

コンピュータシミュレーションの援用による 寸法の異なる試験片の腐食疲労寿命評価*

石原 外美*¹, 塩沢 和章*¹
宮尾 嘉寿*¹, 三輪 洋嗣*²

Evaluation of Corrosion Fatigue Lives of Different-sized Specimens Aided by Computer Simulation

Sotomi ISHIHARA, Kazuaki SHIOZAWA,
Kazyu MIYAO and Hiroshi MIWA

Corrosion fatigue behaviors of carbon steel specimens having different diameters were investigated experimentally in a sodium chloride aqueous solution. Based on these experimental observations Monte Carlo simulations of the corrosion fatigue process of different-sized specimens were conducted. The results of the simulations showed a good agreement with the experimental results. At a constant fatigue life ratio N/N_f , there was no specimen size dependence in the distribution of nondimensional crack lengths $F(2l/d)$ and, at constant stress cycles, the distribution of crack lengths $F(2l)$ is nearly constant regardless of the variations of the specimen diameters. Based on the above results, the simple estimation method of corrosion fatigue lives for the different-sized specimens was proposed. The estimated results give a good agreement with the experimental results.

Key Words: Fatigue, Corrosion Fatigue, Size Effect, Computer Simulation, Carbon Steel, Distribution of Crack Lengths

1. 緒 言

既報⁽¹⁾では、2種類(6 mm および 12 mm)の直径の異なる試験片を用いて、腐食疲労過程のき裂発生部における応力の緩和挙動を実験と理論の両側面から検討した。その結果、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。そして、確率的き裂発生挙動、き裂間の合体並びに上述の応力の緩和を考慮した腐食疲労過程のコンピュータ・シミュレーション解析を行ったところ、試験片直径の異なる2種類の試験片 $\phi 6$ および $\phi 12$ 材の腐食疲労挙動をよく模擬できることが明らかとなった。

本報では、既報⁽¹⁾の腐食疲労過程のコンピュータ・シミュレーション法を任意の試験片寸法に対して適用するために、新たに直径 18 mm の試験片($\phi 18$ 材と略記)を用いて腐食疲労実験を行い、腐食疲労寿命並びに腐食疲労過程の分布微視き裂の発生・進展挙動を調査した。次に既報⁽¹⁾の $\phi 6$, $\phi 12$ 材および本報の $\phi 18$ 材の3種類の実験結果を外挿して、任意の試験片寸法に

対するコンピュータ・シミュレーション解析に必要なデータを得た。得られたデータを利用してシミュレーション解析を行った。ついでこれらのシミュレーション解析結果を基にして、任意寸法に対する腐食疲労寿命を予測する方法について検討し、公表されている実験結果と比較検討を行った。

2. シミュレーションを 行うための補足実験

2・1 試験片および実験方法 用いた試験片素材は機械構造用炭素鋼 S 45 C である。納入材を 1 123 K, 1 時間の真空焼なましを行った後、電解研磨し実験に供した。そほ化学成分および機械的性質は既に報告している⁽¹⁾ので記述を省略する。試験片形状および寸法は、図 1 に示す直径 18 mm の丸棒試験片である。

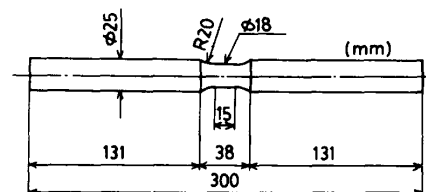


図 1 試験片形状および寸法

* 原稿受付 平成 2 年 4 月 23 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)。

腐食疲労実験は、応力振幅 98 MPa において、3 本の試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行った。その他の実験方法については、既報⁽¹⁾で述べているものと同様なので、ここでは省略する。

2.2 実験結果 図 2 は、φ18 材のき裂進展期間 N_p の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。なお、図中の実線および破線は、各々 φ6 材および φ12 材のき裂進展期間の分布⁽²⁾である。図よりわかるように、φ18 材の N_p は φ6 および φ12 材のそれよりも明らかに長く、φ6 材の約 4 倍、φ12 材の約 1.5 倍程度である。

