

# 低サイクル疲労におけるき裂成長予測方法

## Crack Growth Prediction for Low-Cycle Fatigue Regime

釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya) \*1

**要約** 本報では、低サイクル疲労に対応する比較的大きな繰返し荷重に対して、き裂成長を予測する手順を示した。最初に、室温大気中における316ステンレス鋼を用いた疲労き裂成長試験をレビューした。き裂成長速度は、応力拡大係数の定義式において応力範囲の代わりにひずみ範囲を用いた等価応力拡大係数とよい相関を有することが示された。さらに、有効ひずみ範囲を用いて定義される有効等価応力拡大係数は、異なる試験片形状や、低サイクル疲労や高サイクル疲労などの様々な荷重条件において得られた成長速度と良い相関を示した。試験結果を最適近似した予測式は、日本機械学会の維持規格で規定されている成長速度式とほぼ一致することが確認された。これらの結果をもとに、低サイクル疲労に対応する繰返し荷重下における疲労き裂成長を予測するための手順を示した。機械学会維持規格の成長速度式は、いわゆる小規模降伏状態（高サイクル疲労）を対象にしているが、そこで用いられている材料定数は、低サイクル疲労の成長予測にそのまま用いることができる。

**キーワード** 低サイクル疲労, ステンレス鋼, き裂成長予測, 疲労損傷係数, 維持規格

**Abstract** The objective of this study is to show a crack growth prediction procedure for the low-cycle fatigue regime. First, fatigue crack growth tests using Type 316 stainless steel specimens at room temperature were reviewed. It was seen that the crack growth rates correlated well with the equivalent stress intensify factor, which was derived using strain range instead of stress range. Furthermore, the effective equivalent stress intensify factor derived using the effective strain range exhibited excellent correlation with the crack growth rates obtained under various specimen geometries and loading conditions including high and low-cycle regimens. The obtained crack growth rates were also compared with the growth rate prescribed in the fitness-for-service code of the Japan Society of Mechanical Engineers(JSME). The test results agreed with the growth rate of JSME code. Finally, the procedure for predicting the low-cycle fatigue crack growth was shown. Although the JSME code is aimed at predicting fatigue crack growth for the so-called small scale yielding condition (high-cycle fatigue regime), the material constants determined for the high-cycle fatigue regime can be used even for the low-cycle fatigue regime.

**Keywords** Low-Cycle Fatigue, Stainless Steel, Crack Growth Prediction, Usage Factor, Fitness-for-Service

## 1. 緒言

原子力発電プラント機器は、疲労による劣化が生じることを前提に設計される。具体的には、起動停止の際に発生する熱応力などに対して、疲労が蓄積することを許容し、繰返し数が許容値を超えないように考慮される。また、運転開始後の保全の段階においては実績の繰返し数が、設計時の想定を上回っていないことが確認される。

疲労劣化の程度を表す指標として、繰返し数を許

容繰返し数で正規化した累積疲労損傷量UF (Usage Factor) が用いられている。機器設計においては、 $UF < 1$ であることが求められ、たとえ $UF = 0.99$ であっても問題はない。これに対し、劣化状態が着目される保全においては、UFが1に近づくにしたがって、疲労劣化が進んでいると判断される。したがって、UFが1未満であっても、その大きさが問題となる場合もある。一方、UFが1を超えたとしても直ちに機器に問題が生じるとは限らない。そもそもUFで代表される疲労損傷の物理的な意味につ

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

いて、統一的な認識はない。例えば、UFが増加するにともなって材料内部でどのような変化が生じるのか、また、UFが0.5と1.0ではどのような違いがあるのか、などの疑問に対する回答は見当たらない。これに対し、著者らは疲労劣化をき裂寸法に置き換えて疲労劣化を定量化する方法を提案してきた<sup>(1)-(3)</sup>。この方法では、検査などで発見されたき裂寸法から劣化量や余寿命を推定することが可能となる。また、き裂が発見されなかった場合でも、適用した検査のき裂検出能力から劣化の最大値を推定できる。

