

316 ステンレス鋼の大気中疲労き裂発生モデルの検討

Study on fatigue crack initiation model in air for type 316 stainless steel

大阪大学	石澤 輝士	Terushi ISHIZAWA	Member
大阪大学	北田 孝典	Takanori KITADA	Non member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
原子力安全システ ム研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Member

Abstract

The purpose of this study is to generalize P-curve for strain range condition focusing on crack initiation life and crack growth life. The fatigue tests under different constant strain range conditions were conducted in air and the observation of fatigue cracks on specimen surface was also conducted. Using data derived from experiment, dispersion of crack initiation life was quantified by using two-parameter Weibull distribution. Furthermore, the relationship between strain range and shape parameter or scale parameter of crack initiation model is discussed and formulated. On the other hand, dispersion of crack growth rate was quantified by setting up strain intensity factor range section. Furthermore, the validation of P-curve applied crack initiation model was conducted by the simulation of fatigue life. Through these processes, P-curve was generalized for strain range condition.

Keywords: Strain-controlled fatigue test, crack initiation life, crack growth rate, P-curve, two-parameter Weibull distribution

1. はじめに

近年、疲労管理に活用する目的で仮想き裂成長曲線の検討が進められている[1]。仮想き裂成長曲線とは、材料が疲労寿命に至るまでをき裂の発生及び進展の2つの過程に分け、繰り返し数に対するき裂の発生寿命及びき裂の進展寿命を予測する手法であり、疲労評価に導入することにより機器における疲労き裂の成長の状態を明らかにすることが可能となる。また定期点検などの検査結果を疲労評価結果と結び付けるために活用することにより、効率的な保全活動を行うことが期待されている。さらに大気中におけるき裂の発生および進展過程を定量化することにより、疲労寿命に影響を及ぼす環境効果及び多軸軸効果などについても定量的に評価することが可能である。仮想き裂成長曲線を実機の評価に用いるためには、今後評価モデルの妥当性やデータベースの充実が望まれる。

先行研究においては阿部らにより大気中におけるステンレス鋼を対象とした単一の一定ひずみ振幅下におけるき裂成長予測モデル[2]が検討された。この研究では、疲労試験で得られたき裂の成長挙動を基にしたシミュレーション解析を用いて構造材料の破断原因となる主き裂の成長挙動及び疲労寿命が予測できる可能性が示された。

この開発された手法を活用することで、疲労累積(UF)の程度に対応したき裂寸法を明らかにし、実機における疲労損傷リスク評価を行うことが可能となると考えられる。

その後、著者らにより一定ひずみ範囲下における疲労試験結果を用いた複数のひずみ範囲におけるき裂の発生寿命の調査が行われ、き裂発生寿命の分布とひずみ範囲の関係が定式化された。これにより任意の一定ひずみ範囲下におけるき裂の発生寿命分布の推定が可能となった[3]。しかしながら、従来のき裂の進展速度のモデル化では、き裂長さに対して一定区間を設定し区間ごとにばらつきを算出する手法が用いられており、ひずみ範囲に対して一般的に取り扱うことは難しい。疲労寿命の予測精度の向上及び汎用性のある仮想き裂成長曲線構築のためにはき裂発生モデル及び進展モデルの両方においてひずみ範囲に対する一般化が求められる。

本研究では、複数の一定ひずみ範囲下における疲労試験におけるき裂進展速度のばらつきを調査し、き裂発生モデルのみならず、き裂進展モデルについてもひずみ範囲に対して一般化を行うことを検討した。

連絡先:石澤輝士、

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番1号

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

E-mail : t-ishizawa@ne.see.eng.osaka-u.ac.jp

2. 記号説明

- ε : ひずみ (%)
- N : 繰り返し数 (cycle)
- N_i : き裂発生寿命 (cycle)
- N_f : 疲労寿命 (cycle)
- P_{total} : 累積き裂発生確率
- s : 形状パラメータ (2母数ワイブル分布)
- η : 尺度パラメータ (2母数ワイブル分布)
- a : き裂深さ (m)
- R : 試験片半径 (m)
- f : 形状係数
- ΔK_e : ひずみ拡大係数 ($m^{0.5}$)
- da/dN : き裂進展速度 (m/cycle)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Bal.	0.06	0.5	1.3	0.031	0.027	10.18	16.94	2.02