腐食疲労過程で発生するき裂密度 n/A の変化を次式⁽³⁾で近似した。

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

ここに、 N_i はき裂発生繰返し数であり、 n_0/A および

β はそれぞれ最大き裂密度およびき裂発生速度である。

図 3 は、φ18 材の各試験片ごとの最大き裂密度 n_0/A の分布を示したものである。また、図 4 は φ18 材の各試験片ごとのき裂発生速度 β の分布を示したものである。なお、図中の実線および破線は、各々既報⁽²⁾の φ6 材および φ12 材の n_0/A および β の分布の様子を示している。

図 3 の n_0/A の分布より、試験片寸法が大きくなるにつれ、 n_0/A の値が大きくなっていることがわかる。また、図 4 の β の分布に関しては試験片寸法による明確な差異はないように思われる。

図 5 は、φ18 材の試験片の最終破壊をもたらした主き裂進展線図の一例である。なお、図中の実線および破線は、各々 φ6 材および φ12 材の主き裂進展線図を示したものである。試験片寸法の増加とともに最終破壊の生じるき裂長さが長くなることがわかる。

図 6 は、φ18 材の疲労寿命比 $N/N_f = 0.8$ において発

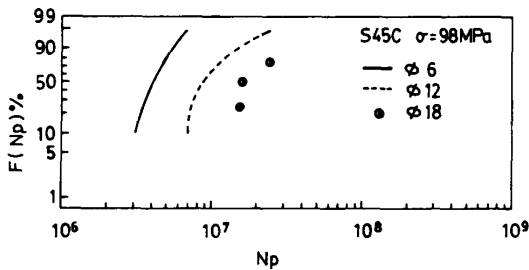


図 2 き裂進展期間 N_p の分布

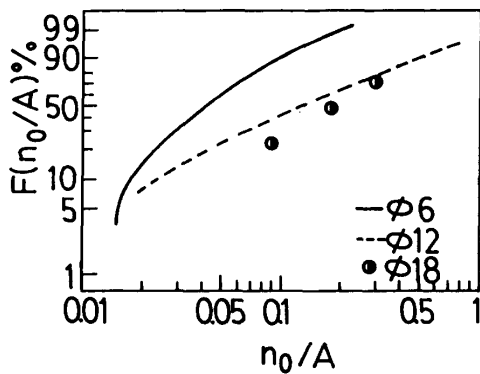


図 3 最大き裂密度 n_0/A の分布

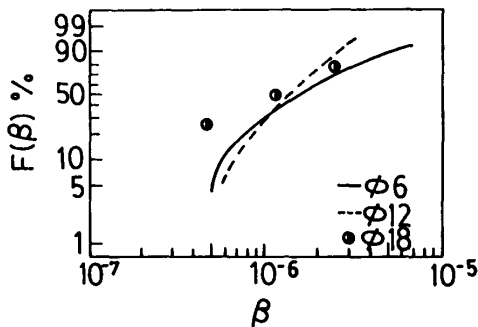


図 4 き裂発生速度 β の分布

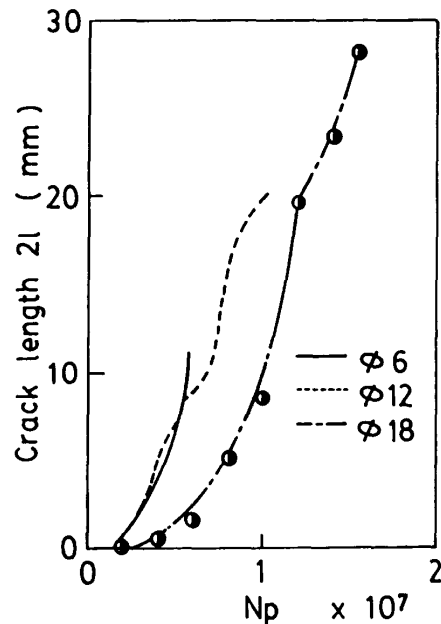


図 5 主き裂進展線図

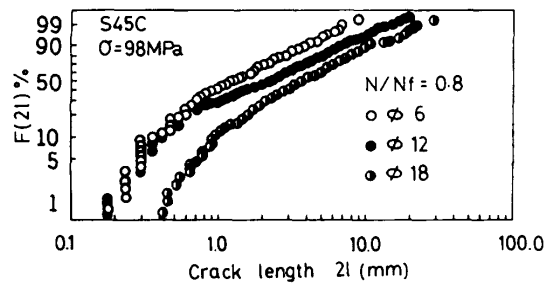


図 6 き裂長さ分布(実験, $N/N_f = 0.8$)