疲労劣化量とき裂寸法の関係はき裂成長予測によって求められる。実機で想定される疲労劣化は、いわゆる低サイクル疲労であることから、弾性力学指標である応力拡大係数を用いることは厳密にはできない。この問題に対し、著者らは応力拡大係数の定義式において応力項をひずみで置き換えたひずみ拡大係数(2.4節の(2)式で定義される)を、低サイクル疲労を含むき裂成長予測に適用してきた<sup>(4),(5)</sup>。そして、低サイクル疲労き裂成長速度が、ひずみ拡大係数<sup>(4)</sup>、またはひずみ拡大係数にヤング率をかけた等価応力拡大係数<sup>(1)</sup>とよい相関を有することを示してきた。ひずみ拡大係数によるき裂成長予測では、ひずみ範囲がき裂成長駆動力となっており、ひずみ拡大係数が同じであれば、き裂成長速度は、応力や試験温度に依存しないことになる。日本機械学会発電用設備規格維持規格<sup>(6)</sup>(以後、維持規格)においても、疲労によるき裂成長予測手順が規定されているが、そこでは応力拡大係数を用いられており、き裂成長速度が応力や温度によって変化する。疲労設計で対象となる部位と荷重の大きさは、維持規格と同じであることから、低サイクル疲労を対象としたひずみ拡大係数によるき裂成長予測と、維持規格における応力拡大係数による予測の関係を矛盾なく説明できることが望ましい。

本研究では、著者らがこれまで316ステンレス鋼を用いて取得した室温大気中での低サイクル疲労き裂成長速度をレビューした。そして、き裂成長速度がひずみ拡大係数(等価応力拡大係数)と相関を有することを示すとともに、有効ひずみ範囲を用いた有効応力拡大係数(有効等価応力拡大係数)を用いることの妥当性を示した。そして、維持規格で規定されているき裂成長予測式との対応を調べ、応力拡大係数を用いることを前提としている維持規格の成長予測方法を低サイクル疲労に適用するための方策

Table 1 Chemical content of test material (mass %).

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

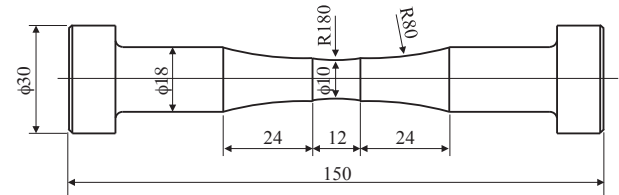


Fig. 1 Geometry of round-bar test specimen (unit: mm).

を検討した。

## 2. 低サイクル疲労におけるき裂成長速度

### 2.1 概要

過去に著者らによって実施された316ステンレス鋼を用いた疲労試験の結果<sup>(3)-(5),(7)</sup>をレビューした。全て同一ヒートの材料を用いており、その化学成分をTable 1に示す。2本の引張試験片より同定された室温における0.2%耐力、引張強さ、伸び、およびヤング率の平均はそれぞれ297 MPa, 611 MPa, 0.85, および202,500 MPaであった。

### 2.2 丸棒試験(レプリカ試験)<sup>(3)-(5)</sup>

Fig.1に示す直径10 mmの丸棒試験片を用いて試験片表面に発生するき裂の発生と成長挙動を観察した。試験はひずみ速度0.4%/sの試験速度において、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を0.6%, 1.2%および2.0%に制御して実施した。試験を中断しながら試験片表面を、アセチルセルロースフィルムを用いたレプリカ転写によって観察した。そして、試験片の破断を引き起こした主き裂の長さ $a$ と繰返し数 $N$ の関係が同定された。試験片が破断した時点の繰返し数である疲労寿命 $N_f$ は、 $\Delta\varepsilon = 0.6\%$ , 1.2%および2.0%の条件においてそれぞれ41,500回, 5,937回および1,495回であった。

Fig.2に正規化繰返し数 $N/N_f$ と、主き裂の荷重方向垂直面への投影長さの関係を示す。主き裂が最初に確認された繰返し数は、 $\Delta\varepsilon = 0.6, 1.2$ および2.0%に対してそれぞれ $N/N_f = 0.096, 0.085$ および0.478であった。また、そのときのき裂長さはそれぞれ12.5,