Table 2 Mechanical properties of test material

0.2% proof strength (MPa)	297
Tensile strength (MPa)	611
Young's modulus (GPa)	202.5
Elongation	0.58

3. 実験

3.1 疲労試験

316 ステンレス鋼におけるき裂発生寿命及びき裂進展速度とそれらのばらつきについて調査を行うため、3種類の一定ひずみ範囲下 ($\Delta\varepsilon=1.2\%$, 0.8% , 0.6%) において大気中疲労試験を行った。なお疲労試験中に 500 サイクル ($\Delta\varepsilon=1.2\%$) または 5000 サイクル ($\Delta\varepsilon=0.8\%$, 0.6%) ごとに途中止めを行い、レプリカ法を用いて試験片表面に発生したき裂の発生および進展を追跡した。Table 1 に供試材の組成、Table 2 に機械的性質、Table 3 に試験条件と疲労寿命、Fig. 1 に使用した試験片の形状寸法をそれぞれ示した。

3.2 試験片表面の観察

全ての試験条件において試験片表面に発生したき裂の認識可能な最小の長さは 0.02mm であったことから、き裂の発生時の長さを 0.02mm としそれに至るまでに要した繰り返し数をき裂発生寿命と定義した。試験片表面の観察における観察領域およびその中で観測されたき裂数、 1mm^2 あたりのき裂数を試験条件ごとに Table 2 に示した。ひずみ範囲が小さくなると発生するき裂数が減少していることが確認できる。また Fig. 2 には観察領域内に発生したき裂のうち 5 本を選び、それらの繰り返し数に対する長さの変化を示した。5 本のき裂はき裂発生寿命がばらつきしており、さらにき裂進展速度にもばらつきがみられた。

Fig.3 には試験条件ごとのき裂発生寿命のばらつきを寿命比 (N/N_f) に対するヒストグラムとして示した。ひずみ範囲の増加に伴ってき裂発生数の極大値をとる位置が寿命比の正方向へ遷移していることが確認された。

Table 1 Chemical content of test material (wt%)

Table 3 Test conditions and results

Strain range (%)	1.2	0.8	0.6
Strain ratio	-1		
Interval of middle stop (cycle)	500	5000	
Environmental condition	Air		
Test temperature	RM		
Fatigue life (cycle)	5885	17480	66000

Table 4 Observation conditions and results

Strain range (%)	Number of cracks	Observation area (mm^2)	Density (mm^{-2})
1.2	205	6.0	34.17
0.8	156	18.0	8.67
0.6	30	200.0	0.15

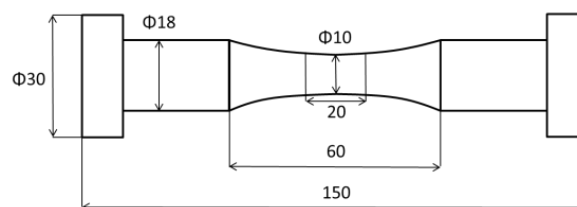


Fig. 1 Geometry of test specimen

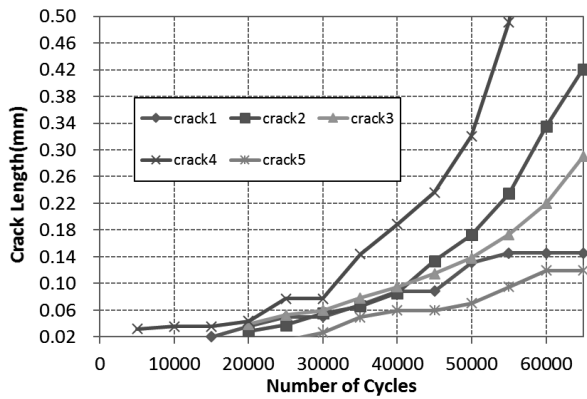


Fig. 2 Dispersion of crack initiation life and crack growth rate ($\Delta\varepsilon=0.6\%$)