生しているき裂長さ分布を示したものである。なお、図中には、φ6材およびφ12材の疲労寿命比 $N/N_f = 0.8$ のき裂長さ分布も併せて示してある。図よりわかるように、疲労寿命比一定において、試験片寸法の大きくなるほど長いき裂が分布していることがわかる。また、いずれの場合もき裂長さは広く分布している。

図7はき裂長さ $2l$ を試験片直径で除して得られる無次元き裂長さの分布 $F(2l/d)$ を寿命比が0.4と0.8について示した。図よりわかるように、腐食疲労低応力域において、 $N/N_f =$ 一定の条件において、無次元き裂長さの分布にはφ6、φ12およびφ18材による差異が認められず、既報⁽⁴⁾の実験傾向と一致している。

3. φ18材および任意試験片寸法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

3.1 入力データ 既報⁽¹⁾で述べた腐食疲労過程のコンピュータシミュレーションをφ18材に対して実行するにあたって、入力データとして、最大き裂密度 n_0/A およびき裂発生速度 β が必要となる。そこで、図3および4の実験で得られた n_0/A 並びに β の分布を3母数ワイブル分布で近似し⁽²⁾、得られた3母数よりワイブル乱数を発生させ、複数試験片の n_0/A および β 値を変化させた。

表1は、φ18材の n_0/A および β の分布形を表すワイブル3母数、すなわち形状母数 m 、尺度母数 α 、位置母数 γ を示したものである。任意の試験片直径におけるシミュレーションを行うに当たって、 n_0/A に対

する入力データは、既報⁽²⁾のφ6およびφ12材の実験結果並びに本報告のφ18材の実験結果より外挿して求める方法を採用した。すなわち、φ6、φ12およびφ18材の n_0/A の分布形の累積確率が50%になる値を、 n_0/A の代表値として片対数グラフ上にプロットした。結果を図8に示す。図より3個の実験点は片対数グラフ上で直線になり、実験式として次式を得る。

$$n_0/A = 0.146 \ln(d) - 0.22 \dots \dots \dots (2)$$

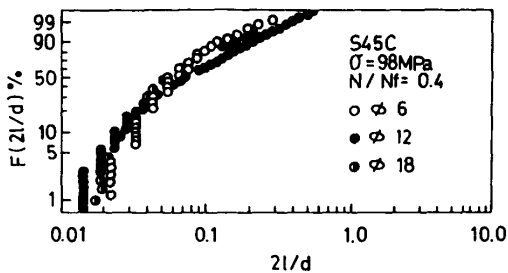
直径が100mm程度までの任意試験片寸法に対する n_0/A の分布の累積確率が50%の値は、上式を用いて求めた。また、 n_0/A の分布のばらつきには、図3にみられるように実験結果に明確な試験片寸法依存性が認められなかったため、任意試験片寸法の n_0/A の分布のばらつき(分布形)はφ12材のそれと同等であると仮定し、ワイブル3母数、すなわち形状母数、位置母数および尺度母数を決定した。

次に、 β の分布形であるが、図4に示すように試験片寸法による差異が明確でないと思われるので、任意試験片寸法の β の分布形としてφ12材の β の分布形で代用した。

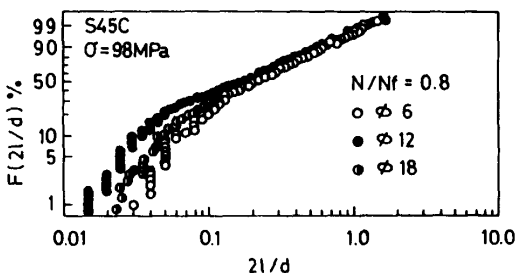
その他の入力データ、すなわちパリズ則における C および m 値、疲労破壊靱性値、き裂進展の下限限界値、初期き裂長さ等は既報⁽¹⁾⁽²⁾に述べたものと同一なのでここでは記述を省略する。

