

# き裂成長予測に基づく疲労評価法の検討

## Fatigue Damage Assessment Procedure based on Crack Growth Prediction

(株)原子力安全 システム研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Non Member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member

A fatigue damage assessment procedure based on crack growth prediction was shown, in order to quantify the risk for failure of nuclear power plant components. First, crack initiation and growth behavior during low-cycle fatigue tests was reviewed and it was shown that the fatigue life could be estimated by predicting the crack growth without considering incubation period before the crack initiation. The change in crack size with the number of cycles was obtained by using the equivalent stress intensity factor, which was derived by the strain intensity factor. Then, the structural factor was implemented in the crack growth curve by considering the accelerated crack growth rate together with the enhanced initial size, which was about 300-500  $\mu\text{m}$ , and this enabled to show the relationship between the crack size and the usage factor. Finally, establishing a reasonable fatigue damage assessment, the fatigue damage assessment scheme using the crack growth curve was proposed.

**Keywords:** Fatigue Life, Fatigue Damage, Crack Growth Prediction, Usage Factor, Low-Cycle Fatigue

### 1. 緒言

原子力発電プラントの機器設計において、疲労損傷は運転年数の経過とともに蓄積することを前提に、蓄積した損傷量が許容値を超えないように考慮されている。具体的には、変動荷重に対して許容される繰返し数を設計疲労曲線に基づいて決定し、荷重変動 1 回あたりの損傷量を許容繰返し数の逆数とする。そして、供用期間中に想定される損傷量の合計を Usage Factor (以後、 $UF$ ) として評価し、 $UF$  が 1 を超えないように設計する。プラント供用開始後も、実績の繰返し数から  $UF$  を算出し、これが 1 を越えないことを確認する。したがって、プラント運転期間の長期化にともなって、 $UF$  の実績は増加することになる。また、供用期間中の  $UF$  には、設計時に考慮されなかった高温・高圧水環境による疲労寿命の低下(環境効果)を考慮することになっており、実績の  $UF$  は設計時の想定よりも大きくなる傾向にあり、将来的には 1 を超える可能もある。

設計においては、 $UF$  が 1 を越えるか否かが判断基準となり、1 以下であれば、その値が問題になることはない。一方で、供用中は疲労損傷が確実に蓄積され、材料には

何らかの変化がもたらされている。したがって、疲労損傷による潜在的なリスクの変化を考慮するためには、 $UF$  が 1 を超えたか否かではなく、疲労損傷が材料にもたらす変化とそれが機器の強度や安全機能に及ぼす影響を明確にしておく必要がある。一方、疲労損傷の実態はき裂の発生と進展であるという考え方が示されている[1]。疲労損傷の大きさをき裂サイズとして代表することができれば、機器の強度や機能への影響を定量的に算出することができ、また実機において損傷の大きさを実測することも可能となる。しかし、疲労損傷量や  $UF$  とき裂サイズの関係は明確でない。 $UF$  を算出するための設計疲労線図は、直径 10 mm 程度の疲労試験片が破断するまでの繰返し数(以後、疲労寿命)に設計係数を考慮して決定されている。したがって、試験と実機におけるさまざまな違いが設計係数によって妥当に考慮されたとすると、 $UF$  が 1 に到達した時点では、実機には試験片が破断するレベルのき裂が発生している可能性がある。構造健全性の観点からは、たとえ 10 mm のき裂が発生したとしても直ちに問題になるとは限らない。逆に、10 mm 以下のき裂が発生した場合でも、機器の破損に対する潜在的なリスクは増加する可能性がある。同じ  $UF$  でも、強度や機能に対するリスクは機器によって異なるため、実機の状態を反映した現実的な評価を行うためには、 $UF$  を用いた画一的な評価では対応できない可能性がある。

本研究では、蓄積される疲労損傷による機器の破損リ

スクを評価するため、 $UF$ に代表される疲労損傷量とき裂サイズとの対応関係を明らかにする。そして、き裂成長予測を取り入れた疲労評価法について検討する。

## 2. 疲労試験に対するき裂成長予測

### 2.1 疲労試験におけるき裂発生・成長挙動

$UF$ とき裂サイズを対応させるため、疲労寿命とき裂サイズの関係について、過去に実施された316ステンレス鋼を用いた疲労試験の結果[2][3]をレビューした。試験に用いられた材料の化学成分を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。

