複数き裂の相互作用を考慮した進展予測方法* (長さの異なる多数き裂の評価法)

釜谷 昌幸^{*1}, 佐々 貴洋^{*2}, 菊池 正紀^{*3}

Crack Growth Prediction Method Considering Interaction between Multiple Cracks (Assessment Procedure for Multiple Surface Cracks of Dissimilar Size)

Masayuki KAMAYA ^{*1}, Takahiro SASSA and Masanori KIKUCHI

^{*1}Institute of Nuclear Safety System, Inc.
Sata 64, Mihama-cho, Fukui, 919-1205 Japan

In a growth prediction for fitness-for-service assessment, mechanical interaction between multiple cracks was considered by assuming a coalescence of interacting cracks. The current coalescence rule for crack growth prediction is prescribed for interacting two cracks and the effect of size difference is not taken into account. No rule is provided for cracks of more than three and it was pointed out that the current rule is overly conservative. In this study, the coalescence criterion (N-criterion), which has been developed for two cracks of different size, was applied to the multiple cracks. The S-version finite element method was employed to simulate the crack growth behavior under interaction. It was shown that the growth of three cracks could be predicted conservatively by applying the N-criterion. For applying the N-criterion to three cracks, however, the small crack has to be treated properly when the crack was judged to stop growing. Furthermore, it was pointed out that the relative position between multiple cracks should be modeled with care when cracks were coalesced. The detailed procedure for the growth prediction was shown and its validity was shown by predicting the growth of six cracks, which was observed in an actual plant. The proposed procedure could predict the growth of interacting multiple cracks conservatively.

Key Words : Multiple Cracks, Interaction, Crack Propagation, Crack Growth Simulation, Fatigue Crack Growth, Fitness-for-Service Code

1. 緒 言

国内の原子力発電プラント構造物でき裂が発見された場合、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格（以下、維持規格）⁽¹⁾にしたがって疲労や応力腐食割れを想定したき裂進展予測が実施される。実機では複数のき裂が密集している場合が多く観察されている⁽²⁾⁽³⁾。複数のき裂が接近すると、力学的な相互作用の影響により進展駆動力である応力拡大係数（K 値）が変化し^{(4)~(8)}、き裂が単独で存在する場合より進展が加速、または減速する⁽⁹⁾。また、位置関係によっては接近したき裂が合体する場合もある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。維持規格において相互作用の影響は、評価上き裂を合体させることで考慮される。具体的には、進展予測開始時の2つのき裂の位置関係が条件を満たした場合、それらが接近したときに合体した単一のき裂に置き換えて評価する⁽¹⁾。き裂を合体させることによりき裂進展に及ぼす相互作用の影響を保守的に考慮できるが、現状の維持規格ではき裂サイズの違いによらず同じ合体条件が適用され、過度に保守的であることが指摘されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。き裂サイズが大きく異なる場合は小さいき裂の存在を無視しても、き裂進展予測には影響ないことが示されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。前報⁽¹⁶⁾において、2つのき裂に対し

* 原稿受付 2013 年 4 月 19 日

^{*1} 正員、(株)原子力安全システム研究所（〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田 64）

^{*2} 東京理科大学大学院理工学研究科機械工学専攻

^{*3} 正員、フェロー、東京理科大学理工学部機械工学科

E-mail: kamaya@inss.co.jp

て位置関係と長さ関係を系統的に変化させたき裂進展シミュレーション結果から、き裂の相対サイズの影響を考慮した合体基準を提案した（以後、この合体基準を N 基準と呼ぶ）。N 基準では、繰返しの引張圧縮負荷に対して、投影面上においてき裂先端距離が零になった時点で次式を満足した場合にき裂を合体させ、満足しない場合は小さいき裂の存在は無視して解析を行う（図 1 参照）。

$$\begin{aligned} 0.2 \leq 2c_2/2c_1 < 0.8 \quad \text{ならば} \quad H_0/2c_1 &\leq \frac{10}{8}(2c_2/2c_1) \\ 0.8 \leq 2c_2/2c_1 \quad \text{ならば} \quad H_0/2c_1 &\leq 1.0 \end{aligned} \quad (1)$$