3.2 シミュレーション結果と実験結果との比較

3.2.1 φ18材に対するシミュレーション結果



(a) $N/N_f = 0.4$



(b) $N/N_f = 0.8$

図7 実験で得られた無次元き裂長さ分布

表1 ワイブル3母数(φ18材)

	n_0/A	β
m (Shape)	1.178	0.985
α (Scale)	0.164	2.04×10^{-6}
γ (Location)	0.02	1×10^{-9}

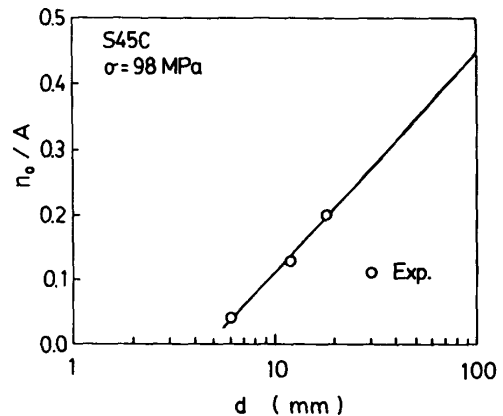


図8 任意寸法における n_0/A (累積確率=50%)の値

図9は、コンピュータシミュレーションによる試験片の最終破壊を引き起こした主き裂の進展線図をφ18材について示したものである。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線図はき裂間の合体现象や、疲労過程での応力の緩和によるき裂進展速度の減速効果をよくシミュレートしていることがわかる。

次に、き裂発生挙動の確率特性を考慮してシミュレーションを複数回実行し、各試行におけるき裂進展期間を縦軸に、横軸に単位面積当たりの無次元き裂長さの総和をとりプロットしたものが図10である。図よりわかるように既報⁽⁴⁾のφ12材の実験結果およびシミュレーションの傾向と同様、 $(1/A)\sum(2l_i/d)$ の増加に伴い N_p の増加する傾向が認められる。

3.2.2 任意直径を有する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結果 既述の方法に

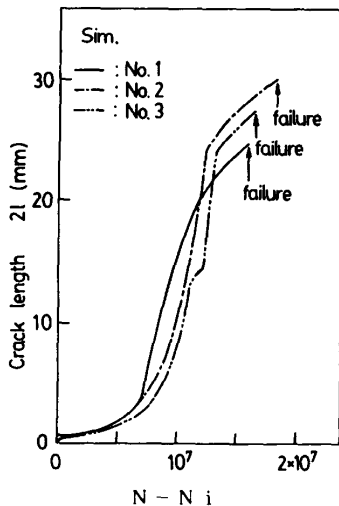


図9 主き裂の進展線図

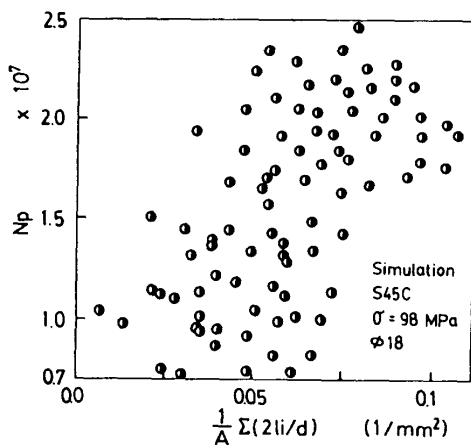


図10 N_p - $(1/A)\sum(2l_i/d)$ 線図
(シミュレーション, φ18)