試験では直径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ている。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1.2%または2.0%に制御して実施された。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発生および長さが測定された。試験片が破断した時点の繰返し数である疲労寿命 $N_f$ は、 $\Delta\varepsilon=1.2\%$ および2.0%の条件においてそれぞれ5,937回および1,495回であった。

主き裂長さと繰返し数の関係をFig.1に示す。 $\Delta\varepsilon=1.2\%$ の条件では、長さ41.2  $\mu\text{m}$ のき裂が $N/N_f=0.09$ の時点で確認され、以後連続的に成長し、成長速度はき裂長さとともに増加した。一方、 $\Delta\varepsilon=2.0\%$ では、長さ130.6  $\mu\text{m}$ のき裂が $N/N_f=0.48$ の時点で確認された。 $\Delta\varepsilon=1.2\%$ の場合と比較して発生のタイミングが遅いが、これは比較的大きなひずみ幅の影響で、試験片表面にすべり線や凹凸が発生して、き裂の判別が困難であったことによる。一般的に、ひずみ範囲が大きいほどき裂は相対的に早いタイミングで発生する。逆に、ひずみ範囲が小さくなると、き裂発生までの潜伏期間は増加し、疲労限度以下のひずみ範囲では潜伏期間が無大となる。このことから、低サイクル疲労においては、数十 $\mu\text{m}$ の長さのき裂が発生するまでの潜伏期間は、疲労寿命に対して小さいと考えられる。

### 2.2 き裂成長予測による疲労寿命の推定

疲労寿命に対する潜伏期間が相対的に短かったので、疲労寿命は微小き裂が試験片を破断させるサイズに成長するまでの成長期間とほぼ等しくなる。したがって、き裂成長を予測することで疲労寿命を推定することが可能

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

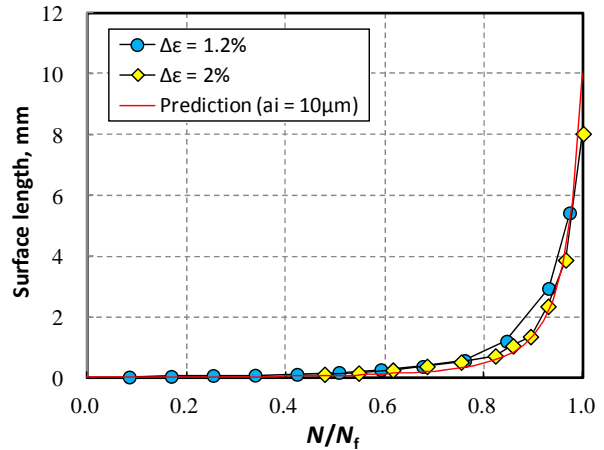


Fig. 1 Change in crack length on the surface obtained by replica specimens during low-cycle fatigue tests [2][3].

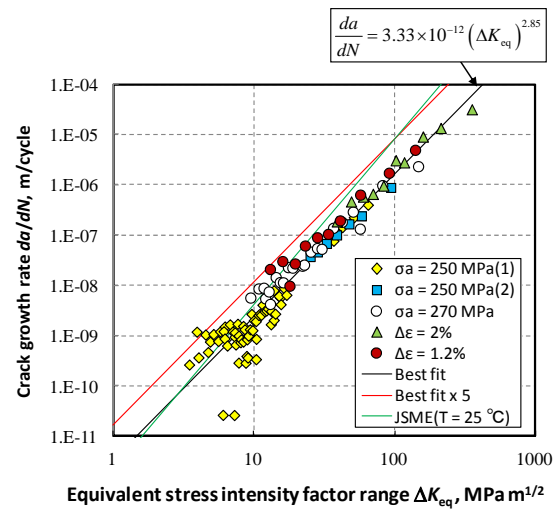


Fig. 2 Relationship between crack growth rate and equivalent stress intensity factor.