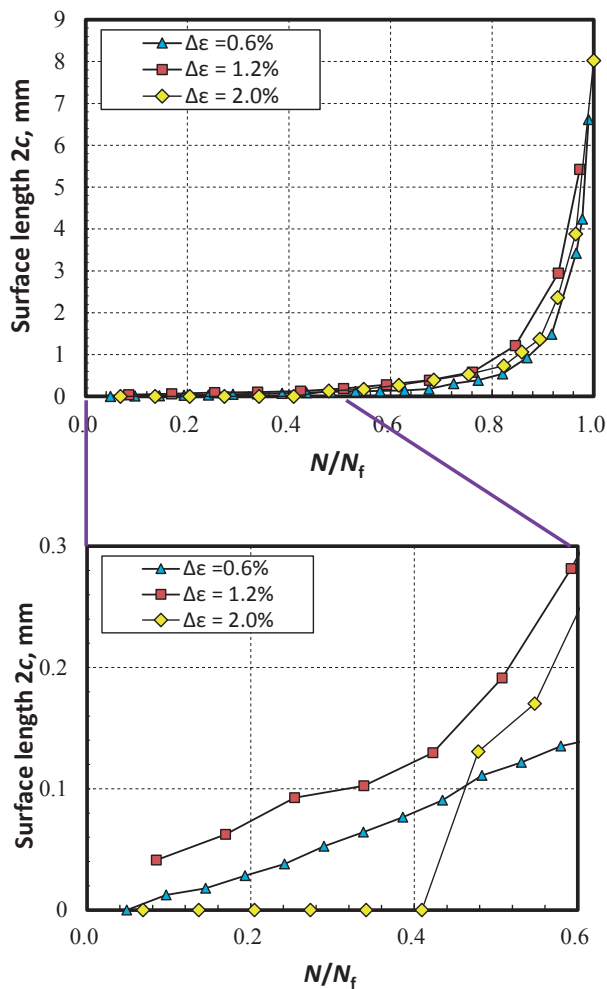


Fig. 2 Change in crack length on the surface obtained by replica specimens during low-cycle fatigue tests.

41.2および130.6  $\mu\text{m}$ であった。主き裂は発生後連続的に成長し、き裂同士の合体も見られなかった。 $\Delta\epsilon = 2.0\%$ の試験では、比較的大きな塑性ひずみによって試験片表面の凹凸が顕著になり、小さなき裂の発生を見分けることが困難であった。一般的に、ひずみ範囲が小さいほど潜伏期間が長くなり、疲労限度以下では潜伏期間は無限大となる。 $\Delta\epsilon = 0.6$ と1.2%の試験では潜伏期間が $N/N_f$ で0.1以下となっており $\Delta\epsilon = 2.0\%$ の試験も数十マイクロメートルの微小なき裂が発生するまでの潜伏期間は $0.1N_f$ より小さいと推測される。以上より、数十マイクロメートルの長さのき裂の出現をき裂発生と定義すれば、き裂発生までの潜伏期間は相対的に短い。つまり、疲労試験の間、き裂寸法は連続的に変化しており、疲労劣化の程度はき裂寸法によって定量化できることになる。

