

# 突合せ溶接継手における軸方向亀裂の進展予測手順\*<sup>1</sup> (半円より深い亀裂や溶接境界部での停留する亀裂の進展予測)

An axial crack growth prediction procedure initiated at butt welded joint  
(Growth prediction for surface crack deeper than semi-circular  
and that retarded at weld fusion line)

釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya) \*<sup>2</sup>

**要約** 亀裂構造物の構造健全性は亀裂進展予測により評価される。日本機械学会維持規格では、亀裂進展予測は表面点と最深点の応力拡大係数を用いて実施される。その際、半円より深いき裂ではない半楕円形状が仮定され、半円より深いき裂は許容されていない。しかし、実際にはニッケル合金溶接金属で発生した応力腐食割れは溶接界面で進展が停止し、半円より深くなる。さらに、亀裂形状は半楕円より矩形に近くなる。本報では、ニッケル合金溶接金属での応力腐食割れの進展予測を行う際の日本機械学会規格の手順の妥当性を検証した。亀裂成長は自動メッシュ機能を併用した有限要素解析により模擬された。様々な溶接残留応力と溶接界面でのき裂成長の停留が模擬した結果、日本機械学会規格で規定されている亀裂成長予測手順は亀裂が半円より深くなる場合でも安全側の予測をもたらすことが示された。また、溶接界面で表面方向の進展が停留する場合でも、日本機械学会の手順によって深さ方向の亀裂成長が保守的に予測できることが明らかになった。また、溶接界面でのき裂停留を予測において考慮する場合は、亀裂形状は矩形でモデル化するべきであることが示された。

**キーワード** 維持規格, 亀裂視点, PWSCC, ニッケル合金, 溶接, 自動メッシュ技術, 原子力発電プラント

**Abstract** Structural integrity of cracked pipes is assessed by predicting crack growth. In the fitness-for-service code of the Japan Society of Mechanical Engineers(JSME), the crack growth is predicted using stress intensity factor at the deepest and surface points. A semi-elliptical crack is assumed not to become deeper than a semi-circular crack. However, in reality, the stress corrosion cracking initiated at nickel alloy welds stops growing at the fusion line and becomes deeper than a semi-circular crack. Furthermore, crack shape is close to a rectangular shape rather than a semi-elliptical shape. In this study, validity of the JSME code procedure was discussed for predicting the growth of stress corrosion cracking at nickel alloy welds. Crack growth was simulated by finite element analysis together with an auto meshing technique. Various residual stress distributions and retardation of the crack growth at the fusion line were considered in the simulation. It was demonstrated that the growth prediction procedure prescribed in the JSME code brought about a conservative prediction even if the crack became deeper than the depth of a semi-circular shape crack. It was revealed that, when the growth to the surface direction was retarded at the fusion line, the change in crack size in the depth direction could be predicted conservatively by the current JSME procedure. It was suggested that, when the retardation at the fusion line is assumed in the growth prediction, the crack shape should be modelled by a rectangular shape.

**Keywords** Fitness-for-service, Crack growth, PWSCC, Nickel based alloy, Weld, Automeshing technique, Nuclear power plant

## 1. 緒言

日本機械学会の発電用設備規格維持規格<sup>(1)</sup> (以後、維持規格)における亀裂進展予測では、実際の

亀裂形状を半円または半楕円 (以後、まとめて半楕円と表記する) にモデル化するように規定している。そして、表面点と最深点の2点における応力拡大係

\*<sup>1</sup> 日本機械学会論文集, Vol. 83, No.858 (2018) (DOI: 10.1299/transjsme.17-00457) より転載

\*<sup>2</sup> (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

数 (K 値) から, 表面方向と深さ方向それぞれの進展量を算出し, 半楕円形状を維持させながら進展予測を行う. その際, 亀裂のアスペクト比 (深さ  $\times$  2 / 表面長さ) は, 半円形状に相当する 1 を超えないように制限している. 深さ方向の進展が表面方向よりも速く, アスペクト比が 1 を超える場合は, 表面長さを大きくしてアスペクト比が 1 の半円形状に置き換える. アスペクト比を 1 以下に制限する理由として, 曲げや引張りなどの応力に対する進展ではアスペクト比が 1 を超えるような成長は考えられないこと, 一般的な K 値解はアスペクト比が 1 以下のものを対象にしていることが考えられる.