となる。ここでは、等価応力拡大係数を用いた疲労寿命推定の手順について述べる。

Fig.1に示したき裂サイズと繰返し数の関係からき裂成長速度を算出した。Fig.2は深さ方向のき裂成長速度( $da/dN$ )と等価応力拡大係数の関係を示す。き裂深さは表面長さの4分の1として算出した。等価応力拡大係数範囲( $\Delta K_{eq}$ )は次式で定義される。

$$\Delta K_{eq} = f \Delta \varepsilon E \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここで、 $a$  はき裂深さ、 $f$  は応力拡大係数で用いられる形状係数、 $E$  は室温におけるヤング率を示す。図にはこれまで採取された応力振幅 $\sigma_a$ が 250 MPa および 270 MPa の荷重制御試験におけるき裂成長速度[3]も示しており、いずれの条件でもき裂成長速度は $\Delta K_{eq}$  とよい相関を有している。通常、高サイクル疲労におけるき裂成長速度は応力拡大係数が用いられるが、ステンレス鋼の場合、疲労限度近傍においても応力・ひずみ関係にヒステリシスループがあらわれ、応力拡大係数とき裂進展速度の関係には大きなばらつきが見られた[3]。ステンレス鋼の疲労寿命は、高サイクル領域を含め応力振幅よりもひずみ範囲と相関を有する。そして、疲労寿命がき裂成長に要する期間とほぼ等価であるという結果から、き裂成長速度がひずみ範囲（等価応力拡大係数範囲）とよい相関を有することは矛盾なく説明できる。Fig.2 の黒色の実線は、プロットの近似線で、次式で表される。

$$\frac{da}{dN} = 3.33 \times 10^{-12} (\Delta K_{eq})^{2.85} \quad (2)$$

この式で、速度は[m/cycle]、 $\Delta K_{eq}$ は[MPa m<sup>0.5</sup>]の単位で与えられる。

き裂発生までの潜伏期間を無視すると、(2)式を積分することで疲労寿命を得ることができる。そこで(2)式を、

$$\frac{da}{dN} = D (\Delta K_{eq})^m = D (f \Delta \varepsilon E \sqrt{\pi a})^m \quad (3)$$

のように、一般的な表記に書き換え、 $f$  を定数として(3)式を積分することで次式を得る。

$$a = \left\{ D \pi^{\frac{m}{2}} (f \Delta \varepsilon E)^m \left( 1 - \frac{m}{2} \right) N + a_i^{1-\frac{m}{2}} \right\}^{\frac{2}{2-m}} \quad (4)$$

ここで、 $a_i$  は初期き裂深さを表す。 $a_i$  が決まれば、繰返し数とき裂深さの関係を解析的に示すことが可能となる。

疲労寿命  $N_f$  は、き裂が  $a_i$  から限界深さ  $a_f$  に到達するまでの繰返し数と考えられることから、次式で算出される。

$$N_f = \frac{1}{D (f \Delta \varepsilon E)^m \pi^{\frac{m}{2}}} \left( \frac{2}{2-m} \right) \left( a_f^{1-\frac{m}{2}} - a_i^{1-\frac{m}{2}} \right) \quad (5)$$

この式から推定される疲労寿命を Fig.3 に示す。この図で  $a_i = 30 \mu\text{m}$  (表面長さで  $120 \mu\text{m}$  に相当)、 $a_f = 3 \text{ mm}$  としている。また、 $f$  はき裂深さが  $0.5 \text{ mm}$  相当の値を用いた。推定された疲労寿命は本供試材の低サイクル疲労寿命[4]とよく対応しており、等価応力拡大係数を用いてき裂成

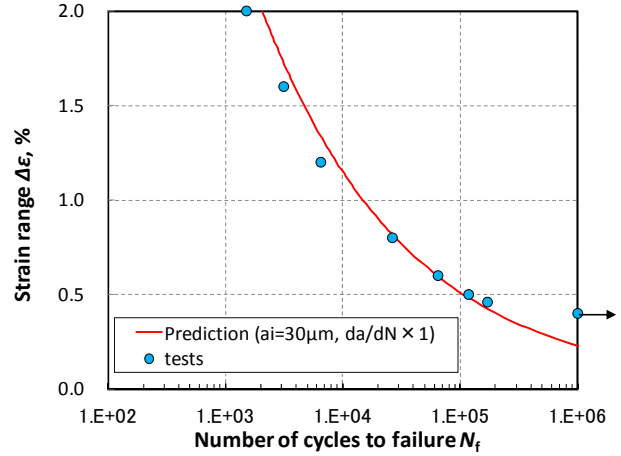


Fig. 3. Fatigue life estimated by crack growth prediction and test results [4] ( $a_i = 30 \mu\text{m}$ ).