この式で、 $2c_1$ 、 $2c_2$ はき裂の表面長さ、 H_0 はき裂の垂直距離を示す。現行の維持規格では進展予測開始時の位置関係（水平距離と垂直距離）から合体の有無を判断しているが、この方法では、例えば 3 つのき裂を考えた場合でも、それらの位置関係の組み合わせが複雑になり合体条件を記述することは容易でない。一方、N 基準では判断に用いる位置パラメータは垂直距離 H_0 のみとなる。これにより、多数のき裂が存在した場合でも、接近したき裂同士にのみ着目することで、手順上は N 基準をそのまま適用することができる。しかし、3 つ以上のき裂に対して N 基準を適用することの妥当性が示されているわけではない。

本研究では、個数にかかわらず適用できる合体評価法を提案する。2 つのき裂を対象とした合体評価法（N 基準）を 3 つ以上のき裂に適用するための具体的な手順を検討するとともに、重合メッシュ法を用いたき裂進展シミュレーションによってその妥当性を示す。き裂の位置関係を系統的に変化させた場合の進展挙動を考察し、進展挙動を適切に評価できる評価手順を提案する。そして、実機で想定されるような多数き裂に対して提案した合体評価手順を適用し、その妥当性を確認する。

Fig.1 Criterion of combination of interacting cracks (N-criterion).

Fig.2 Initial geometry and relative positions of the three cracks for crack growth simulation.

2. 3つの表面き裂の解析

2・1 解析方法

典型的なき裂挙動を考察するため、図2に示す3つの表面き裂に対するき裂進展シミュレーションを実施する。き裂深さを a 、表面長さを $2c$ で表し、き裂の相対的な位置は水平距離 S 、垂直距離 H で代表する。そして、添え字はき裂番号に対応させる。例えば、Crack1 の深さは a_1 、Crack2 との距離 H は H_{12} と表記する。添え字のない場合は全てのき裂に共通の値を示すこととする。また、 c_0 や H_0 などの “0” の添え字は初期のサイズや距離であることを示す。

シミュレーションでは、重合メッシュ法⁽¹⁷⁾により応力拡大係数 (K 値) を算出する。重合メッシュ法では、平板全体をモデル化したグローバルメッシュと、き裂周辺の詳細部のみをモデル化したローカルメッシュを重ね合わせて解析を行い、き裂進展にともなうき裂形状の変化はローカルメッシュを変更することで対応させる。したがって、相互作用下で複雑に変化するき裂形状に対応した K 値を比較的簡便に算出できる。 K 値の算出には VCCM(Virtual Crack Closure Method)を用いた⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

求まった K 値を用いて次式より進展速度 (da/dN) を算出した。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eq})^n \quad (2)$$

C と n は材料定数であり、原子炉の压力容器鋼である A533B 鋼を想定し、 $C = 1.67 \times 10^{-12}$ 、 $n = 3.23$ とした⁽⁷⁾。 ΔK_{eq} は等価応力拡大係数範囲で、次式で求めた⁽²⁰⁾。

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(1.155\Delta K_{II})^2 + 4(\Delta K_{III})^2} \quad (3)$$

図3で定義するき裂の進展方向 ϕ_0 は次式で求めた⁽²⁰⁾。

$$\phi_0 = \mp \left[140^\circ \frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} - 70^\circ \left(\frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中の符号は、 $K_{II} > 0$ のときは、 $\phi_0 < 0^\circ$ で、 $K_{II} < 0$ のときは $\phi_0 > 0^\circ$ となる。ポアソン比 0.3 の条件下で弾性解析により K 値を求め、き裂前縁の各点において求まった K 値からき裂進展量および方向を算出し、進展後のき裂前縁形状を決定した。1 ステップ (K 値の計算当たり) の進展量は、き裂前縁での最大進展量が 1 mm から 2.5 mm となるよう制御した。以上の手順により、繰返し引張荷重下の疲労き裂進展が模擬できることは前報⁽²¹⁾において確認されている。荷重条件は最大荷重 100 MPa、応力比 R は 0.1 とした。

Fig. 3 Crack growth direction.

Fig.4 Geometry and boundary conditions of the plate for crack growth simulation.