残留応力下での応力腐食割れ (SCC) による亀裂進展では, 残留応力分布によってはアスペクト比が 1 を超えることも考えられる. また, 亀裂成長速度の材料依存性によってもアスペクト比が 1 を超える場合もある. 図 1 に示すように, 原子力発電プラントでは, 低合金鋼とステンレス鋼の継手部は, ニッケル合金によって溶接される. 加圧水型原子炉の一次系環境下では, ニッケル合金に SCC が発生することが知られているが, 低合金鋼やステンレス鋼では, SCC が発生・進展しない, または, 発生・進展しにくい. したがって, ニッケル合金で発生した SCC は, 亀裂先端が低合金鋼または, ステンレス鋼まで進展すると, 図 1 に示すように進展が停止すると予想される. 結果として, アスペクト比が 1 を超える亀裂形状になる. アスペクト比を 1 以下に制限している現状の維持規格の評価手順が, このような進展に対しても問題なく適用できる (安全側に予測できる) ことを確認しておく必要がある. 一方, 検査間隔の設定や, 亀裂が実際に発見された場合の原因究明のためには, 安全側の予測ではなく, 現実に近い予測も求められる. 図 1 に示すような亀裂進展挙動を模擬するためには, 亀裂形状を半楕円ではなく矩形などでモデル化する方法も考えられる.

本報では, 図 1 のような突合せ溶接継手において発生した軸方向の SCC の進展予測を行う場合に, 現状の維持規格の手順が妥当であることの検証と, より合理的な予測を行うための手順の検討を行った. 亀裂形状や応力分布に依存して亀裂前縁の位置によって K 値が変化する. 本報では, 亀裂前縁の各位置での K 値に対応した進展を模擬することで実際の進展挙動を再現できると仮定する. これに対し, 亀裂形状を半楕円や矩形にモデル化したり, 表面点と最深点の K 値のみを用いて進展予測を行っ

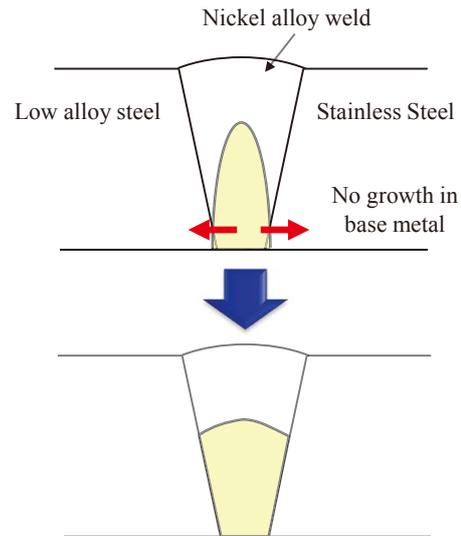


Fig. 1 A schematic drawing representing crack growth behavior of stress corrosion crack initiated at Nickel weld. The crack is difficult to go into low alloy steel and stainless steel.

たりする予測手順が, どの程度実際の進展挙動を模擬できるかを調べる. 実際の進展挙動の再現解析と半楕円亀裂の進展解析には自動メッシュ亀裂進展解析コード FE-CRACK<sup>(2)</sup> を用いた. このコードでは, 任意の亀裂形状に対応する有限要素メッシュの自動作成と, Abaqus による有限要素解析を行う. また, 亀裂を矩形でモデル化する場合の進展解析には, 矩形亀裂のメッシュを自動生成する RECT-CRACK<sup>(3)</sup> を適用した.