長予測により疲労寿命が推定できることがわかる。Fig.1 に示すように、き裂成長速度はき裂サイズとともに加速することから、推定される疲労寿命は  $a_i$  に大きく依存し、 $a_f$  にはあまり影響を受けない。したがって、初期深さを逆解析することで、Fig.3 における推定結果と実験結果を一致させることもできる。

## 2. 仮想き裂成長曲線の提案

(4)式で求まるき裂成長曲線と実験結果との対応を Fig.1 に示した。 $N/N_f$  とき裂サイズの関係を(4)式によって予測できていることがわかる。ちなみに、(4)式はひずみ範囲に依存しない。 $UF$  を算出するための設計疲労曲線は、実験により得られた疲労寿命の平均線に設計係数を考慮して決定されている。したがって、実機における疲労評価で用いられる  $UF$  とき裂サイズを対応させるためには、Fig.1 のき裂成長曲線に対して、設計疲労曲線に考慮されている設計係数に相当する余裕を含める必要がある。

き裂成長曲線に設計係数を考慮する考え方の模式図を Fig.4 に示す。方法としては、き裂発生に考慮する方法と、き裂成長に考慮する方法の 2 通りがある。発生に考慮する場合は、潜伏期間や初期サイズを変化させることになるが、先にも示したように潜伏期間は相対的に短い。き裂成長に考慮する場合は、き裂成長速度を増加させる方法が考えられる。設計疲労曲線において考慮されている設計係数は疲労寿命に対して 20 倍であり、その内訳は材料とデータのばらつき (2 倍)、サイズ効果 (2.5 倍)、そして表面仕上げなど (4 倍) の積と言われている[5]。このうち、表面仕上げがき裂進展速度には影響を及ぼすことはないと考えられるので、データのばらつきとサイズ

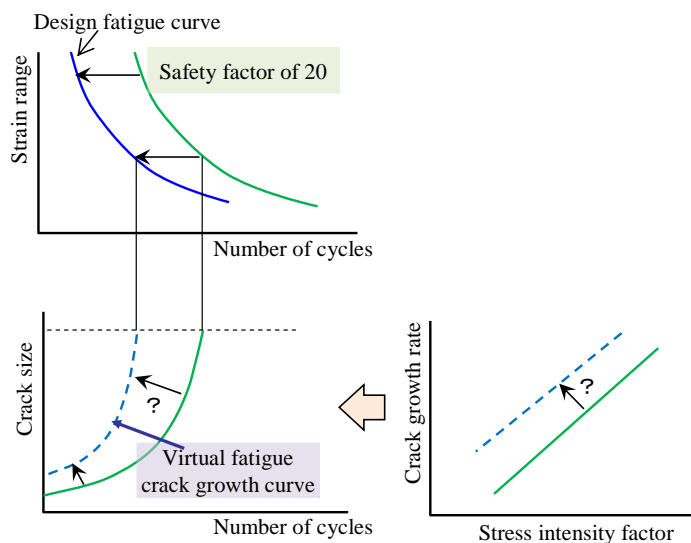


Fig. 4 A schematic drawing to represent how the safety factor is considered in the crack growth curve.

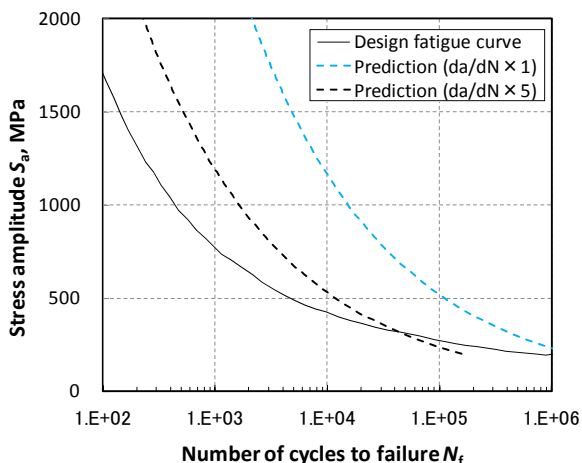


Fig. 5 Estimated fatigue lives when the accelerated crack growth rate of five times the mean curve was assumed ( $a_i = 30 \mu\text{m}$ ).