2・2 き裂進展解析

図4に示すような長さ $2B = 100c_0$ 、幅 $2W = 100c_0$ 、厚さ $t = 60c_0$ の平板表面に、初期のき裂形状が $a_0 = c_0$ ($c_0 = 5$ mm) で、初期の相対距離が $S_{12} = c_0$ 、 $S_{23} = 2c_0$ 、 $H = c_0$ の同じサイズの3つのき裂が存在する場合の進展挙動を図5(a)に示す。進展にともないき裂サイズが大きくなり、き裂先端の距離 S が減少し、やがてマイナスになっている（以後、この状態をオーバーラップと表現する）。オーバーラップした部分では、せん断応力の影響で進展方向が変化し、緩和効果のために進展速度も遅くなったため、き裂の前縁形状が変化し、要素間隔が密になっている。とくに、中央のき裂は、表面近傍の進展が抑制されている。

3つのき裂の投影面上の両端の距離を R_x と定義し（図2参照）、 R_x と繰返し数との関係を図5(b)に示す。初期の状態を $H_0 = 2c_0$ とした場合の結果も示したが、 H_0 が小さいほど R_x の増加が速い。つまり、相互作用の影響によってき裂進展が加速されている。また、図には維持規格の合体評価法にしたがった場合の進展予測結果（JSME CODE と表記）も合わせて示している。維持規格の評価では、K 値は相互作用を考慮しないで算出し、き裂間距離 S が零になった時点で合体させる。相互作用のない場合のK 値には、図6に示す値を用いた。このK 値は、十分大きな平板（ $2B = 2W = 150c_0$ 、 $t = 90c_0$ ）の中央部にき裂が存在する場合のK 値をアスペクト比で0.2毎に算出している。そして、これらの値を a/c の3次式で近似した曲線を進展予測に用いた。維持規格では、 S が零になってき裂が合体する際に、き裂を同一平面（ $H = 0$ の位置）に移動させ、進展を安全側に予測している。

図5の条件に対し、Crack3の初期サイズを $c_3 = a_3 = 0.6c_0$ とした場合の結果を図7に示す。サイズが相対的に小さいCrack3は、大きいき裂の応力緩和域に含まれ、見かけ上き裂の進展は停留した。K 値、つまり進展速度はき裂サイズに依存することから、き裂サイズの違いは繰返し数とともに大きくなる。き裂が停留した場合、停留したき裂が R_x の変化に及ぼす影響は小さく、進展評価上は停留したき裂の存在を無視できることが示されている⁽²¹⁾。維持規格の合体評価法では、き裂が停留することは考慮されていないため Crack3 も合体させる。この影響で図7(b)に示す維持規格とシミュレーションの差は図5(b)より大きくなった。前報⁽¹⁶⁾では、この停留挙動を考慮した式(1)の合体基準（N 基準）を提案している。N 基準に従えば、図5の解析条件では Crack3 の存在は無視でき、Crack1 と Crack2 のき裂のみに着目した進展評価を行うことになる。そして、N 基準を適用した場合の R_x の変化はシミュレーションの結果を安全側、かつ維持規格より合理的に予測できている。図7の条件では、維持規格評価における Crack3 の考慮の有無が、 R_x の変化に及ぼす影響はそれほど大きくなかった。このように、図5および図7のケースに対しては、3つのき裂に対してN 基準はそのまま適用できた。

Fig.5 Growth of interacting three cracks of the same size
(initial conditions: $c_1 = c_2 = c_3 = c_0$, $S_{12} = c_0$, $S_{23} = 2c_0$, $c_0 = 5$ mm).

Fig.6 Stress intensity factor for single crack.

Fig.7 Growth of interacting three cracks of dissimilar size

(initial conditions: $c_1 = c_2 = c_0$, $c_3 = 0.6c_0$, $S_{12} = c_0$, $S_{23} = 2c_0$, $H_0 = c_0$, $c_0 = 5$ mm).

3. 進展パターンの系統的な解析

図5および図7のケースでは3つのき裂であってもN基準がそのまま適用できたが、一般的に多数き裂に対してN基準が適用できるかどうかは明らかではない。そこで、3つのき裂について、系統的に位置関係を変化させることで、N基準の適用性を確認するとともに、適用に対する問題点を考察する。

3・1 2次元き裂へのモデル化

表面き裂が接近するときき裂のサイズが大きくなることに伴ってK値が変化する。また、図6にも示したように、き裂深さが同じでも、K値はき裂形状（アスペクト比）によって変化する。したがって、相互作用によってK値は、サイズと形状の両方の影響により、複雑に変化することになる⁽⁶⁾⁽²²⁾。本研究では、考察を容易にするため、表面き裂を2次元き裂にモデル化して検討する。深さの変化のない2次元き裂では合体（相互作用）によるサイズ変化の影響のみを考慮すればよく、解析も簡便となる。最初に、2次元き裂と3次元表面き裂の違いについて考察する。