## 2. 解析方法

### 2.1 概要

亀裂前縁の K 値を有限要素解析で算出し, 進展速度を予測することで亀裂進展を模擬した. 有限要素解析で K 値は亀裂前縁上の各節点で算出される. そのため, 亀裂前縁の位置によって亀裂成長量が異なり, 半楕円形状の亀裂であっても成長後の形状が必ずしも半楕円になるとは限らない. 一様な引張りや曲げ荷重のように単純な荷重が負荷される場合, 亀裂形状は半楕円形状で近似できる<sup>(4)</sup>. しかし, 残留応力のような複雑な応力分布の場合は, 亀裂の前縁の位置によって作用する応力が変化し, 亀裂形状が半楕円形状から逸脱する可能性がある. FE-CRACK は, 指定した亀裂形状に対して有限要素メッシュ分割を自動的に行う機能を有している<sup>(2)</sup>. 一方, RECT-CRACK では, 矩形の亀裂形状を維持

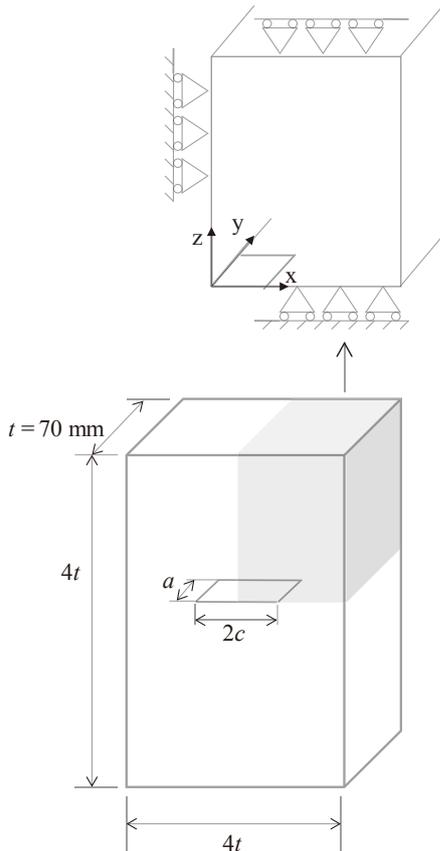


Fig.2 Cracked plate model for crack growth simulation. The stress intensity factor was calculated by finite element model with the boundary conditions shown in this figure.

しながら、亀裂の成長に応じてメッシュ分割を自動的に行う<sup>(3)</sup>。いずれのソフトウェアでも、亀裂進展量の算出に必要なK値をAbaqusによる有限要素解析により求める。

図2に示すような、平板に存在する表面亀裂を対象とした。平板の厚さ $t$ は70 mmとし、幅 $W$ 、長さ $B$ は $4t$ とした。対称性を考慮し1/4モデルを、図3に示すようにメッシュ分割した。メッシュ分割に対する妥当性はFE-CRACKについては文献<sup>(2)</sup>、RECT-CRACKについては文献<sup>(3)</sup>で検証されている。