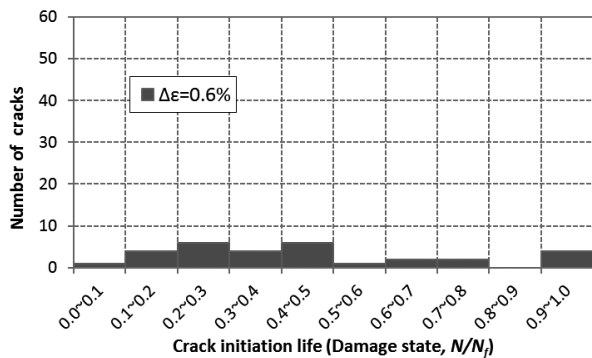
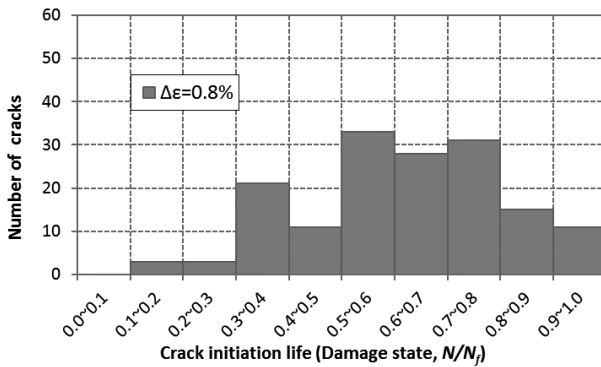
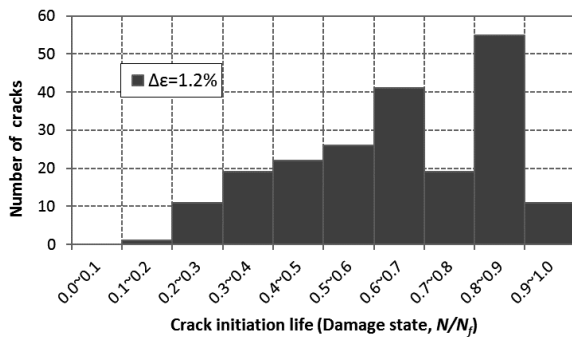


Fig. 3 Histogram of crack initiation life ($\Delta\varepsilon=1.2\%$, 0.8% , 0.6%)

4. き裂発生モデル

4.1 き裂発生寿命のワイブル解析

Fig. 3 に示されたき裂発生寿命の統計的なばらつきをモデル化するため、時間とともに故障率が增加する事象に対して適用性及び応用性の高い 2 母数ワイブル分布を用いる。同分布には s (形状パラメータ) および η (尺度パラメータ) という 2 つのパラメータが存在し、これらを実験データから求める必要がある。このため、ワイブル確率紙を用いてき裂発生寿命のデータをプロットし、最小二乗法によってそれぞれのひずみ範囲における 2 つのパラメータを推定した。得られたパラメータをそれぞれ Table 5 に示した。

Table 5 Two parameters of Weibull distribution

Strain range (%)	s	η
1.20	3.30	4227
0.80	3.48	12050
0.60	1.75	33922

4.2 き裂発生モデルの妥当性

ワイブル解析で得られたパラメータに基づく確率分布関数が実験値を模擬できていることを確認するため、算出した確率分布関数と実験値におけるき裂発生の累積確率の比較を行う。2 母数ワイブル分布における確率分布関数は Eq. (1) に示す。

実験値から 500 サイクルごとに観測されたき裂数を最後のレプリカ採取時点のき裂総数で規格化することで累積発生確率 P_{total} が得られる。これを Eq. (1) と比較した結果を Fig. 4 に示すが、Eq. (1) に示す確率分布関数は、どのひずみ範囲においても実験値とよい一致を示していることが確認された。

$$F_{2pwei}(N, s, \gamma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\eta}\right)^s\right] \quad (1)$$