従ってφ30, φ50, φ70材についての入力データを導き、腐食疲労過程のシミュレーションを行った。

図11は一定の繰返し数 $N=10^7$ におけるき裂長さ分布のシミュレーション結果を、φ12, φ30, φ50およびφ70材に対して示したものである。図中にはφ12およびφ18材の実験結果もそれぞれ破線および一点鎖線で示してある。図より、シミュレーション結果では、繰返し数が一定の条件において、φ12からφ70までの広範囲の試験片寸法の変化によって、き裂長さ分布には明確な変化が認められないことがわかる。このような傾向は図中の実験結果においても認められ、一定の繰返し数において、き裂長さ分布にはφ12およびφ18による差異は認められない。しかし、き裂長さの短い領域において、シミュレーション結果と実験結果に差異が認められ、実験結果はシミュレーション結果よりも短いき裂が多い様相を示している。この原因は十分検討していないが、シミュレーションでは、比較的長い初期き裂長さ(150 μm)を用いているため、き裂長さの短い領域におけるき裂進展速度が実験値よりも大きくなったためと、シミュレーションではき裂発生までの繰返し数を無視しているためと考えられる。

図12は、シミュレーションによる疲労寿命比 $N/N_f=0.4$ および 0.8 における無次元き裂長さ分布 $F(2l/d)$ を、φ6, φ12, φ30, φ50およびφ70の5種類の試験片寸法に対して示したものである。図より、寿命比が一定の条件では、φ6からφ70までの広い試験片寸法範囲で、試験片直径の違いによらず無次元き裂長さ分布は同一の分布を示すことがわかる。図中には既報⁽⁴⁾のφ6およびφ12材の実験結果並びに本報のφ18材の実験結果も併せて示している。実験結果とシミュレーション結果は、(a)図の寿命比 $N/N_f=0.4$ においていくぶん差違が認められるものの、おおむね合致している。

図13は、直径 d の任意寸法の試験片の腐食疲労寿命 N_f と直径 d_0 の基準試験片の腐食疲労寿命 N_{f0} と

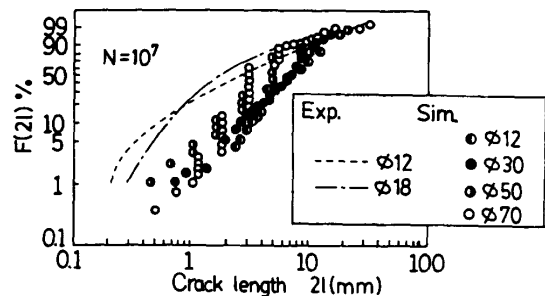


図11 一定の繰返し数($N=10^7$)におけるき裂長さ分布のシミュレーション結果

の比 N_f/N_{f0} を縦軸に、横軸には d/d_0 をとり、シミュレーション結果を整理したものである。ただし、応力振幅は 98 MPa 一定である。図中の○印は、 $\phi 12$ 材を基準試験片として本研究における $\phi 6$, $\phi 12$ および $\phi 18$ 材の実験結果を示したものである。

図よりわかるように、試験片寸法の増加に伴い腐食疲労寿命は増加しており、その変化を表したシミュレーション結果と実験結果とはよく一致していることがわかる。また、試験片寸法が小さい範囲においては、寸法が増加するにつれて疲労寿命が大きく増加するが、寸法が大きくなるとその増加の程度が小さくなっていることがわかる。なお、図中の実線は後述する方法により、コンピュータシミュレーションに依らないで寿命予測した結果を示したものである。

4. コンピュータシミュレーションに依らない任意寸法試験片の腐食疲労寿命予測法

前章までに述べたコンピュータシミュレーションにより、寸法の異なる試験片の腐食疲労寿命はほぼ予測可能であることが明らかとなった。しかし、コンピュータシミュレーションの実行は通常厄介であり、以下ではシミュレーション結果を利用して、任意寸法試験片の腐食疲労寿命を予測する方法について検討する。ただし、最弱リンク説を仮定し、試験片に多数のき

裂が発生しても、主き裂の進展挙動によって腐食疲労寿命が決定されると考える。また、腐食疲労過程では、疲労過程の初期からき裂が発生し全寿命の大半がき裂進展期間で占められるから⁽⁶⁾、腐食疲労寿命の予測に当たっては、き裂発生寿命を無視しても大きな誤差を生じないと考える。

実験結果並びにシミュレーション結果によれば、腐食疲労低応力域において、一定の N/N_f における無次元き裂長さ分布 $F(2l/d)$ には試験片寸法依存性が認められず、また、一定の繰返し数 N において、き裂長さ分布には明確な試験片寸法依存性が認められなかった。以上のき裂長さ分布に関する実験結果並びにシミュレーション結果は、最大き裂長さ(主き裂長さともみなす)についても同様に成立すると考えられるから、一定の繰返し数 N における最大き裂長さには、試験片寸法依存性が現れず、また、試験片の最終破壊 ($N/N_f = 1$) は、 $(2l_c)/d = \text{一定}$ で生じることになる。