2つの2次元き裂および表面き裂のK値を重合メッシュ法で解析した結果と距離 S ($H=0$) の関係を図8に示す。き裂サイズは同一 ($c_0 = 5$ mm) で、平板のサイズ (2次元き裂の場合は表面サイズ) は図4と同じとした。比較のため、平板中央にき裂が1つだけ存在した場合のK値 ($K_{(single)}$) も計算し、接近した側の先端のK値 ($K_{(IN)}$) を $K_{(single)}$ で正規化している。表面き裂の $K_{(IN)}/K_{(single)}$ はアスペクト比 a/c とともに増加した。しかし、 $a/c=1$ の場合でも、表面き裂の $K_{(IN)}/K_{(single)}$ は2次元き裂 (平面応力) の $K_{(IN)}/K_{(single)}$ を大きく下回っている。 $a/c > 1$ とすることで、表面き裂のK値は大きくなり、その最大値は2次元き裂のそれに漸近することが示されている⁽²³⁾。

前報⁽¹⁶⁾では、N基準を導出するためき裂のサイズと相対距離を変化させながら、き裂進展シミュレーションを実施し、小さいき裂の停留の有無 (相互作用の有無) を調べた。同様の検討を2次元き裂について実施した。2次元き裂の場合の進展シミュレーションの方法は3次元と同様に考えることができる。K値は、平面応力状態を仮定し、き裂の両端の2箇所から算出した。そして、き裂進展方向の変化は最大接線応力クライテリア⁽²⁴⁾にしたがい決定した。図9に定義するように、初期の c_1 を5 mm とし、 c_2/c_1 を0.2から0.9、 S_0/c_1 を0.5から4、 H_0/c_1 を1から6の範囲で変化させながら図4の平板上のき裂進展挙動を模擬した。投影面上でCrack2がCrack1の内部に隠れてしまう状態になるかどうかでCrack2の停留の有無を判断し、その結果を図9に示す。表面き裂に対する検討では、小さいき裂の停留の有無が、き裂がオーバーラップを開始した時点 ($S=0$ 時) の表面長さ比 $2c_2/2c_1$ と、 $H_0/2c_1$ で予測できることが示され、停留しない場合を安全側に包絡するように式(1)のN基準が導かれている。ここで、進展後のき裂は必ずしも対称ではないので、半長 c_2/c_1 ではなく全長 $2c_2/2c_1$ で表記している。表面き裂、2次元き裂とも $2c_2/2c_1$ が小さいほど、そして $H_0/2c_1$ が小さいほどき裂が停留しやすいことがわかる。2次元き裂の停留しない範囲は、表面き裂の停留しない条件を安全側に包絡したN基準のさらに外側にある。つまり、表面き裂を2次元き裂として解析すると、力学的相互作用が大きく評価され、停留や合体の有無が安全側に評価されることになる。

Fig.8 Stress intensity factor of interacting cracks of the same size ($H=0$).

Fig.9 Conditions for arrest of smaller cracks for two-dimensional cracks and N-criterion obtained for three-dimensional cracks.

Table 1 Summary of growth pattern for each initial condition.

		S_{23} [mm]				
H_{23} [mm]		-15.0	-10.0	-5.0	0.0	5.0
	15.0	●	●	×	×	×
	12.5	●	●	×	×	×
	10.0	-	-	-	×	×
	7.5	●	●	×	×	×
	5.0	●	▲	×	×	×
	2.5	●	▲	●	×	■
	0.0	●	-	-	-	■
	-2.5	●	●	●	■	■
	-5.0	●	●	●	■	■

●:Pattern1
▲:Pattern2
■:Pattern3
×:Pattern4

Fig.10 Initial conditions for growth simulation for three cracks.

Pattern1	Pattern2
<p>Crack3</p>	
Pattern3	Pattern4

Fig.11 Change in crack length for each growth pattern.