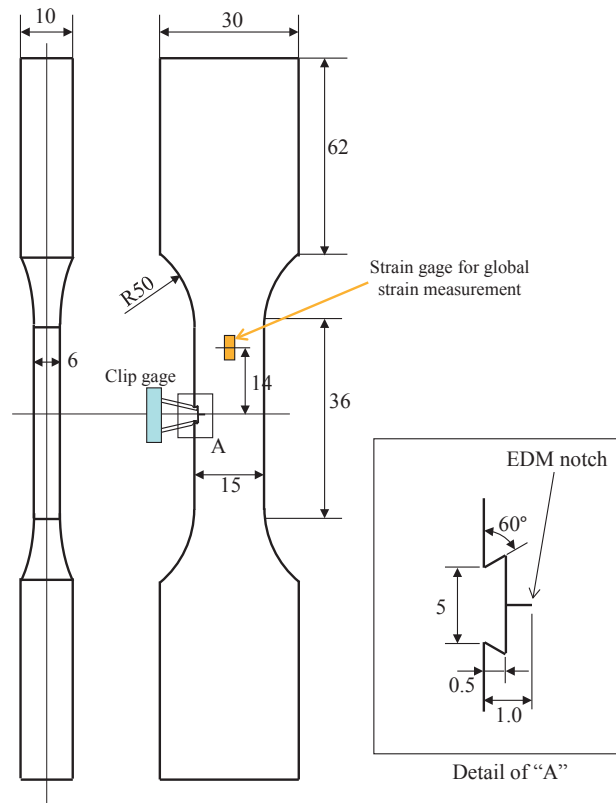


Fig. 3 Geometry of plate test specimen (unit: mm).

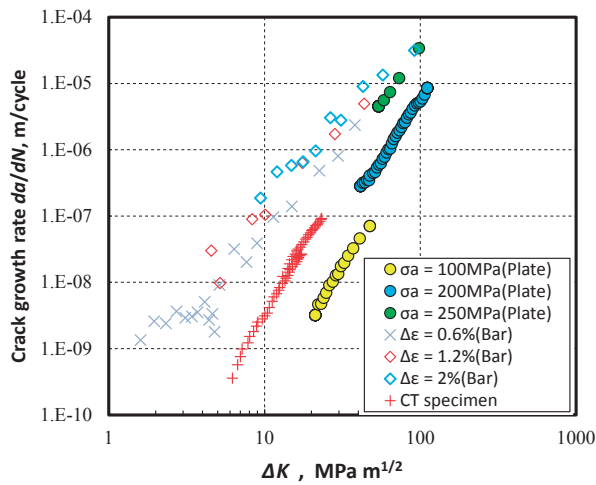
### 2.3 平板試験<sup>(7)</sup>

Fig.3に示す平板型の試験片を用いてき裂成長試験を実施した。放電加工により長さ1 mmの切欠きを導入し、クリップゲージの出力を用いた除荷弾性コンプライアンス法によりき裂長さを計測した<sup>(7)</sup>。平行部を有する平板試験片を用いることで、ひずみ拡大係数の算出に必要な公称ひずみを測定することが可能となる。公称ひずみを測定するため、き裂断面から荷重方向に14 mm離れた位置にひずみゲージを取り付けた。

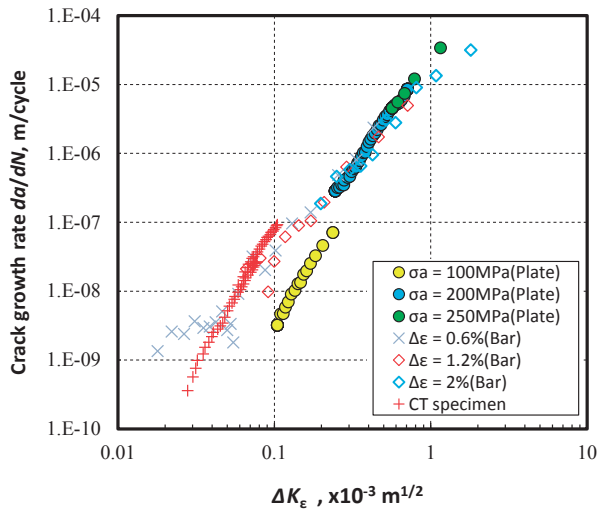
応力振幅  $\sigma_a$  を100, 200および250 MPaとして、両振りの荷重制御にて試験を実施した。き裂長さが2 mmに到達後、6 mmまで成長するまでの区間でき裂成長速度を取得した。

### 2.4 き裂成長速度の整理

丸棒試験と平板試験によって得られたき裂成長速度  $da/dN$  をFig.4に示す。丸棒試験におけるき裂成長速度はFig. 2の各線分の傾きから算出した。破断面観察結果<sup>(8)</sup>より、アスペクト比(深さ/表面長さ)を0.5と仮定して深さ方向の速度を算出した。参照



(a) Stress intensity factor range ( $\Delta K$ )



(b) Strain intensity factor range ( $\Delta K_\epsilon$ )

Fig. 4 Relationship between crack growth rate and stress or strain intensity factor range.

