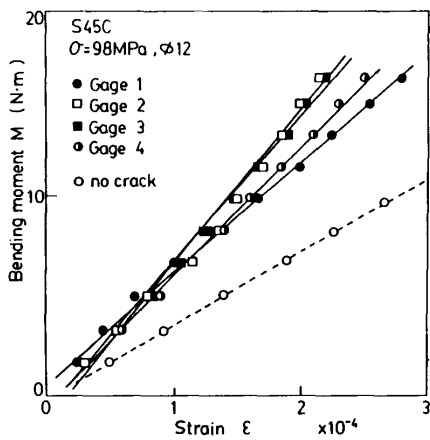


図 1 試験片表面ひずみの曲げモーメントの増加に伴う変化

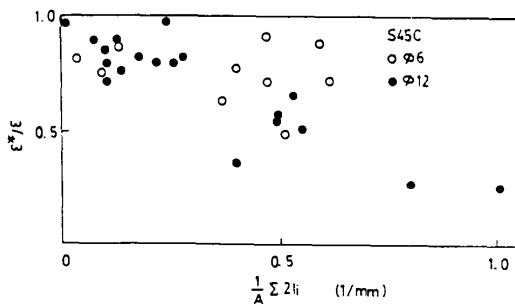


図 2 ϵ^*/ϵ の単位面積当たりの総き裂長さに伴う変化

発生前に比較して小さくなっていることがわかる。母材のヤング率がき裂の発生によって変化しないと考えると、ひずみ ϵ^*/ϵ の低下はそのまま応力 σ^*/σ の低下と考えることができる。したがって図 1 は、腐食疲労過程のき裂発生・進展に伴って試験片表面の負荷応力が徐々に減少することを示している。

3.2 応力の緩和に及ぼす分布き裂の影響 図 2 は、応力振幅 98 MPa の腐食疲労過程において、縦軸にき裂発生により変化したひずみ ϵ^* と、き裂発生前の元のひずみ ϵ との比 ϵ^*/ϵ をとり、横軸には、試験片表面に発生している単位面積当たりのき裂長さの総和 $(1/A)\sum 2l_i$ をとり、整理したものである。図よりわかるように、 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材とも領域中の発生している単位面積当たりのき裂長さの総和 $(1/A)\sum 2l_i$ が大きくなるほど、 ϵ^*/ϵ が低下していることがわかる。図 3 は ϵ^*/ϵ の繰返し数に伴う変化を示したもので、横軸にき裂発生後の繰返し数 $(N - N_i)$ をとっている。図よりわかるように任意の繰返し数において、 $\phi 12$ 材の ϵ^*/ϵ 値は $\phi 6$ 材のそれよりも顕著に低下することがわかる。

ここで、既述のように、ひずみ ϵ^*/ϵ の低下はそのまま応力 σ^*/σ の低下と考えることができるから、図 2 および 3 より、き裂発生部における応力の緩和は領域中の $(1/A)\sum 2l_i$ 値が大きくなる程顕著になること、また、腐食疲労過程における応力の緩和の程度は $\phi 6$ 材に比較して $\phi 12$ 材のほうが顕著であることが読取れる。

4. 複数き裂発生部の応力の緩和評価法

4.1 Aboudi⁽⁴⁾の方法 腐食疲労過程における応力の緩和を考慮したシミュレーションを行う上で、応力の緩和を評価する方法について以下の 2 種類を検討した。はじめに、Aboudi の理論⁽⁴⁾について説明する。この理論は、図 4 (b) に示すような等間隔に発生して

