ステンレス鋼の低サイクル疲労に対するき裂成長予測手順

Crack Growth Prediction of Stainless Steel for Low-Cycle Fatigue Regime

(㈱原子力安全 釜谷 昌幸 Masayuki KAMAYA Member システム研究所

In order to show validity of the strain intensify factor for predicting crack growth in the low-cycle fatigue regime, fatigue crack growth tests using Type 316 stainless steel in room temperature were reviewed. It was shown 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-forservice code of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME). The growth rate of JSME code agreed with the test results, although it depends on temperature. Finally, the procedure for predicting the low-cycle fatigue crack growth was shown. The JSME code growth prediction procedure and material constants 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、荷重の繰返し数が許容値を超えないように考慮され る。また、保全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、UF = 0.99 であっても許容される。一方、 保全の段階においては、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ことから、UFの大き さも問題となる。一方、UF が 1 になったとしても直ちに 機器に問題が生じるとは限らない。そもそも疲労劣化、つ まり UFの増加に対応する材料状態の変化は明確でない。 これまで、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[1][2]。実測でき るき裂寸法を用いて疲労劣化の程度を測ることによって、 検査などでき裂が発見された場合に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、検出能力から劣化の最大値は推定できる。

疲労劣化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、き裂成長予測に用いることは厳密にはできない。 この問題に対し、筆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を、低サ イクル疲労を含むき裂成長予測に適用してきた[3][4]。そ して、低サイクル疲労き裂成長速度が、ひずみ拡大係数、 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 係数とよい相関を有することを示してきた[1]。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が前提 となっている。一方、日本機械学会発電用設備規格維持規 格[5] (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が 用いられており、ステンレス鋼の大気中のき裂成長速度 では、き裂成長速度が応力や温度によって変化する規定 となっている。設計と維持規格のいずれも同じ構造物や 荷重を対象としていることから、ひずみ拡大係数による 予測と、維持規格における応力拡大係数による予測の関

連絡先: 釜谷昌幸、〒919-1205 福井県美浜町佐田 64、 (株)原子力安全システム研究所 E-mail: kamaya@inss.co.jp

係を整理しておく必要がある。

本研究では、筆者らがこれまで 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、ひずみ拡大係数を用いること の有効性を示すとともに、有効ひずみ範囲を用いた有効 応力拡大係数に対して、その妥当性を示した。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、 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

過去に筆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[3][4][6]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 Table1 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)[3][4]

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結果 [3][4]を示す。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 $\Delta \epsilon \approx 0.6\%$ 、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、 試験片を破断に至らしめた主き裂の長さが測定された。 試験片が破断した時点の繰返し数である疲労寿命 $N_{\rm f}$ は、 $\Delta \epsilon = 0.6\%$, 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、 $\Delta \epsilon$ =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, 41.2 および 130.6 µm 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

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

Fe	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо
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).



Fig. 2 Change in crack length on the surface obtained by replica specimens during low-cycle fatigue tests [3][4].

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く、疲 労劣化の程度をき裂寸法によって定量化できることの根 拠となっている。

2.3 平板試験 [6]

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1mm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[6]. 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. き裂断面から荷重方向に14mm離れた位置にひずみゲージを取り付けた.

応力振幅 $\sigma_a \ge 100$ 、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. き裂成長速度は、き裂 長さが 2 mm に到達後、6 mm まで成長するまで取得した。

2.2 き裂成長速度の整理

き裂成長速度 da/dN を Fig.4 示す. 丸棒試験におけるき 裂成長速度は Fig.2 の傾きから算出した。破断面観察結果 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[1].参考に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。横軸のき裂進展駆動力と して, 次式で定義される応力拡大係数範囲 ΔK または, ひ ずみ拡大係数範囲 $\Delta K_{\rm s}$ を用いた.

$$\Delta K = f \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

$$\Delta K_{\varepsilon} = f \Delta \varepsilon \sqrt{\pi a} \tag{2}$$

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を示す。

*ΔK*で整理した場合の成長速度のばらつきは大きい。一般に、塑性ひずみサイクルが大きくなると、*ΔK*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。一方、平板 を用いた*σ*_a=100 MPa の試験、および CT 試験片を用いた 試験では、塑性ひずみの発生は限定的であったので、成長 速度がばらつきの下限近傍となっている。

*AK*_εとき裂成長速度の相関は、*AK* に対するものよりも 良くなっている。とくに、塑性ひずみが顕著であった丸棒 試験の結果が1本の線上にほぼ収束した。このように、 *AK*_ε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. Fig2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



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



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

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[7]、 設計に用いる限界繰返し数もひずみ範囲に対して規定さ れている.したがって,成長寿命と直接的な関係を有する き裂進展速度が,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 (AKaq(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(ΔK_{eq})を定義した[1]。

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

さらに、 $\Delta \epsilon$ に代わり、Fig.5 に示すように、き裂が開口し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。

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

疲労き裂はき裂面が開口し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/最大荷重)を0.1以上として試験を 行うことから、ΔK 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、または荷重を負荷することから、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口するタイミングを 同定し、Aceffを算出した。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 点でき裂が開口すると仮定した。この仮定の妥当性は前 報において確認されている[7]。有効ひずみ範囲を用いる ことで、もさらに試験結果のばらつきが小さくすること ができた。とくに、 $\sigma_a = 100 \text{ MPa}$ の平板試験の結果は、 ΔK_{eq} に対しては他の結果からの逸脱が顕著であったが、 △Kealeff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、き裂の開口する応力が同じで あれば、Aceffはヒステリシスループの幅が小さくなるほど



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









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

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.6a 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。

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[5]。

$$\frac{da}{dN} = 10^{H} \times 18.61 \times 10^{-3} \left(\Delta K\right)^{3.3}$$
(5)
$$H = -9.984 + 1.337 \times 10^{-3} T - 3.344 \times 10^{-6} T^{2} + 5.949 \times 10^{-9} T$$
(6)

ここで、T は温度で単位は[\mathbb{C}]となる。また、速度は [m/cycle]、 ΔK は[MPa m⁰⁵]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、ムKeq(eff)を用いた 整理では、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。

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

図に示すように、補正後の 325℃の速度式は 25℃のそれ 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 intensify factor prescribed in JSME FFS code 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、*ΔK をΔKeq* 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。 *ΔKeq* の算出には、ひずみ範囲が必要となるが、熱応力に 対しては線膨張係数と温度差の積を、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、*Δeetf* 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、筆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 ΔK 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、維持規格の進展予測を低 サイクル疲労に適用するための手順を示した。

参考文献

- 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 (PVP2013) PVP2013-97851 (2013).
- [2] M. Kamaya and T. Nakamura, "Fatigue damage management based on postulated crack growth curve", ICMST-Kobe 2014.
- [3] M. Kamaya and M. Kawakubo, "Strain-based modeling of fatigue crack growth – An experimental approach for stainless steel", International Journal of Fatigue, Vol.44, pp.131-140 (2012).
- [4] 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, pp. 1518-1533 (2012).

- [5] 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.
- [6] M. Kamaya, "Low-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor", International Journal of Fatigue, Vol. 72, pp.80-89 (2015).
- [7] M. Kamaya and M. Kawakubo, "Mean stress effect on fatigue strength of stainless steel", International Journal of Fatigue, Vol. 74, pp.20-29 (2015).