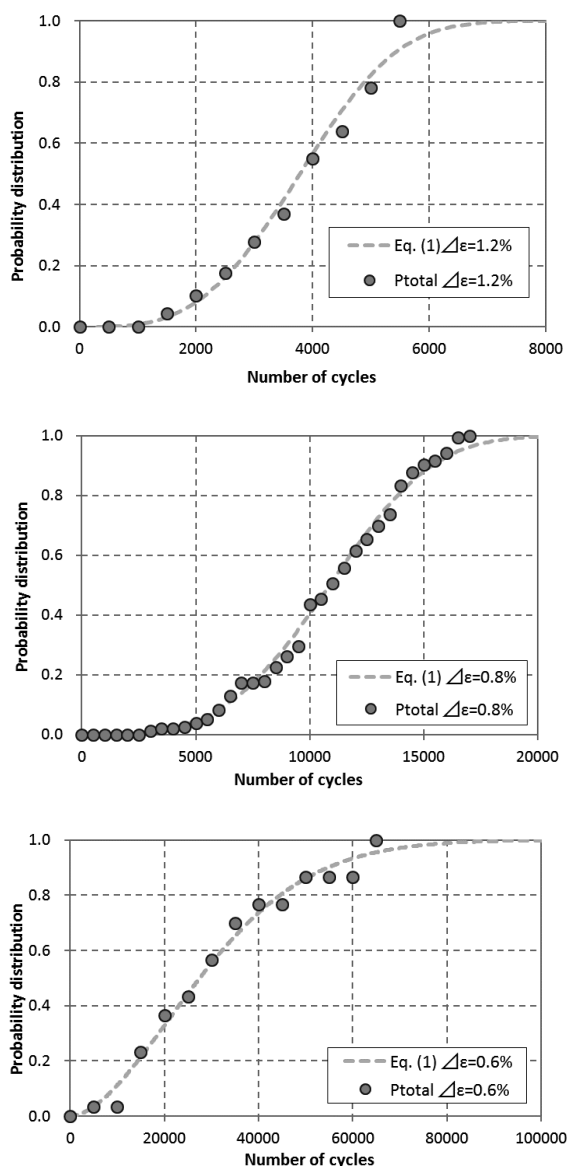


Fig. 4 Comparison of accumulative crack initiation probability between Weibull approximation (Eq. (1)) and experimental results (P_{total})

4.3 ひずみ範囲に対する一般化

仮想き裂成長曲線を任意のひずみ範囲に適用し疲労寿命のばらつきを推定するためには、き裂発生モデル及びき裂進展モデルの構成要素をひずみ範囲について整理する必要がある。ここではき裂発生モデルの一般化を行うため、実験値から得られた3種類のひずみ範囲($\Delta\epsilon=1.2\%$, 0.8% , 0.6%)におけるき裂発生寿命の分布の特性から任意のひずみ範囲に対するき裂発生寿命のばらつきの推定を試みた。3種類のひずみ範囲($\Delta\epsilon=1.2\%$, 0.8% , 0.6%)におけるき裂発生モデルは2母数ワイブル分布における s, η の2つのパラメータによって決定づけられる。これらのパラ

メータとひずみ範囲との相関を整理することで、任意の大きさのひずみ範囲に対するき裂発生寿命のばらつきを推定できると考えられる。ここで2つのパラメータのひずみ範囲の変化に対する傾向を捉えるため、Eq. (2)に示す確率密度関数を用いる。パラメータを用いて求めた確率密度関数をFig. 5に示す。一般に s は確率密度関数における極大値の幅の広がり、 η は極大値の位置を決定づけることとされている。Fig. 5ではひずみ範囲が小さくなるほど、極大値の幅が広がり極大値を示す位置の繰り返し数の値が大きくなることを確認できる。

ひずみ範囲とパラメータの関係に対し疲労限について考慮することを試みた。一般に疲労限ではき裂が発生しないため、確率密度関数は $f(N)=0$ であると考えられる。このとき、確率密度関数に極大値は存在しないため、 s は $s=0$ に漸近し、 η は発散すると考えられる。なお疲労限はひずみ範囲 $\Delta\epsilon=0.4\%$ と仮定した。

以上の条件を考慮し、Table 5の値を用いて s および η とひずみ範囲の関係を指数関数によって近似しEq. (3), (4)に示した。また、実験値の関係はFig. 6で示され、近似式に対して実験値がばらついていることが確認できる。近似によって求めた値で実験値の確率分布を再現できているかを確認するため、それぞれのひずみ範囲で比較を行った。Fig. 7に近似パラメータによる確率分布関数と実験値における累積き裂発生確率 P_{total} の比較を行った結果を示すが、近似値は実験値とよい一致を示している。以上より、Eq. (3), (4)を用いることで疲労限 $\Delta\epsilon=0.4\%$ より大きな任意のひずみ範囲におけるき裂発生寿命の分布形状を推定することが可能となる。さらに、同様に一般化したき裂進展モデルとの組み合わせることで疲労寿命を推定することが可能となる。

$$f_{2pwei}(N, s, \eta) = \left(\frac{N}{\eta}\right)^{s-1} \cdot \frac{s}{\eta} \cdot \exp\left[-\left(\frac{N}{\eta}\right)^s\right] \quad (2)$$