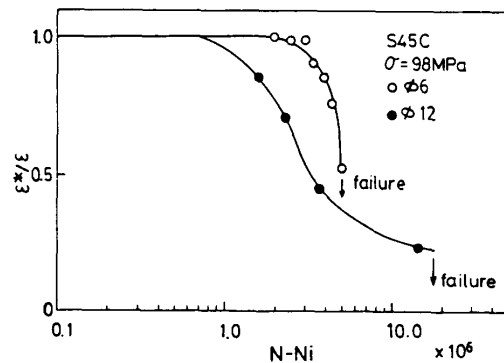


図 3 ϵ^*/ϵ の応力繰返しに伴う変化

いるき裂群を有する平板が X_1 軸方向に一定の変位を与えられている場合の板の剛性低下を計算で明らかにしようとするものである。まず、図4(b)に示すモデルの中から図4(a)に示すような単一き裂を含む微小領域(以後 unit-cell と呼ぶ)を抽出し、さらにそれをき裂が存在する領域 ($a=1$) とき裂が存在しない領域 ($a=2$) に分割し、それぞれの領域における平衡方程式を図の X_3 方向に平均化することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} & d_1 S_{ij}^{(a)} + (d_a/2) [\sigma_{ij}^{(a)}(d_a/2) \\ & + (-1)^{k+1} \sigma_{ij}^{(a)}(-d_a/2)] / d_a - k S_{ij}^{(a-1)} = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\sigma_{ij}^{(a)}$ は各領域の応力、 $S_{ij}^{(a)}$ は次式で定義される X_3 方向への平均応力である。

$$\begin{aligned} S_{ij}^{(a)} &= (1/d_a) \int_{-d_a/2}^{d_a/2} (X_3^{(a)})^k \sigma_{ij}^{(a)} dx_3^{(a)} \\ & (k=0, 1, 2) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

次に、領域 ($a=1$) と ($a=2$) の境界での応力の連続性、変位-ひずみの関係式と構成則を用いて、式(1)を解くことにより、unit-cell の X_1 方向の有効弾性係数を求め、それを図4(b)に示す多数のき裂を有する平板の有効弾性係数としている。Aboudi はこれらの連立偏微分方程式の解を二つのパラメータ $d_1/(d_1+d_2)$ 、 $d_1/2L$ により整理している。

Aboudi⁽⁴⁾の計算方法を実験結果に適用するに当たって、測定面積中に観察されるき裂長さの総和を、き裂個数 n_i で除して図4中の d_i を決定し、長さが d_i の n_i 個のき裂が図4(b)に示すように規則的に配置されているとして、 d_2 および $2L$ を決定した。本研究では、式(1)の連立偏微分方程式を差分近似式に置き換えて数値的に解いた。

回転曲げ疲労試験では、外力として試験片に負される曲げモーメントが疲労過程で一定であることが保証されている。しかし、複数個のき裂の発生している試験片表面近傍では、き裂発生による剛性低下により負される力が再分配され、この部分に加わる内力は

疲労過程で変化する⁽⁶⁾と考えられる。この場合、き裂発生部とき裂発生のない箇所との間の変位拘束により、き裂発生部には、内力の低下のみならず変位の増加も考えられ複雑な挙動を示すことが予想される。本研究では、第一近似として、き裂発生前後で試験片表面近傍の変位が一定であると仮定して、き裂を含む部分に負される応力を求めた。すなわち、Aboudi⁽⁴⁾のモデルによりき裂を含む平板の有効弾性係数を算出した後、これに変位一定の仮定並びに母材の弾性係数がき裂発生前後で変化しないという条件を用いて、平板に負される応力の変化を求めた。

4.2 コンプライアンスの増加による応力の緩和の評価

き裂を含む部材の剛性の低下を Aboudi⁽⁴⁾の方法に依らないで、き裂の発生並びに進展と関連させて定量的に議論するため、本研究では、き裂を含んだ弾性体のコンプライアンスに関する研究結果⁽⁵⁾を用いる。いま、任意時点 J で n 個のき裂先端を含み、直径 d 、長さ L_c の円柱上の物体に曲げモーメントを加える場合を考える。その場合のコンプライアンスの増加 $\Delta\lambda_j$ は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\Delta\lambda_j = \sum_{i=1}^n \int_0^{L_c} \frac{2}{E} \left(\frac{K_B}{M} \right) dA_i \dots\dots\dots (3)$$