3・2 3つのき裂の進展パターン

3つの2次元き裂について、初期位置関係を系統的に変化させたき裂進展シミュレーションにより、N基準の適用性について検討する。図4の平板上に初期き裂長さが $c_1 = c_0$, $c_2 = c_3 = 0.5c_0$ ($c_0 = 5$ mm) の3つのき裂を図10に示す位置に配置する。位置関係のうち、 $H_{12} = 2c_0$, $S_{12} = 0$ は固定して、 H_{23} と S_{23} を変化させた。Crack1 と Crack2 のみを考えた場合は、図9の結果ではCrack2が停留することになる。図10右図の黒点は、Crack3の左端の初期位置を示しており、図に示す40通りの H_{23} と S_{23} の組み合わせに対して進展シミュレーションを実施した。

3つのき裂の停留の有無の組み合わせによって、進展挙動を4つのパターンに分類した(図11)。初期位置と進展パターンの関係を表1に示す。 H_{23} と S_{23} はCrack2の右端を起点に、それぞれ上向きと右向きを正としている。パターン1は、Crack1のみが支配的に進展を続け、Crack2とCrack3は停留する。この場合、Crack1の進展に対する相互作用の影響は無視できる。パターン2ではCrack3のみが停留する。パターン3と4ではCrack2のみが停留する場合となっている。図12は図11の位置関係に対応する R_x の変化を示している。パターン4が最も速い進展となっているが、これはCrack1とCrack3の相互作用によるもので、Crack2はこれらのき裂の進展には影響を及ぼさない。この場合は、3つのき裂ではなく、Crack1とCrack3の2つのき裂を対象にした進展と考えることができることから、パターン3とは区別した。パターン4の進展は相対的に速いが、実質的には2つのき裂とみなせることから、Crack1とCrack3に対してN基準を適用すれば進展を安全側に予測できる。

パターン3では、パターン4と同じくCrack2は停留するが、図5に示した表面き裂の場合と同様に、停留後のCrack2は、Crack1とCrack3と相互作用を及ぼしあう関係にある。つまり、図11のパターン4の状態では、Crack2を取り除いてもCrack1とCrack3の進展にはほとんど影響しないと考えられるが、パターン3ではCrack2がないとCrack1とCrack3の進展速度は変化すると推測される。図13(a)にパターン3に分類されたケースの初期状態の一例を示す。先にも述べたように、初期状態($S=0$ の状態)におけるCrack1とCrack2の位置関係は、図13(b)の青点に示すように図9で停留すると判断された位置に相当する。停留するCrack2がCrack1の進展に及ぼす影響は小さいので、Crack1とCrack2の進展評価を行う場合はCrack2の存在を無視しても問題ない。一方、Crack2とCrack3は図9で停留しないと判断され、N基準を適用した場合には、評価上は合体したき裂として取り扱われる。合体後のき裂Crack2+3とCrack1は $S=0$ の位置関係にあり、図13(b)の赤点に示す位置関係となる。そして、Crack2+3は停留せず、合体すると判断される。このように、2つのき裂のみに着目した判断が、第3のき裂によって変化する場合がある。したがって、3つ以上のき裂に対してN基準を適用する際には、パターン3のようなケースが適切に評価されるようにしておく必要がある。また、図13(a)で、Crack2+3とCrack1の H は $2c_0$ としたが、Crack2とCrack3の荷重方向の中間点をとった場合は、 $H=2c_0+0.5c_0$ となる。式(1)では H_0 が $2c_1$ より大きくなると合体条件を満たさないので、 $H=2c_0+0.5c_0$ とした場合はCrack2+3とCrack1は合体しない。このように、合体後のき裂の位置の設定方法にも注意する必要がある。3つのき裂が相互作用を及ぼしあいながら成長する場合でも、合体の有無が適切に判断できれば、図4で示したとおり進展を安全側に予測することができる。

パターン2も、パターン3と同様に3つのき裂が相互作用を及ぼしあいながら進展しているように見えるが、 R_x の変化は、Crack1とCrack2の2つのき裂のみを考えた場合の進展(図12で2Cracksと示した場合)よりも遅い。これは、Crack1とCrack3の相互作用が、緩和効果によりき裂進展を減速する方向に作用したことによる。

Fig.12 Change in crack length for each growth pattern.

Fig.13 Modeling procedure of interacting three cracks for the pattern 3.

Fig.14 Modeling procedure for coalesced crack.

Fig.15 Crack growth assessment procedure for multiple cracks.