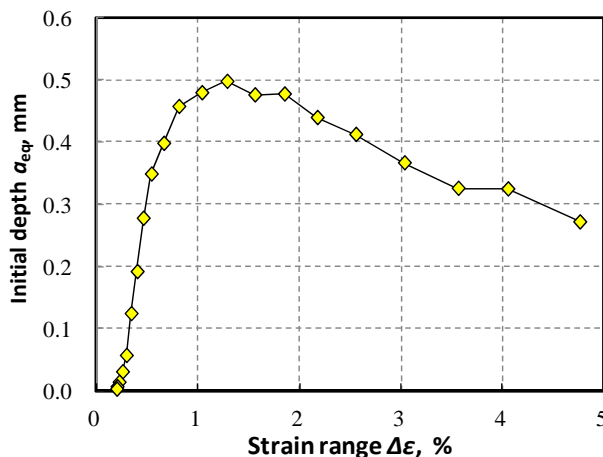


Fig. 6 Initial crack depth which gives estimated fatigue life identical to that obtained by the design fatigue curve.

効果の積である5倍をき裂成長に考慮する。Fig.2には(2)式に5倍の加速を考慮したき裂成長速度を示しているが、試験による成長速度のばらつきをほぼ包絡できていることが確認できる。

Fig.5は5倍の加速を考慮して予測した疲労寿命を示す。縦軸は $\Delta\epsilon E$ として算出される応力振幅 $S_a$ で、設計疲労曲線と直接比較できるようにしている。き裂成長に5倍の加速を考慮することで疲労寿命は低下しているが、設計疲労曲線より長寿命側となっている。この推定では初期深さは $a_i = 30 \mu\text{m}$ としているが、き裂発生にも設計係数を考慮するため、 $a_i$ を大きく設定することを考える。Fig.6は、推定される疲労寿命が設計疲労曲線と一致するよう

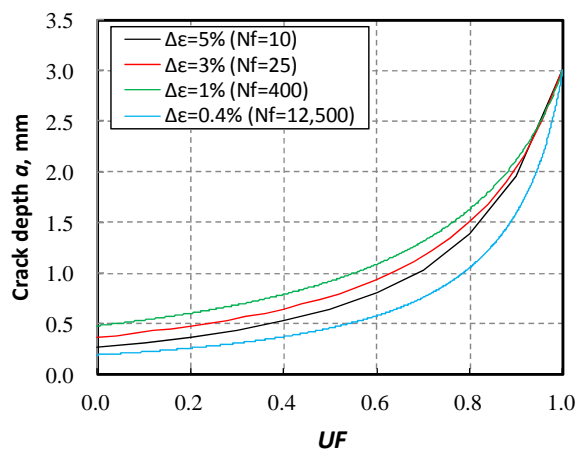


Fig. 7 Crack growth curve for each strain range obtained by the initial depth shown in Fig. 6.