のため、同じ材料を用いて破壊力学試験片 (CT 試験片) を用いて取得された小規模降伏下でのき裂成長速度も示す<sup>(4)</sup>。横軸のき裂成長駆動力として、次式で定義される応力拡大係数範囲  $\Delta K$  または、ひずみ拡大係数範囲  $\Delta K_\epsilon$  を用いた。

$$\Delta K = f \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$\Delta K_\epsilon = f \Delta \epsilon \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここで、 $a$  はき裂深さ (平板試験の場合はき裂長さ)、 $f$  は応力拡大係数で用いられる形状係数<sup>(5),(8)</sup> を示す。

$\Delta K$  で整理した Fig.4(a) では、成長速度のばらつきが大きくなっている。一般に、塑性ひずみが大きくなると、 $\Delta K$  に対する成長速度が速くなる。そのため、繰返し塑性ひずみの大きい丸棒試験の成長速

度が相対的に速くなったと考えられる。一方、平板を用いた  $\sigma_a = 100$  MPa の試験、および CT 試験片を用いた試験では、成長速度がばらつきの下限近傍となっている。これらの試験では、塑性ひずみの発生は限定的であったと考えられる。

Fig.4(b) に示した  $\Delta K_\epsilon$  とき裂成長速度の相関は、 $\Delta K$  に対するものよりも良くなった。とくに、塑性ひずみが顕著であった丸棒試験の結果が 1 本の線上にはほぼ収束した。このように、 $\Delta K_\epsilon$  を用いることで、荷重の大きさ (低サイクル域と高サイクル域)、試験片形状の違い (丸棒と平板) に関係なく、一本の直線で近似できることがわかる。Fig.2 に示したように、数十マイクロメートル程度の微小なき裂が発生するまでの潜伏期間は、疲労寿命の 10% 以下であった。つまり、疲労寿命は微小なき裂が試験片破断サイズに成長するまでの繰返し数 (成長寿命) と解釈できる。また、ステンレス鋼の低サイクル疲労では、ひずみ範囲が同じならば、応力振幅によらず疲労寿命はほぼ同じであり<sup>(9)</sup>、設計に用いる限界繰返し数もひずみ範囲に対する疲労寿命を用いて決定されている<sup>(10)</sup>。したがって、疲労寿命と直接的な関係を有するき裂成長速度が、応力範囲 (K 値) よりもひずみ範囲 (ひずみ拡大係数) とよい相関を有することには矛盾がない。

### 3. 有効等価応力拡大係数

#### ( $\Delta K_{eq(eff)}$ ) の定義

弾性域においては、ひずみ拡大係数とヤング率の積は応力拡大係数と等しくなる。そこで、ひずみ拡大係数範囲に室温 (25°C) でのヤング率  $E_{(25^\circ C)}$  (= 195 GPa) をかけた次式の等価応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{eq}$ ) を定義した<sup>(3)</sup>。

$$\Delta K_{eq} = f \Delta \epsilon E_{(25^\circ C)} \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

さらに、 $\Delta \epsilon$  に代わり、Fig.5 に示すように、き裂が開いている間のひずみ範囲である有効ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_{eff}$  を用い、有効等価応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{eq(eff)}$ ) を次式で定義した。

$$\Delta K_{eq(eff)} = f \Delta \epsilon_{eff} E_{(25^\circ C)} \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

疲労き裂はき裂面が開いている間に成長することが知られており、応力拡大係数に対しては有効応力拡大係数範囲が一般的に用いられる。また、破壊力学試験片 (CT 試験片) を用いた試験では、通常、き裂が閉口しないように R 比 (最小荷重/最大