また、き裂が全くない場合のコンプライアンス λ_0 は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\lambda_0 = \frac{L_c}{EI} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A はき裂面積、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントを表している。また、 K_B は表面き裂を含む円柱が曲げを受ける場合の応力拡大係数⁽⁶⁾である。

したがって、任意時点 J のコンプライアンス λ_j は、き裂が全くない場合のコンプライアンス λ_0 を初期値にして、き裂先端の存在によるコンプライアンスの増加分 $\Delta\lambda_j$ を逐次加えることによって求められる。

$$\lambda_j = \lambda_0 + \Delta\lambda_j \dots\dots\dots (5)$$

これに Aboudi の方法⁽⁴⁾を実験結果に適用したと同様の方法、すなわち変位一定の仮定並びに母材の弾性係数がき裂発生前後で変化しないという条件を用いて、試験片表面の応力並びにひずみの変化を求めた。その際の負荷応力 σ_j は直前の応力 σ_{j-1} と次式の関係にある。

$$\sigma_j = \frac{\lambda_0 + \lambda_{j-1}}{\lambda_0 + \lambda_j} \sigma_{j-1} \dots\dots\dots (6)$$

以上、2種類の方法で応力の緩和を評価した結果を図5および図6に示す。

図5よりわかるように、Aboudi の方法⁽⁴⁾を用いた計算結果は、 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材とも $(1/A) \sum 2l_i$ が 0.5

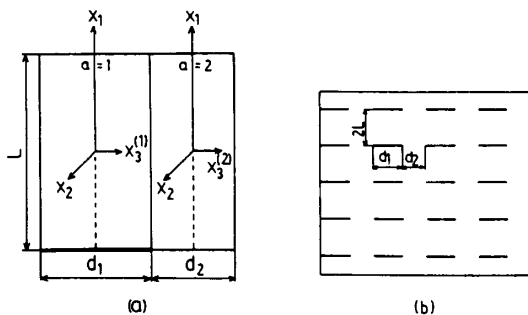


図4 Aboudi⁽⁴⁾の計算モデル

付近までは実験結果とよく合致している。φ12材では $(1/A)\sum 2l_i$ が 0.5 以上の大きな領域において、計算結果は実験結果よりも大きな ϵ^*/ϵ 値を予測する。この理由は、 $(1/A)\sum 2l_i$ の大きな領域(腐食疲労過程の後半)では少数個の長いき裂が存在し、このような長いき裂の剛性低下に寄与する効果が大きいため、図4(b)のモデルのように個々のき裂寸法が等しくかつ空間的に規則的に配置されていると考えることに無理があるためと考えられる。

一方、図6のコンプライアンス法は、存在しているき裂寸法をそのまま考慮しているから、計算結果はφ6材およびφ12材とも実験結果とよく一致している。そこで、以下に示す腐食疲労過程のコンピュータシミュレーションでは、き裂発生部の応力の緩和を評価する方法として、コンプライアンス法を用いることとした。

5. 応力の緩和を考慮したシミュレーション解析

5.1 フローチャート 既報⁽³⁾で述べたき裂発生挙動の確率的特性とき裂間の合体挙動を考慮した腐食疲労過程のシミュレーションプログラムに、4章で述べた方法に従って、き裂発生および進展に伴う応力の緩和を新たに考慮した腐食疲労過程のシミュレーションを試みた。計算の手順は図7に示すとおりである。