4. 多数き裂に対する合体評価手順

4・1 合体評価手順の提案

3つのき裂を対象にした場合でもき裂の合体の有無を適切に判断できれば、相互作用によるき裂進展の加速を考慮した進展予測が可能となる。ただし、図13で示したように、① $S = 0$ に到達した時点でN基準を満足しないと判断されても第3のき裂との合体によりN基準を満足するようになる場合、そして、② 合体後のき裂位置（H距離）の設定方法によっては評価結果が危険側になる場合を考慮できるようにする必要がある。まず、②の場合は、図14に示すモデル化を適用することで合体後のき裂位置を安全側に考慮できると考えられる。この図でCrack2とCrack3は合体するが、従来のモデル化では、合体によりき裂は同一平面上に移動する。合体前後で H_{12} と H_{34} の値が変わらないようにするためには、Crack1かCrack4を垂直方向に移動させる方法が考えられるが、その場合は H_{14} が変化する。図14では、合体後のき裂（Crack2+3）に H_{23} に相当する“厚さ”をもたせることで、合体によるHの変化が生じないようにしている。合体後のき裂の表面長さは維持規格と同様に、Crack2とCrack3の両端距離で、深さはCrack2とCrack3の深い方の値とする。厚さを有していてもK値の算出や進展評価は、厚さのない場合と同様に行う。

次に、①の場合を考慮するための評価手順を図15に示す。この図では、3つのき裂が成長にともない(a)から(d)に変化している。(a)の状態ではCrack1とCrack2は $S_{12} = 0$ （N基準による判定のタイミング）にあるが、Crack2が停留すると判断されると想定している。N基準はCrack2の停留の有無を判断するための基準であるが、図15ではN基準をCrack1とCrack2の合体の有無の判断する基準として用いる。つまり、Crack1とCrack2が合体しないと判断された場合でも、Crack2の進展評価を継続することで、他のき裂と合体する可能性を残す。そして、(b)において $S_{23} = 0$ になった時点で、Crack2はCrack3との合体を判断することになる。この手順によって、先のパターン3で見られたような進展挙動を考慮することが可能となる。

き裂進展評価の流れを図16に示す。図15でCrack1とCrack2の合体判断は $S_{12} = 0$ に到達した時点のみではなく、Crack2とCrack3が合体した時点（ $S_{12} < 0$ ）の状態でも実施しているが、図16ではこのケースがフォローできる流れとなっている。

Fig.16 Procedure for crack growth prediction for multiple cracks.

4・2 多数き裂に対する適用

提案した合体評価手順を、多数分布するき裂の進展評価に適用し、その妥当性を検証する。対象としたき裂の位置（左側の表面点座標）を表 2 に、き裂の分布を図 17 に示す。このき裂形状は、沸騰水型原子炉のシュラウドサポート部で発見された応力腐食割れ⁽²⁵⁾の初期き裂状態を想定している。本研究では疲労き裂進展を対象として検討しているが、式(2)の形式から得られる進展速度を用いる評価を前提にする場合は、き裂の停留の有無などのき裂挙動は応力腐食割れに対しても同様に適用できる。平板のサイズは図 6 と同一とし、初期状態における最大き裂長さは Crack6 の 10 mm ($=2c_0$) で、Crack1 は 6.5mm, Crack2 は 9.0 mm, Crack3 と Crack4 は 4.5 mm そして Crack5 は 8.0 mm とした。き裂の初期アスペクト比 (a/c) は全て 1.0 とし、初期位置におけるき裂間距離を表 3 に示した。

き裂進展シミュレーションで得られたき裂形状の変化を図 18、荷重方向に投影したときのき裂形状を図 19 に示す。図 5 の 3 つの表面き裂について示したように、き裂が進展してオーバーラップすると、き裂の相互作用が大きくなりオーバーラップした部分のき裂前縁が互いに近づく方向に変化すると同時に、応力緩和の影響で進展速度が低下する。投影面上のき裂形状は、き裂が重なった部分で進展速度が低下していることがわかる。き裂は相互作用を及ぼしあいながら進展したが、Crack4 は応力緩和の影響で進展量はわずかであった。