$$s = 4.135 \times (\Delta\epsilon - 0.4)^{0.4583} \quad (3)$$

$$\eta = 3.029 \times 10^3 (\Delta\epsilon - 0.4)^{-1.502} \quad (4)$$

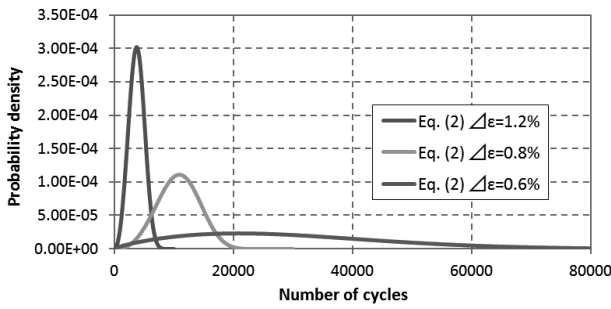


Fig. 5 Probability density function of crack initiation life

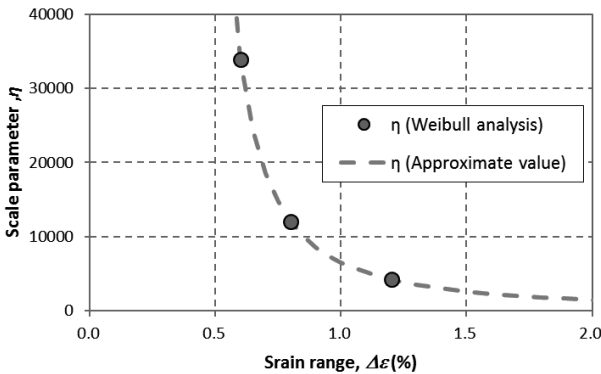
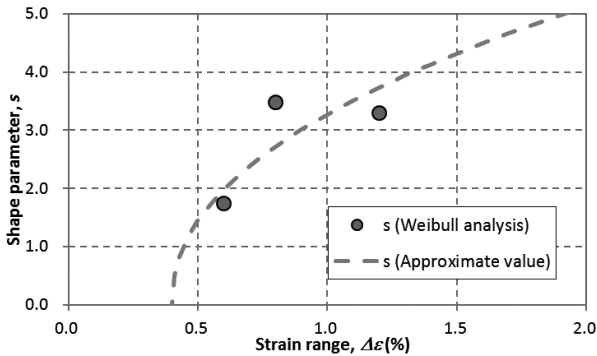


Fig. 6 Relationship between two parameters and strain range

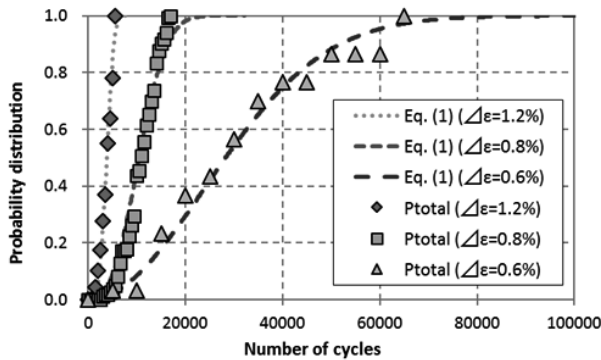


Fig. 7 Comparison of accumulative crack initiation probability between Eq. (1) and experimental results (Ptotal)

5. き裂進展モデル

5.1 き裂進展速度の定量化

疲労試験の途中止め観察により得られた各ステップでのき裂長さから表面方向のき裂進展速度を求め、き裂アスペクト比(き裂深さ/き裂長さ)を0.5と仮定して深さ方向のき裂進展速度を推定した。推定したき裂進展速度について近似式を作成するため、Eq. (5), (6)で定義されるひずみ拡大係数との関係を用いて整理し Fig. 8 に示した。ひずみ拡大係数はひずみ範囲と形状係数、き裂深さからなるパラメータであり、釜谷ら[4][5]によってき裂進展速度と相関があることが示されている。