図 14 は $\phi 12$ 材の応力振幅 98 MPa における最大き

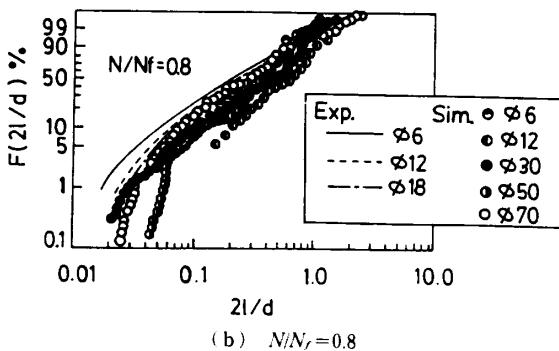
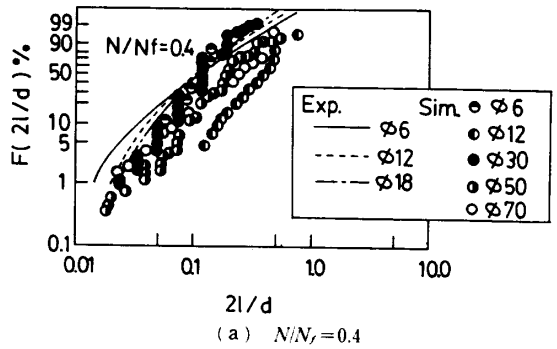


図 12 シミュレーションによる疲労寿命比一定における無次元き裂長さ分布

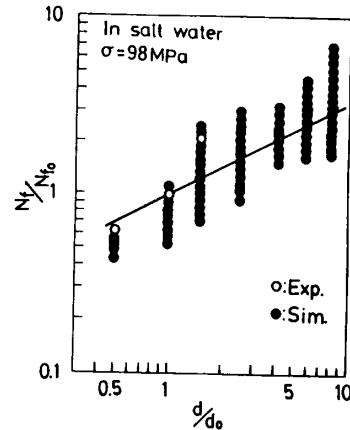


図 13 任意の試験片寸法の腐食疲労寿命のコンピュータシミュレーションによる予測

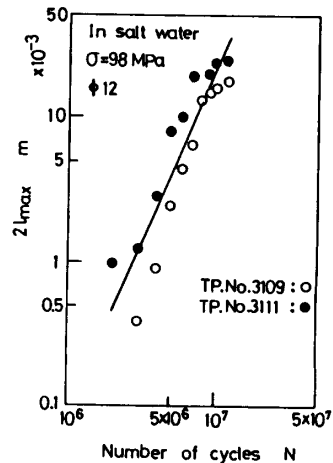


図 14 腐食疲労過程の最大き裂の進展曲線 ($\phi 12$ 材)

表 2 基準試験片 ($\phi 12$ 材) の各定数値 (m 単位)

a	b	(2lc) ₀
6.72×10^{-17}	2.06	15.0×10^{-3}

裂の進展曲線を両対数グラフ上にプロットしたものである。図より、最大き裂の進展挙動は両対数グラフ上でほぼ直線で整理され、次式が成立する。

$$2l_{\max} = aN^b \quad (3)$$

任意直径 d の試験片に対する腐食疲労寿命は、初期き裂長さから最終破壊を引き起こす臨界き裂長さ (d/d_0) $\times (2lc)_0$ まで到達するのに必要な繰返し数を式(3)より求めることによって得られる。そのために必要なデータは、試験片直径 d_0 の基準試験片に対して、式(3)の a および b 値、臨界き裂長さ $(2lc)_0$ をあらかじめ決定しておけばよいことになる。