本研究で提案する合体評価手順による評価結果も図 19 に示した。K 値には図 6 の値を用いた。図 16 の評価手順にしたがった場合の、最終的な形状に至るまでの評価プロセスは以下になった。まず、初期位置においては Crack4 と Crack5 がオーバーラップしていたが、合体しないと判断された。そして 2.4×10^6 サイクルにおいて Crack3 と Crack5 が合体し、この合体き裂と Crack4 が合体すると判断された。ただ、Crack4 の合体は Crack3 と Crack5 の合体後のき裂のサイズには影響しなかった。この合体き裂に対して、 2.8×10^6 サイクルにおいて Crack2 が、 3.3×10^6 サイクルで Crack6 が、そして 3.8×10^6 サイクルで Crack1 がそれぞれ合体し、最終的に全てのき裂は 1 つとなった。

き裂両端長さ R_x およびき裂の最大深さの変化をそれぞれ図 20(a)および図 20(b)に示す。合体評価法による R_x の変化は進展シミュレーションよりも速いものの、その差は顕著でない。一方、最大深さは 3.0×10^6 サイクル以降は合体評価法による予測が進展シミュレーションより大きく上回る結果となった。これは、き裂を合体させたことにより、合体き裂のアスペクト比 a/c が小さくなり、深さ方向への進展が相対的に速くなったことに起因する。また、き裂サイズが異なる場合、合体評価によって合体後のき裂面積が大きくなる。き裂進展速度はき裂面積とも相関を有することから⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾、き裂進展を加速する要因となった。進展シミュレーションで深さが 17.4 mm に到達するまでのサイクル数は 3.83×10^6 であったが、合体評価方法では 3.5×10^6 サイクルと予想され、おおよそ 8.6%少ないサイクル数で到達している。

Fig.17 Crack distribution for growth simulation of multiple cracks.

Table 2 Crack locations of multiple cracks
(position of left tip on the surface).

	x	y
Crack1	0.0	0.0
Crack2	23.5	5.0
Crack3	40.0	10.0
Crack4	54.0	12.0
Crack5	49.0	17.0
Crack6	73.0	12.0

Table 3 Relative position of multiple cracks.

Crack No.		1	2	3	4	5	6
		H_{ij}					
1	S_{ij}		5.0	10.0	6.0	17.0	12.0
2		17.0		5.0	1.0	12.0	7.0
3		33.5	7.5		4.0	7.0	2.0
4		47.5	21.5	9.5		11.0	6.0
5		42.5	16.5	4.5	-3.0		5.0
6		66.5	40.5	28.5	14.5	16.0

Fig.18 Change in crack shape during crack growth simulation for multiple cracks.

Fig.19 Change in crack shape on the projected plane obtained by the crack growth simulation and crack growth assessment.

Fig.20 Change in crack size of multiple cracks.

5. 結 言

本研究では、長さの異なる2つのき裂に対して策定された合体判断基準（N基準）を3つ以上のき裂に適用する場合の妥当性を検証するとともに、き裂個数に関係なく適用できる評価手順の検討を行った。そして、以下の結果を得ることができた。

- (1) 3つのき裂の場合でも、N基準を用いて合体の有無が適切に判断できれば、安全側に進展評価を行うことができる。
- (2) き裂が停留すると判断された場合においても評価上は進展評価を継続すること、合体後のき裂形状に厚みをもたせることで、N基準を用いてき裂進展を安全側に予測することができる。
- (3) き裂個数に関係なく適用できる合体評価手順を提案した。
- (4) 提案した合体評価手順は多数のき裂が存在する場合に対して問題なく適用できることを確認した。

文 献

- (1) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格維持規格, JSME S NA1-2008 (2008), 日本機械学会.
- (2) Parkins, R. N., "The Application of Stress Corrosion Crack Growth Kinetics to Predicting Lifetimes of Structures", *Corrosion Science*, Vol.29 (1989), pp.1019-1038.
- (3) Kamaya, M., and Haruna, T., "Crack Initiation Model for Sensitized 304 Stainless Steel in High Temperature Water", *Corrosion Science*, Vol. 48 (2006), pp.2442-2456.
- (4) Murakami, Y., and Nemat-Nasser, S., "Interacting Dissimilar Semi-elliptical Surface Flaws under Tension and Bending", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16 (1982), pp.373-386.
- (5) 村上敬宜, 西谷弘信, "二つの等大半円形き裂の干渉における応力拡大係数", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 47 (1981), pp.295-303.
- (6) 釜谷昌幸, 北村隆行, "干渉する段違い表面き裂の応力拡大係数", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 68 (2002), pp.1112-1119.
- (7) 安藤清, 平田隆明, 飯田國廣, "複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播寿命評価, 第2報: 並列配置複数き裂問題", 日本造船学会論文集, Vol. 153 (1983), pp.352-424.
- (8) 釜谷昌幸, "き裂進展に及ぼす複数のき裂の相互作用", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66 (2000), pp.1491-1497.
- (9) 柴田勝之, 横山憲夫, 大場敏弘, 川村隆一, 宮園昭八郎, "複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播挙動評価法, (I) 表面欠陥付 SUS 304L 鋼製平板試験片の亀裂伝播試験結果と伝播評価法", 日本原子力学会誌, Vol.27 (1985), pp.250-262.