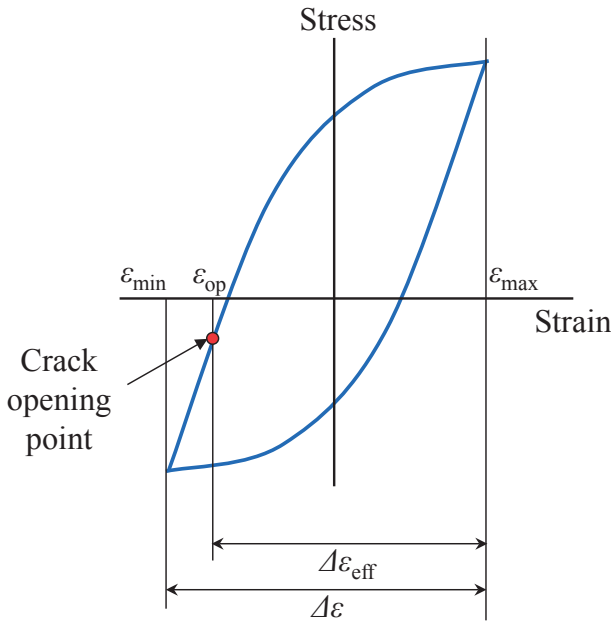
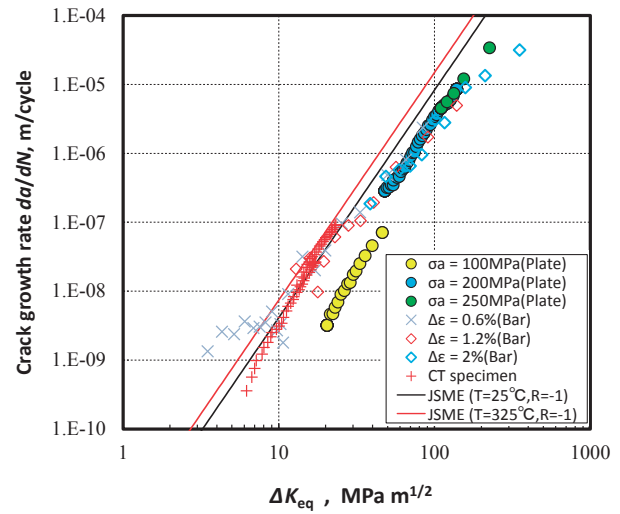
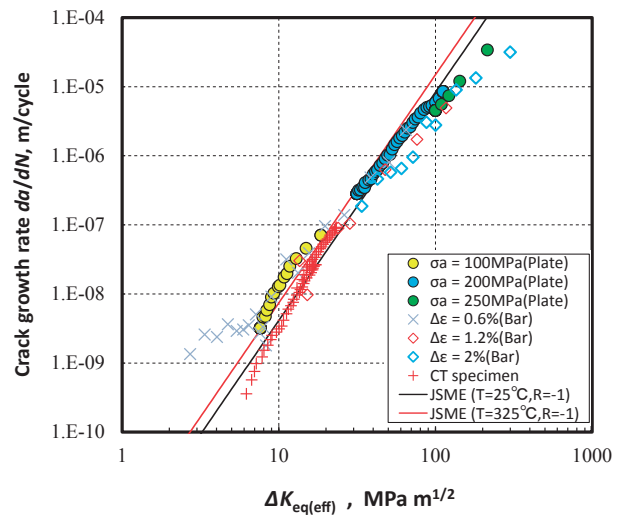


Fig. 5 Schematic drawing for defining nominal and true effective strain ranges.