Fig. 8 に示す実験で得られたひずみ拡大係数とき裂進展速度の関係を最小二乗近似によって定式化を行い、Eq. (7) に示す。ひずみ拡大係数の値が $9.0 \times 10^{-5} m^{0.5}$ 以下の領域ではき裂進展速度の近似式からのばらつきが大きく収束に向けて変化している。一方で、値が $8.0 \times 10^{-5} m^{0.5}$ 以上の領域におけるき裂進展速度のばらつきは比較的小さく、ばらつきの変化が少ない。

$$f = 0.8379 \left(\frac{a}{R}\right)^3 - 0.6486 \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (5)$$

$$+ 0.4128 \left(\frac{a}{R}\right) + 0.6103$$

$$\Delta K_\varepsilon = f \Delta \varepsilon \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = 5.30 \times 10^2 (\Delta K_\varepsilon)^{2.55} \quad (7)$$

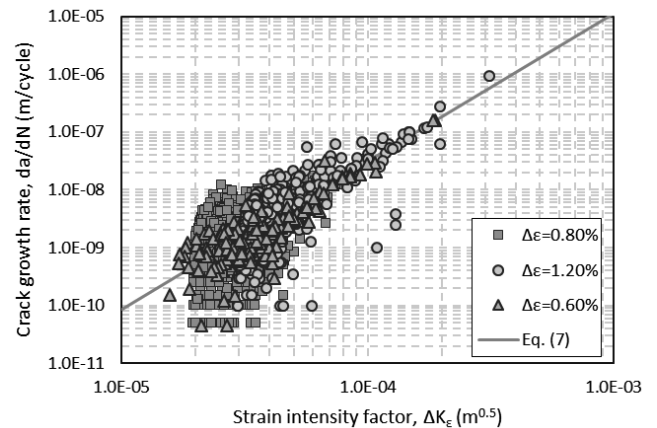


Fig. 8 Relationship between crack growth rate and strain intensity factor

5.2 ひずみ範囲に対する一般化

き裂進展速度のばらつきを定量化するために、先行研究[2][3]ではき裂長さに対して区間を設定し、それぞれの区間内におけるき裂進展速度のばらつきを定量化する手法の有効性が示された。しかしながらき裂進展モデルの一般化のためにはひずみ範囲の変化について考慮し、ひずみ範囲を式中含むパラメータに対して区間を設定する必要がある。そこで本研究ではき裂進展速度のばらつきを定量化するため、ひずみ拡大係数の値に対して区間を設定し、それぞれの区間内におけるき裂進展速度のばらつきを定量化し、供試材における一般的なひずみ範囲におけるき裂進展速度のばらつきとして取り扱った。

ひずみ拡大係数の値に対する区間は $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{0.5}$ から $9.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{0.5}$ まで $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{0.5}$ ごとに分け、合計で 8 区間を設定した。また区間内におけるき裂進展速度の分布を確認するため、Fig. 9 に示す対数正規確率紙に区間内の進展速度をプロットした。き裂進展速度が対数正規確率紙において線形性を示すことから各区間におけるき裂進展速度の分布は対数正規分布に従うと推定した。Table 6 に示す通り各区間に進展速度のばらつきに対して対数標準偏差を用いて整理した。この表からひずみ拡大係数の値が増加するとき裂進展速度のばらつきは減少することが確認できる。

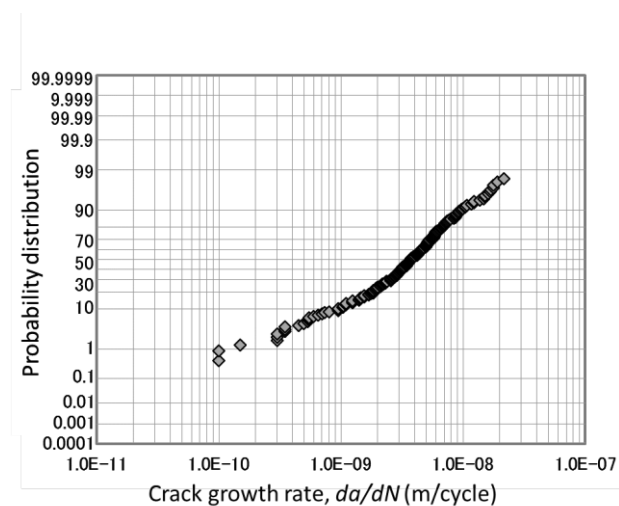


Fig. 9 Distribution of crack growth rate

Table 6 Crack growth rate and its dispersion in each strain intensity factor section

Strain intensity factor $\times 10^5 \text{ (m}^{0.5}\text{)}$	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0
Average of crack growth rate $\times 10^9 \text{ (m/cycle)}$	0.404	1.165	1.819	3.270
Logarithmic standard deviation	0.484	0.478	0.415	0.418