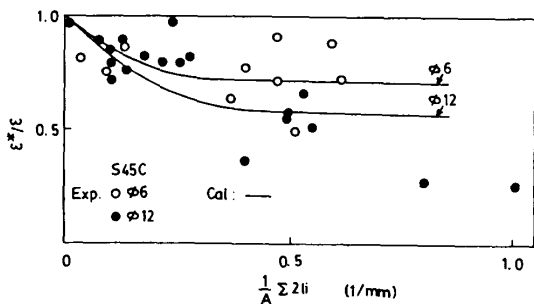


図5 Aboudiのモデル⁽⁴⁾による ϵ^*/ϵ の変化

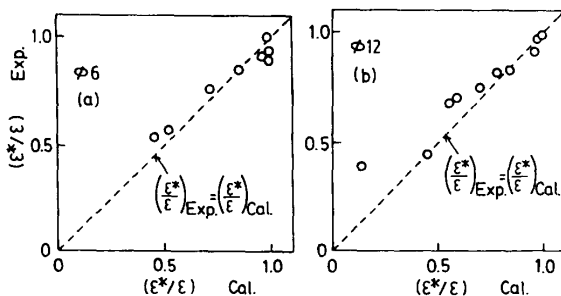


図6 コンプライアンス法⁽⁵⁾による ϵ^*/ϵ の計算値と実験値との比較

図中太い実線枠が応力の緩和を計算するルーチンであり、本論文で新たに付け加えたものである。なお、その他の箇所は既報⁽³⁾で示したものと基本的に同一である。

5.2 入力データ 腐食疲労過程のシミュレーション

解析に必要な入力データは、以下に示すとおりである。

- (a) 最大き裂密度 既報⁽³⁾で示した3母数ワイブル分布
- (b) き裂発生速度 既報⁽³⁾で示した3母数ワイブル分布
- (c) き裂発生位置 き裂中心の二次元的な座標を一様乱数で指定した
- (d) 初期き裂長さ 150 μm 一定とした
- (e) き裂進展 以下に示すパリズ則に従うものとする。

$$dl/dN = C\{\sigma(\pi l)\}^{2m}$$

ここで、C値、m値は供試材の実験結果より求め、φ6材およびφ12材とも $C=1.654 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.41$ とした。

(f) 最終破壊条件

試験片の最終破壊条件は以下の2種類を設定し、これらのいずれかが満たされると破壊するものとした。その一つは、φ6およびφ12材の腐食環境下の疲労破壊靱性値 ΔK_{Ic} を $9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 一定として、曲げを受

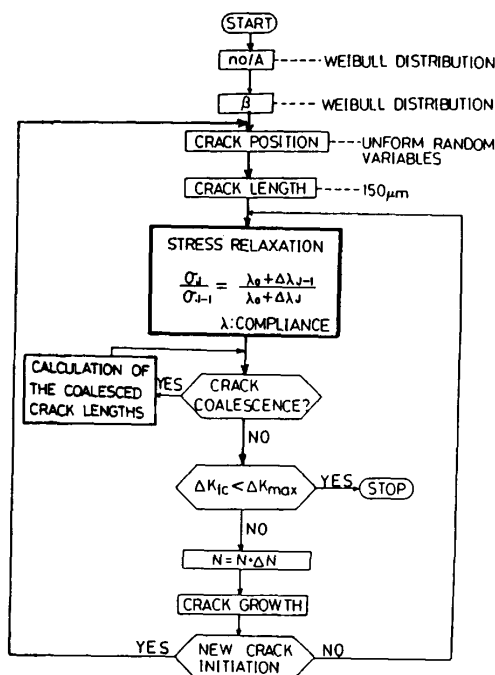


図7 フローチャート

ける丸棒中の表面き裂の応力拡大係数⁽⁶⁾が上記破壊靱性値に達することによって破壊するという条件であり、他の条件は、腐食疲労低応力域でみられる扁平な長き裂の発生による破壊を考慮して、曲げを受ける両側き裂を有する帯板の最大の応力拡大係数⁽⁷⁾が破壊靱性値 $9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達することによって生じるというものである。本来は環状き裂を有する曲げを受ける丸棒の応力拡大係数を用いるべきであるが、求められていない。

(g) き裂進展の下限界値

$\Delta K_{th} = 0.0$ とした。

5.3 シミュレーション結果と実験結果との比較

図 8 (a) および (b) は、 $\phi 6$ 材 および $\phi 12$ 材 について最終破断時の試験片表面上に分布するき裂の発生・進展状況を示したものである。また、図 9 (a) および (b) は試験片の最終破壊を引き起こした主き裂の進展