荷重)を0.1以上として試験を行うことから、 $\Delta K$ をそのまま有効応力拡大係数範囲として用いることができる。一方、丸棒試験や平板試験などの低サイクル疲労を対象とした疲労き裂成長試験では、完全両振りのひずみや荷重を負荷することから、圧縮のひずみや荷重によってき裂は閉口する。そこで、平板を用いた試験では、除荷弾性コンプライアンス法によってき裂の開くタイミングを同定し、 $\Delta\epsilon_{eff}$ を算出した<sup>(7)</sup>。一方、丸棒試験では、き裂開口点を同定することは困難なので、応力が零に到達した時点でき裂が開くと仮定した<sup>(4)</sup>。結果をFig.6に示す。有効ひずみ範囲を用いることによって、試験結果のばらつきをさらに小さくすることができた。とくに、 $\sigma_a = 100$  MPaの平板試験の結果は、 $\Delta K_{eq}$ に対しては他の結果からの逸脱が顕著であったが、 $\Delta K_{eq(eff)}$ を用いることで、ほぼ一直線上に収束した。Fig.5に示した模式図で考えると、き裂の開く応力が同じであれば、 $\Delta\epsilon_{eff}$ はヒステリシスループの幅が小さくなるほど小さくなる。そのため、ヒステリシスループが比較的小さかった $\sigma_a = 100$  MPaでは $\Delta K_{eq(eff)} / \Delta K_{eq}$ が相対的に小さくなり、Fig.6(a)において、大きく逸脱する結果となった。つまり、有効ひずみ範囲が疲労き裂の成長駆動力となっており、き裂成長速度は $\Delta K_{eq(eff)}$ によって予測できると考えられる。



(a) Equivalent stress intensity factor ( $\Delta K_{eq}$ )



(b) Effective equivalent stress intensity factor ( $\Delta K_{eq(eff)}$ )

Fig. 6 Relationship between crack growth rate and equivalent stress intensity factor range.

#### 4. 維持規格のき裂成長速度との比較

維持規格において、応力比  $R = -1$ におけるステンレス鋼の大気中の疲労き裂成長速度  $da/dN$ は次式で規定されている<sup>(6)</sup>。

$$\frac{da}{dN} = 10^H \times 18.61 \times 10^{-3} (\Delta K)^{3.3} \quad (5)$$

$$H = -9.984 + 1.337 \times 10^{-3} T - 3.344 \times 10^{-6} T^2 + 5.949 \times 10^{-9} T^3 \quad (6)$$

ここで、 $T$ は温度で単位は  $[^\circ\text{C}]$  となる。また、速度は  $[\text{m/cycle}]$ 、 $\Delta K$ は  $[\text{MPa m}^{0.5}]$  の単位で与えられる。

先に述べたように、維持規格の成長速度は温度に依存している。そこで、温度を25℃、および325℃とした場合の成長速度をFig.6に示した。維持規格の成長速度は、試験結果と同様の傾向を示した。とくに、 $\Delta K_{eq(eff)}$ を用いた場合、維持規格の式は試験結果の平均的な挙動とよく一致した。温度が高い方の速度が速くなっているが、ひずみ拡大係数を用いた整理では温度の影響を考慮していない。これは、疲労寿命が試験温度の影響がほとんど受けず、設計で用いる許容繰返し数も温度に依存しないことを根拠としている。これまで考察してきたように、ステンレス鋼の疲労き裂成長速度は、有効ひずみ拡大係数範囲と相関があり、試験温度依存性も無視できると考えられる。維持規格における試験温度依存性は、その定義からヤング率の温度依存性によって生じていると推測される。次式を用いて、維持規格の325℃における成長速度式を補正した結果をFig.7に示す。

$$\Delta K_{corrected} = \Delta K \frac{E_{(25^{\circ}\text{C})}}{E_{(325^{\circ}\text{C})}} \quad (7)$$

図に示すように、補正後の325℃の速度は25℃の速度にほぼ一致しており、維持規格の速度式の温度依存性がヤング率の温度依存性に依存していることが裏付けられた。

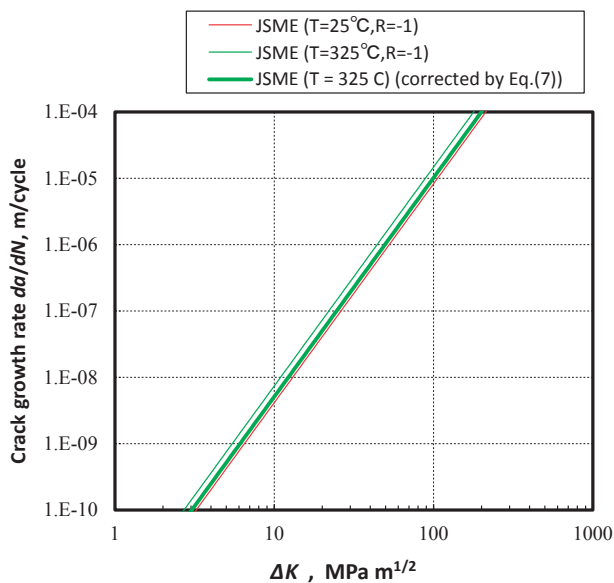


Fig. 7 Correlation between crack growth rate and stress intensity factor prescribed in JSME FFS code<sup>(6)</sup> for different temperature.