表 2 は $\phi 12$ 材を基準試験片として上記各値を求めたものである。これらの値を用いて、 $\sigma = 98$ MPa における、任意直径試験片の腐食疲労寿命を求めた。結果を、図 13 に実線で示す。図より寿命予測結果は実験並びにシミュレーション結果とよく一致している。以上の主き裂の進展挙動を複数の応力振幅について調査することにより、腐食疲労低応力域における S-N 曲線を予測できる。

図 15 は破壊繰返し数 $N_f = 10^7$ をパラメータにし、試験片直径の変化に伴う時間強度を予測したものである。縦軸には、任意直径 d の試験片の負荷応力振幅 σ を基準試験片の負荷応力振幅 $\sigma(\phi d_0)$ で無次元化した応力 $\sigma/\sigma(\phi d_0)$ を、横軸には試験片直径 d をとっている。図中には、食塩水中で鋼を用いて得られた星野⁽⁶⁾、Karpenko-Karlashov⁽⁶⁾ および原ら⁽⁷⁾ の実験データも記入してある。図より、実線で示された予測結果は、 d の増加に伴い無次元応力 $\sigma/\sigma(\phi d_0)$ は増加する傾向を示し、これは定量的にも実験データとよく一致することがわかる。

5. 結 言

任意寸法試験片の腐食疲労特性を実験とコンピュータシミュレーションの両者により検討し、以下の結論を得た。

(1) $\phi 18$ 材の腐食疲労実験を行った結果、 $\phi 18$ 材の腐食疲労寿命は既報の $\phi 6$ 、 $\phi 12$ 材よりも増加することがわかった。また、得られた実験結果を用いて $\phi 18$ 材の腐食疲労過程のシミュレーション解析を行っ

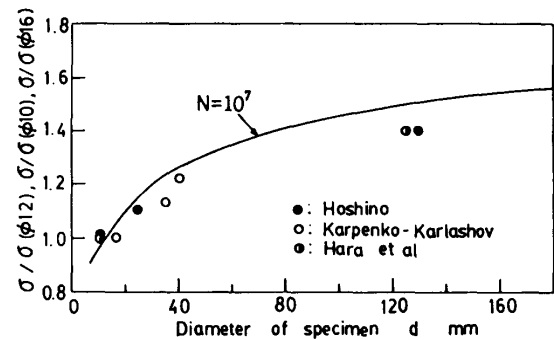


図 15 長寿命域における試験片寸法効果の評価

たところ、実験結果と良く対応する結果を得た。

(2) 腐食疲労過程で発生する最大き裂密度 n_0/A の確率分布の試験寸法依存性を、3種類の試験片寸法、 $\phi 6$ 、 $\phi 12$ および $\phi 18$ 材について調査したところ、分布形には試験片直径によって明確な変化は認められないものの、累積確率 $F(n_0/A) = 0.5$ における n_0/A と試験片直径の間には式(2)の関係が存在する。一方、き裂発生確率 β の分布には明確な試験片寸法依存性が認められなかった。

(3) 任意寸法の試験片に対し、式(2)より、累積確率が50%における n_0/A の値を推定し、 β については試験片寸法依存性のないものとして、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ところ、シミュレーション解析結果の傾向は、実験結果の傾向とよく一致することがわかった。

(4) 腐食疲労低応力域では、一定の疲労寿命比において、無次元き裂長さ分布には試験片寸法依存性の表れないことが、また、一定の繰返し数において、き裂長さ分布に、試験片寸法依存性の表れないことが実験およびシミュレーション解析の両者によって確認された。

(5) (4)で述べた結果を基に、腐食疲労過程の主き裂長さの変化に着目して、寸法の異なる試験片の腐食疲労寿命を予測したところ、従来の公表されている実験傾向とよく合致する結果を得た。

文 献

- (1) 石原・ほか3名, 機論, 57-533, A (1991), 32.
- (2) 石原・ほか2名, 機論, 55-514, A (1989), 1275.
- (3) 石原・ほか2名, 機論, 50-454, A (1984), 1123.
- (4) 石原・ほか2名, 機論, 54-504, A (1988), 1482.
- (5) 石原・ほか3名, 機論, 55-515, A (1989), 1488.
- (6) 金属材料疲れ強さの設計資料II, (1965), 49, 日本機械学会.
- (7) 原・ほか2名, 造船協会論文集, No.107(1960), 341.