5.0~6.0	6.0~7.0	7.0~8.0	8.0~9.0	9.0~
5.777	10.008	18.901	19.119	-
0.369	0.251	0.226	0.114	0.114

6. 仮想き裂成長曲線の作成

6.1 計算条件

き裂発生モデル及びき裂進展モデルの両方を適用した仮想き裂成長曲線の妥当性を確認するために、両モデルを用いたモンテカルロ・シミュレーションによって疲労寿命のばらつきを求め、実験値との比較を行った。疲労寿命の比較は実験で行った 3 種類の試験条件と同様の条件で行った。シミュレーションのアルゴリズムを Fig. 10 に示す。Fig. 1 より試験片平滑部の面積がおよそ $30 \times 20 \text{ mm}^2$ であり、Table 4 に示したき裂密度からその平面上に発生するき裂数を推定することができる。

き裂発生寿命のばらつきは以下のように考慮した。まず一様乱数に従う乱数をき裂発生数分だけ発生させた。そして式 Eq. (1) に示した確率分布関数に従う乱数に変換し、得られた値をそれぞれのき裂発生寿命として入力した。なおき裂の発生長さは実験時と同様に 0.02 mm とした。

き裂の進展計算には Table 6 に示した値を用いた。ひずみ拡大係数 $9.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{0.5}$ 以上のき裂に対してはばらつき幅の変化が少ないことから一定のばらつき幅を考慮した。Fig. 11 にシミュレーション上で与えたばらつき幅と実験値の関係について示すが、どの区間においてもばらつき幅は妥当であると考えられる。

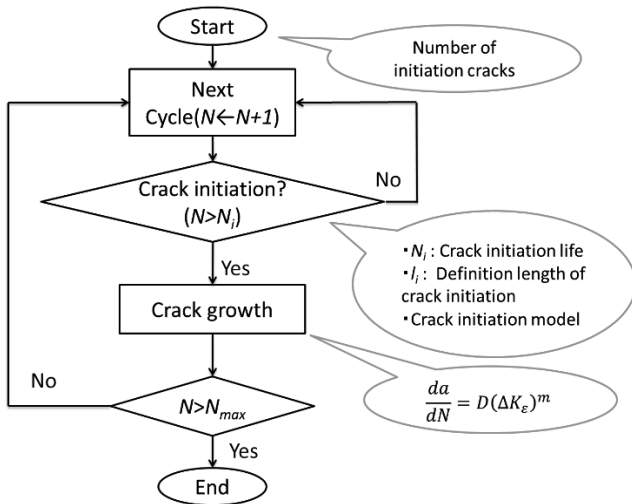


Fig. 10 Algorithm of crack growth simulation

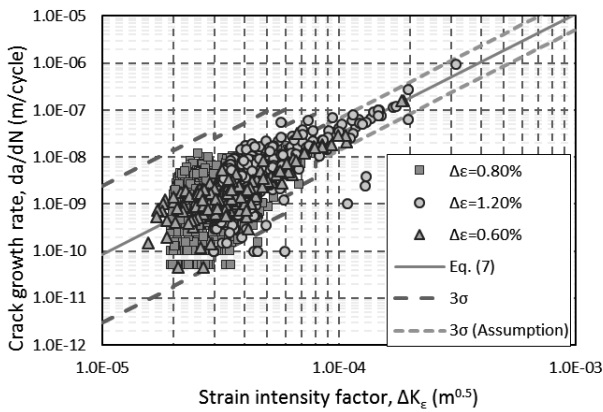


Fig. 11 Dispersion of crack growth rate

6.2 計算結果

前項の条件に従ってモンテカルロ・シミュレーションを実行し、試験片 100 本分に相当するき裂成長曲線を得た。得られたき裂成長曲線のうち、疲労寿命が最小及び最大であった曲線をひずみ範囲ごとに Fig. 12 に示す。さらに同条件の疲労試験から得られた疲労寿命の試験結果を比較のために示す。シミュレーションで得られた疲労寿命の平均値及びばらつきの幅は試験結果とよい一致を示した。