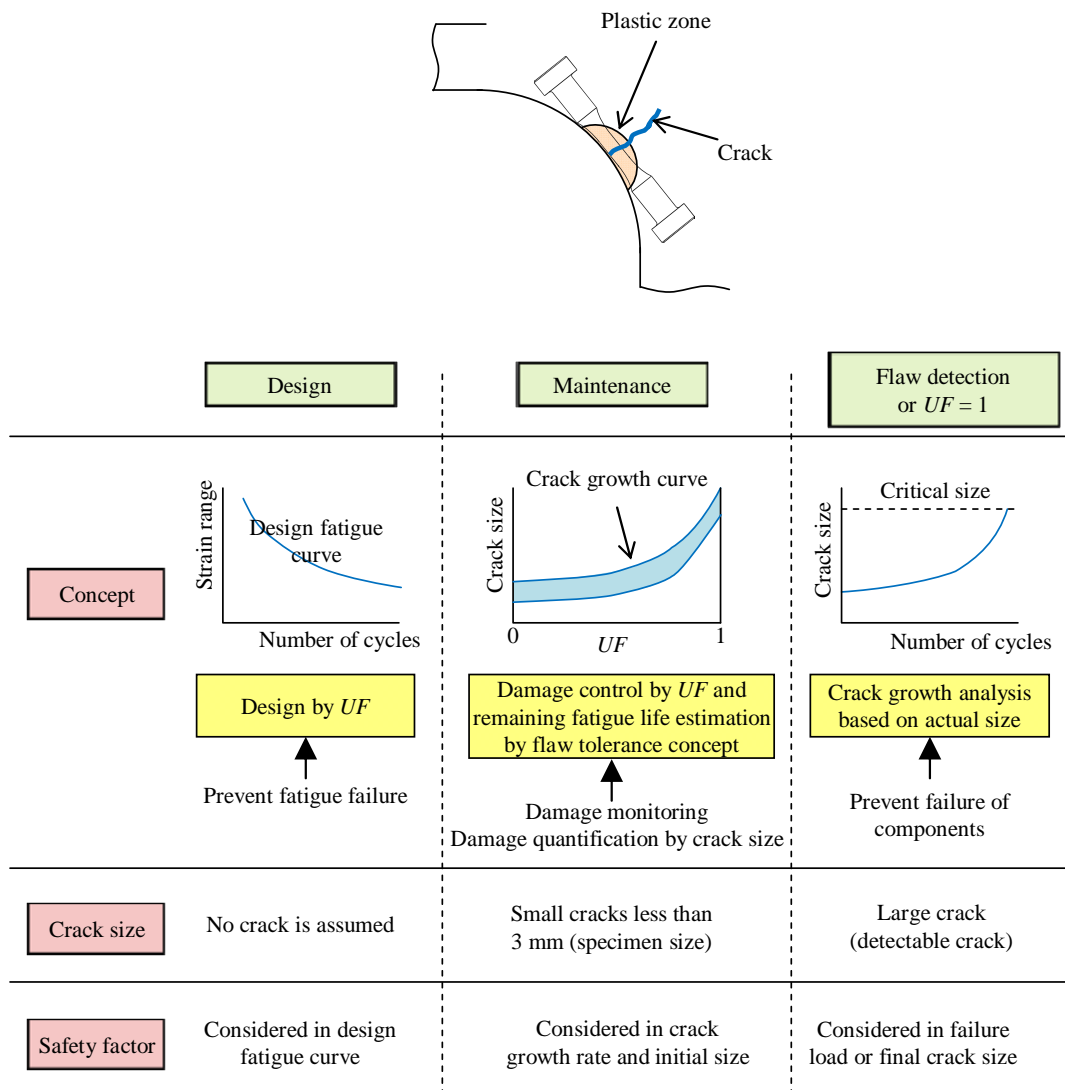


Fig. 8 Overview of fatigue damage assessment scheme based using the virtual fatigue crack growth curve.

に逆解析で求めた  $a_i$  (以後、等価初期き裂深さ  $a_{eq}$  と称す) を示す。疲労寿命の推定には潜伏期間を考慮していないため、等価初期き裂深さは潜伏期間の影響を含んでおり、実際の初期深さとは必ずしも対応しないことに注意する必要がある。 $a_{eq}$  は、潜伏期間が相対的に長くなる疲労限度 (本供試材ではおおよそ  $\Delta\epsilon = 0.4\%$ ) 近傍で極大値を示し、ひずみ範囲が小さくなるとマイナスとなった。そして、低サイクル領域での  $a_{eq}$  は概ね  $300 \sim 500 \mu\text{m}$  程度であった。

Fig.6の  $a_{eq}$  と5倍の加速を考慮したき裂成長曲線を用いることで、推定される疲労寿命は設計疲労曲線のそれに全く一致する。その場合の繰返し数とき裂深さの関係を

Fig.7に示す。 $N_f$ が設計疲労曲線と一致しているため、 $N/N_f$ は  $UF$  と等価とみなすことができる。つまり、Fig.7は  $UF$  とき裂サイズの対応関係を示しており、本研究ではFig.7の曲線を仮想き裂成長曲線と呼ぶ。先にも述べたように、(4)式から算出される繰返し数とき裂深さの関係はひずみ範囲に依存しないが、Fig.6から得られる  $a_{eq}$  がひずみ範囲に依存しているため、仮想き裂成長曲線はひずみ範囲に依存して変化している。この曲線から、 $UF = 0.5$  におけるき裂深さはおおよそ  $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$  程度であることがわかる。