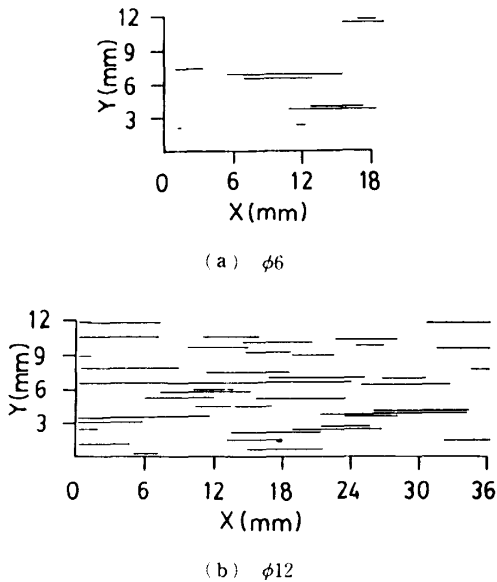


図 8 き裂の空間分布(シミュレーション)

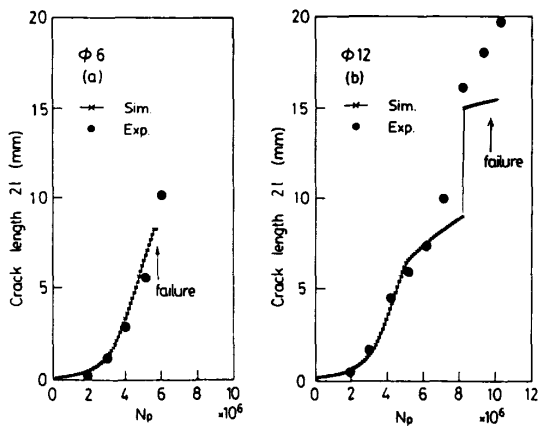


図 9 主き裂の進展挙動

挙動を示したものである。図中には実験点もあわせてプロットされている。この図よりわかるように、シミュレーションによる主き裂の進展挙動は、実験で観察された複数き裂間合体によるき裂進展速度の加速現象と、疲労過程の後期での大きなき裂発生に基づく応力の緩和によるき裂進展速度の減速効果の両者がよくシミュレートされていることがわかる。

図 10 (a) および (b) は、コンピュータシミュレーションで得られた $\phi 6$ 材 および $\phi 12$ 材 の腐食疲労過程での応力繰返しに伴うき裂長さの分布の変化を示している。図中に示した実験結果と比較すると、シミュレーションで得られた腐食疲労過程のき裂長さ分布の変化挙動は分布全体に沿って、実験傾向とよく一致しているものと思われる。また、き裂長さの長い部分の、不連続な広がりはき裂の合体による大きなき裂の発生に対応している。

このようなコンピュータシミュレーションを、き裂発生確率分布を考慮して複数回実行し、各試行における発生き裂の総長さ $(1/A)\sum(2l_i/d)$ とき裂進展寿命の関係を調査した。結果を図 11 (a) および (b) に示す。図よりわかるように、 $\phi 6$ 材 では、 $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の増加に伴う N_p の減少が、一方、 $\phi 12$ 材 では、 $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の増加に伴う N_p の増加が認められ、これらの結果は既報⁽³⁾の実験傾向と一致している。