## 5. 低サイクル疲労き裂の成長予測方法

ひずみ拡大係数を用いることで、低サイクル疲労の成長を予測することが可能となる。一方、実機においては、応力拡大係数を用いた維持規格の成長速度式が実用されており、有効ひずみ拡大係数による整理では、維持規格の式とほぼ一致した。したがって、低サイクル疲労き裂成長予測に対しても、維持規格の成長速度式が適用できると考えられる。つまり、 $\Delta K$ を $\Delta K_{eq}$ で置き換えた(5)式によって、低サイクル疲労のき裂成長を予測することができる。 $\Delta K_{eq}$ の算出には、ひずみ範囲が必要となるが、機械荷重に対しては簡易弾塑性解析(Ke係数)が適用できる。また、熱応力に対しては、弾性解析によって得られたひずみ範囲をそのまま $\Delta K_{eq}$ の算出に用いることができる場合もある<sup>(11)</sup>。 $\Delta \epsilon_{eff}$ を予測できれば、さらに合理的な成長予測が可能となる。

## 6. 結 言

ステンレス鋼の低サイクル疲労き裂成長を予測するために、著者らがこれまで実施してきた316ステンレス鋼を用いた疲労試験をレビューした。そして、き裂開口を考慮した有効ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eff}$ を用いた有効等価応力拡大係数範囲( $\Delta K_{eq(eff)}$ )が、き裂駆動力として有効であることを示した。そして、 $\Delta K_{eq(eff)}$ とき裂成長速度の関係は、維持規格で規定される $\Delta K$ とき裂成長速度の関係とよく一致していることを確認した。最後に、維持規格のき裂成長予測を低サイクル疲労に適用するための手順を示した。

## 参考文献

- (1) M. Kamaya and T. Nakamura, "A flaw tolerance concept for plant maintenance using virtual fatigue crack growth curve", 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2013), paper no.97851.
- (2) M. Kamaya and T. Nakamura, "Fatigue damage management based on postulated crack growth curve", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.7-1 (2015), pp.43-49.
- (3) M. Kamaya, "Fatigue crack tolerance design for stainless steel by crack growth analysis", Engineering Fracture Mechanics, Vol.177

- (2017), pp.14-32.
- (4) M. Kamaya and M. Kawakubo, "Strain-based modeling of fatigue crack growth - An experimental approach for stainless steel", *International Journal of Fatigue*, Vol.44 (2012), pp.131-140.
  - (5) 釜谷, 川久保, "き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価 (成長予測モデルの構築とその適用例)", *日本機械学会論文集A編*, Vol.78, No.795 (2012), pp.1518-1533.
  - (6) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格維持規格, JSME S NA1-2012 (2012), 日本機械学会.
  - (7) M. Kamaya, "Low-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor", *International Journal of Fatigue*, Vol.72 (2015), pp.80-89.
  - (8) 釜谷, "き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価 (繰返し熱応力下での疲労寿命)" *日本機械学会論文集A編*, Vol.79, No.806(2013), pp.1530-1544.
  - (9) M. Kamaya and M. Kawakubo, "Mean stress effect on fatigue strength of stainless steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 74, pp.20-29 (2015).
  - (10) O. K. Chopra, W. J. Shack, "Effect of LWR coolant environments on the fatigue life of reactor materials", NUREG/CR-6909, ANL-06/08 (2007).
  - (11) M. Kamaya and K. Miyoshi, "Thermal fatigue damage assessment at mixing tees (elastic-plastic deformation effect on stress and strain fluctuations)", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 318 (2017), pp.202-212.