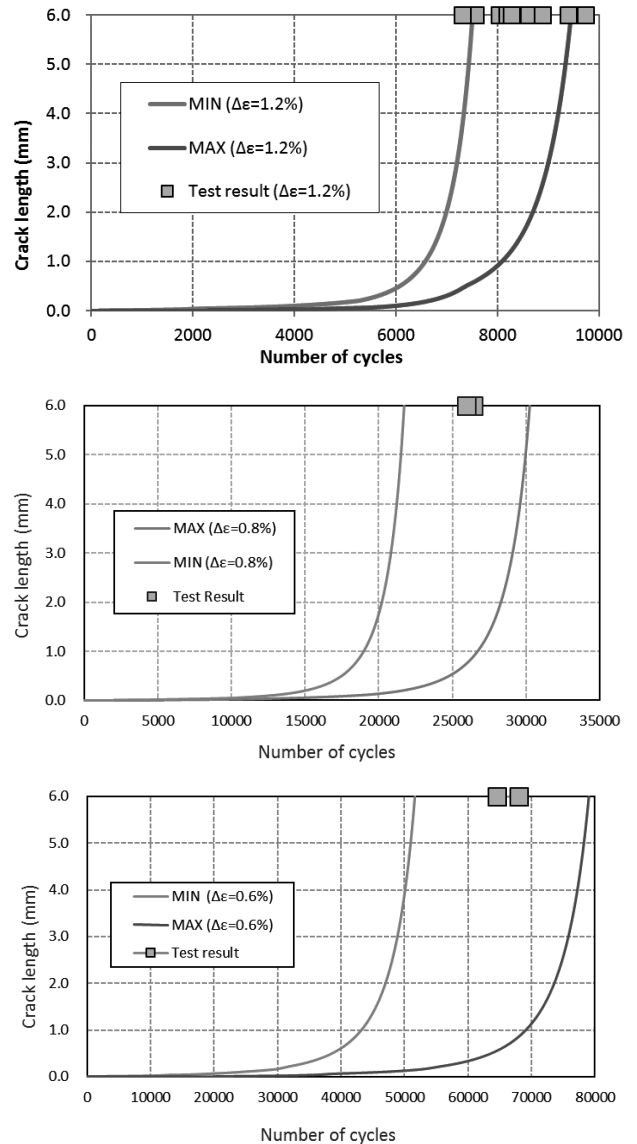


Fig. 12 Crack growth curve ($\Delta\epsilon=1.2\%$, 0.8% , 0.6%)

7. 結論

本研究における結論を以下に示す。

- 3 種類のひずみ範囲における疲労試験及び試験片の表面観察を行うことで、微小き裂の発生寿命と進展速度が大きくばらついていることが確認された。
- き裂の発生寿命のばらつきに対して 2 母数ワイブル分布を適用することで定量化を行うことができた。
- き裂発生モデルに用いた 2 つのパラメータとひずみ範囲の関係を定式化し、任意のひずみ範囲に対するき裂発生モデルの適用を試みた。疲労限を $\Delta\epsilon=0.4\%$ として考慮することで疲労限より大きな任意のひずみ範囲においてき裂発生寿命のばらつきを推定できることが示された。
- 3 種類のひずみ範囲の実験結果をひずみ拡大係数の

値に対して区間を設定し、区間内のき裂進展速度のばらつきを定量化することで任意のひずみ範囲におけるき裂進展速度とそのばらつきを推定するき裂進展モデルを構築した。

- き裂発生モデルおよびき裂進展モデルを適用したモンテカルロシミュレーションによって求めた試験片100本分の疲労寿命の平均値及びばらつきは疲労試験結果とよい一致を示した。

参考文献

- [1] Kamaya, M. and Nakamura, T., 2015, “Fatigue damage management based on postulated crack growth curve”, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 7-1, pp.43-49.
- [2] Abe, S., and Nakamura, T., 2014, “Statistical model of micro crack accumulated fatigue in NPPS”, proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28603.
- [3] Ishizawa, T. and Nakamura T., Kitada, T, 2016, “Fatigue crack initiation model of type 316 stainless steel”, proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63477.
- [4] Kamaya, M. and Kawakubo, M., 2012, “Strain-based modeling of fatigue crack growth – An experimental approach for stainless steel”, International Journal of Fatigue, Vol. 44, pp.131-140.
- [5] M. Kamaya, “Environmental effect on fatigue strength of stainless steel in PWR primary water – Role of crack growth acceleration in fatigue life reduction”, International Journal of Fatigue, Vol. 55, (2013) pp. 102-111.