### 3. き裂成長予測に基づく疲労評価法

Fig.7において仮想き裂成長曲線を定義したが、この曲線が実機におけるき裂サイズと一致するとは限らない。過去に  $UF$  を用いて疲労設計が行われた部位において、供用期間中にき裂が発見された事例は見当たらない。つまり、疲労損傷を  $UF < 1$  に管理することで疲労によるトラブルを未然に防止できていることを示しており、実機における実際のき裂深さは、仮想き裂成長曲線以下であると推測される。また、仮想き裂成長曲線以下のサイズであることで、 $UF$  を用いた評価と同等の構造健全性が確保されていると考えることができる。そして、非破壊検査や破壊検査においてき裂サイズが同定できれば、Fig.7の関係から疲労損傷量（実績の  $UF$ ）を推定することができる。また、き裂が発見されない場合においても、非破壊検査のき裂検出限界から疲労損傷量を推定することもできる。

仮想き裂成長曲線を用いた疲労評価法の考え方を Fig.8 に示す。過去の実機疲労損傷事例を見ても、疲労設計では  $UF$  を用いることで疲労損傷を妥当に評価できていると判断できる。設計疲労曲線の見直しなどの可能性はあるものの、基本的な設計手法を変える必要性はない。一方、運用開始後においては、疲労損傷による潜在的なリスクの変化を評価するために、損傷の大きさ（ $UF$  の大きさ）にも着目する必要がある。仮想き裂成長曲線を用いることで、実績の  $UF$  からき裂サイズを想定することができる。そして、想定されたき裂サイズを用いて構造健全性評価を行い、機器の破損に対するリスクを算出できる。さらに、実機でき裂サイズが同定された場合、または同定されなかった場合に、実機の疲労損傷量を推定することも可能となる。仮想き裂成長曲線を用いる場合の疲労損傷の尺度は  $UF$  であり、対象とするき裂サイズも大きくても試験片レベル（本研究では最大 3 mm）となる。

$UF$  が 1 を超えた場合は、実き裂を想定した評価が可能となる。この時のき裂サイズは、仮想き裂成長曲線で想定した 3 mm より大きくなり、その限界値は機器の形状や荷重条件に依存する。限界サイズの算出には、維持規格を適用することができる。つまり、供用期間中にき裂が発見された場合と同様に、き裂や構造物の形状を考慮しながら許容される荷重や限界サイズを算出することになる。維持規格では、許容荷重や限界サイズに対して安全率が考慮され、進展予測には考慮されないことに注意

する必要がある。き裂成長曲線の横軸は  $UF$  ではなく、繰返し数となる。

以上のように、仮想き裂成長曲線を導入することで、疲労損傷を見える形で陽に評価することができ、設計時、運用開始、そしてき裂発生時（または  $UF = 1$  到達時）のそれぞれの場合に応じた、疲労評価を体系的に実施することが可能となる。

## 4. 結 言

仮想き裂成長曲線を用いることで、 $UF$  とき裂サイズの対応関係が明らかとなり、疲労損傷による潜在的なリスクの変化を評価できることを示した。また、設計時、運用開始、そしてき裂発生時の評価を体系的に整理した。一方で、仮想き裂進展曲線を実用として用いるには、その妥当性やデータ数の充実が必要となる。

## 謝辞

本研究は原子力規制庁の平成24年度高経年化技術評価高度化事業の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] Y. Murakami, K.J. Miller, “What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process”, *International Journal of Fatigue*. Vol.27, pp. 991-1005 (2005)
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 川久保政洋, 釜谷昌幸, “変動荷重下における 316 ステンレス鋼の疲労寿命予測 (寿命の支配因子と 2 段 2 重試験における損傷評価)”, *材料*, Vol. 60 (2011), pp.871-878.
- [5] O. K. Chopra and W. J. Shack. “Effect of LWR coolant environments on the fatigue life of reactor materials”, *NUREG/CR-6909, ANL-06/08* (2007).