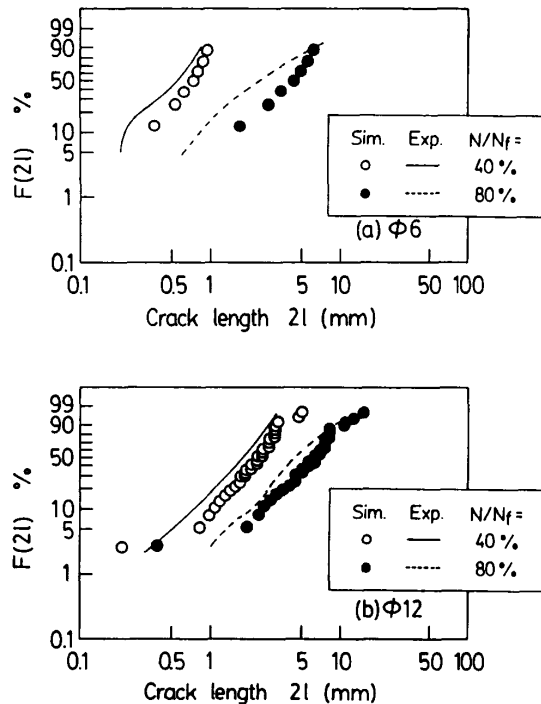


図 10 応力繰返しに伴うき裂長さ分布の変化(シミュレーション)

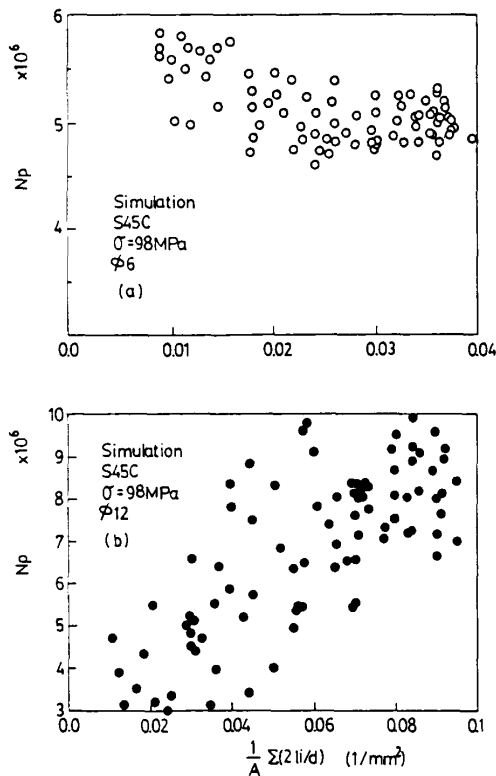


図 11 $N_p - (1/A) \sum(2l_i/d)$ 線図
(シミュレーション)

6. 結 言

$\phi 6$ および $\phi 12$ 材の腐食疲労過程においてき裂発生部に生じる応力の緩和を理論と実験より検討し、これらの応力の緩和を組込んだ腐食疲労過程のコンピュータシミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

(1) き裂発生部の応力の緩和挙動を実験と理論の両側面より検討し、応力の緩和挙動はコンプライアンスの増加を計算することによって評価できることを明らかにした。

(2) $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の腐食疲労過程の応力の緩和現象を実験より検討したところ、寿命の約 30% から応力の緩和が発生し、最終破壊時には $\phi 6$ 材では約 25%、 $\phi 12$ 材は約 50% 程度の応力の緩和が生じ、緩和の程度は $\phi 12$ 材のほうが $\phi 6$ 材よりも大きいことがわかった。

(3) 腐食疲労過程の複数個のき裂発生の確率分布、き裂合体挙動、さらには(1)で述べた応力の緩和を考慮した腐食疲労過程のコンピュータシミュレーションを実施した。シミュレーション結果は $\phi 6$ 材および $\phi 12$ 材の腐食疲労挙動を良く模擬できることを示した。

終わりに本研究にご協力いただいた当時富山大学生、浦野慎一君に謝意を表す。

文 献

- (1) Kitagawa H.,ほか2名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 642 (1978), 98.
- (2) 石原・ほか2名, *機論*, 54-507, A (1988), 1967.
- (3) 石原・ほか2名, *機論*, 55-514, A (1989), 1275.
- (4) Aboudi, J. *Eng. Fract. Mech.*, 26-5 (1987), 637.
- (5) 岡村, *線形破壊力学入門*, (1976), 101, 信風館.
- (6) Murakami, Y., *Stress Intensity Factors Hand Book*, 2 (1987), 657, Pergamon Press.
- (7) Murakami, Y., *Stress Intensity Factors Hand Book*, 1 (1987), 92, Pergamon Press.
- (8) 文献(5)の111ページ.