- (10) Suh, C. M., Lee, J. J., and Kang, Y. G., “Fatigue Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol.13 (1990), pp.487-496.
 - (11) Wang, Y. W., Ebtehaj, K., Hardie, D., and Parkins, R. N., “The Behaviour of Multiple Stress Corrosion Cracks in a Mn-Cr and a Ni-Cr-Mo-V Steel: I-Metallography”, *Corrosion Science*, Vol. 37, No. 11 (1995), pp. 1651-1675.
 - (12) Frise, P. R., and Bell, R., “Modelling Fatigue Crack Growth and Coalescence in Notches”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 51 (1992), pp. 107-126.
 - (13) Frise, P. R., and Bell, R., “Fatigue Crack Growth and Coalescence at Notches”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 14 (1992), pp. 51-56.
 - (14) Kamaya, M., “A Crack Growth Evaluation Method for Multiple Interacting Cracks”, *JSME International Journal (Series A)*, Vol. 46 (2003), pp.15-23.
 - (15) Kamaya, M., and Totsuka, N., “Influence of Interaction between Multiple Cracks on Stress Corrosion Crack Propagation”, *Corrosion Science*, Vol. 44 (2002), pp.2333-2352.
 - (16) 釜谷昌幸, 三代川栄一, 菊池正紀, “複数き裂の相互作用を考慮した進展予測方法 (長さの異なる表面き裂の繰返し引張および曲げ荷重下での進展)”, 日本機械学会論文集A編, Vol. 77 (2011), pp.552-563.
 - (17) Fish, J., Markolefas, S., Guttal, R., and Nayak, P., “On Adaptive Multilevel Superposition of Finite Element Meshes”, *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 14 (1994), pp.135-164.
 - (18) Maiti, S. K., “Finite Element Computation of Crack Closure Integrals and Stress Intensity Factors”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 41 (1992), pp.339-348.
 - (19) Rybicki, E. F., and Kanninen, M. F., “A Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9 (1977), pp.931-938.
 - (20) Richard, H. A., Fulland, M., and Sander, M., “Theoretical Crack Path Prediction”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 28 (2005), pp.3-12.
 - (21) Kamaya, M., Miyokawa, E., and Kikuchi, M., “Growth Prediction of Two Interacting Surface Cracks of Dissimilar Sizes”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77 (2010), pp.3120-3131.
 - (22) Kamaya, M., “Growth Evaluation of Multiple Interacting Surface Cracks (Part II: Growth Evaluation of Parallel Cracks)”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75 (2008), pp.1350-1366.
 - (23) Nishitani, H., and Murakami, Y., “Stress Intensity Factors of an Elliptical Crack or a Semi-elliptical Crack Subject to Tension”, *International Journal of Fracture*, Vol.10 (1974), pp.353-368.
 - (24) 菊池正紀, 高橋真史, 和田義孝, Yulong LI, “重合メッシュ法を用いた疲労き裂進展シミュレーション (第2報, 二つの段違いき裂の相互作用の検討)”, 日本機械学会論文集A編, Vol. 74 (2008), pp.1243-1248.
 - (25) 日本原子力発電, “敦賀発電所1号機のシュラウドサポート部損傷の調査状況について(平成12年4月20日プレスリリース資料)”, <http://www.japc.co.jp/news/press/2000/pdf/120420.pdf> (参照日 2013年3月14日).
 - (26) Kamaya, M., “Stress Intensity Factors of Surface Crack with Undulated Front”, *JSME International Journal (Series A)*, Vol. 49, (2006), pp.529-535.
 - (27) Kamaya, M., “Growth Evaluation of Multiple Interacting Surface Cracks (Part II: Growth Evaluation of Parallel Cracks)”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75 (2008), pp.1350-1366.
-