### 2.2 解析条件

亀裂形状は、図2で示すように、深さを $a$ 、長さを $2c$ で定義する。ヤング率は180 GPa、ポアソン比は0.3の弾性材料を想定した。

一次冷却材管のニッケル合金溶接部での残留応力 $\sigma_{RS}$ として、以下の3種類の分布を仮定した(図4参照)。

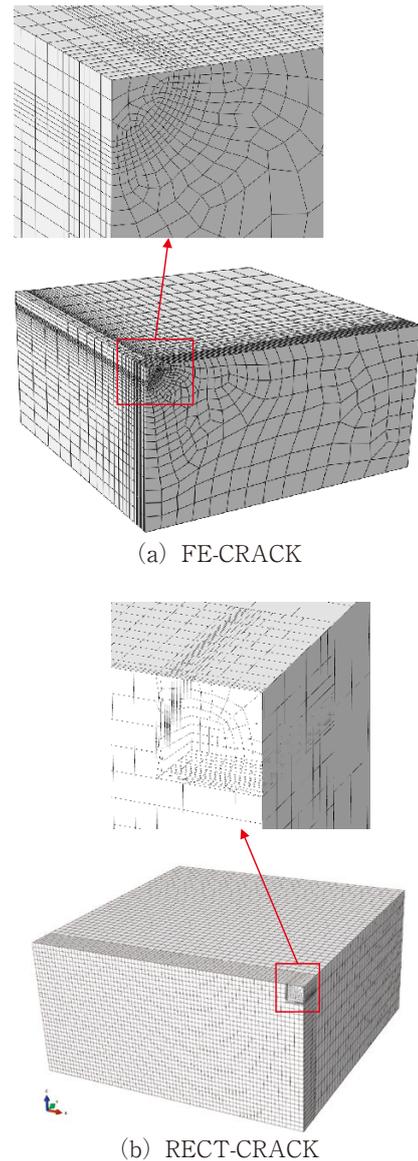


Fig.3 Typical finite element meshes used for crack growth simulations ( $a = c = 7$  mm,  $t = 70$  mm,  $W = 140$  mm,  $B = 140$  mm).

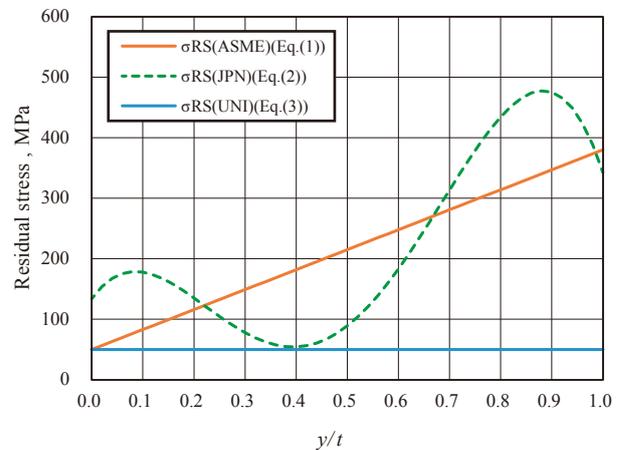


Fig.4 Residual stresses in the circumferential direction assumed in the crack growth simulations.

Table 1 Growth procedures considered in crack growth simulation using FE-CRACK and RECT-CRACK.

Mode	Procedure
Mode 1 (Basic Mode)	Crack shape is altered using growth rate calculated at each node along the crack front (for simulating actual growth behavior)
Mode 2 (Follows FFS code, allows $a/c > 1$ )	Crack growth is calculated at the surface and deepest points and crack keeps semi-elliptical or semi-circular shape.
Mode 3 (Follows FFS code, not allow $a/c > 1$ )	The same as Mode 2 although crack shape is not allowed to be $a/c > 1$ . The crack shape is replaced with semi-circular one when $a/c > 1$ . This procedure is the same as that prescribed in JSME FFS code.

$$\sigma_{RS(ASME)} [\text{MPa}] = 330 \frac{y}{t} + 50 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{RS(JPN)} [\text{MPa}] = & -9850.8 \left( \frac{y}{t} \right)^4 + 17887.9 \left( \frac{y}{t} \right)^3 \\ & - 8996.4 \left( \frac{y}{t} \right)^2 + 1167.8 \left( \frac{y}{t} \right) + 134.1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sigma_{RS(UNI)} [\text{MPa}] = 50 \quad (3)$$

ここで、 $y$ は表面から亀裂深さ方向の距離を示す。式(1)は、米国機械学会で提案されている周方向応力分布となっている<sup>(5)</sup> (以後、 $\sigma_{RS(ASME)}$ と表記する)。この式は、容器ノズル部のニッケル合金溶接部のSCC亀裂進展を予測するための代表的な値とされており、モックアップによる測定結果、複数機関によるベンチマーク解析の結果から決定されている。SCCの発生する内表面で50 MPa、外表面では350 MPaとなる。式(2)は国内のプラントを対象にしたニッケル合金溶接部の残留応力分布<sup>(6)</sup>となる (以後、 $\sigma_{RS(JPN)}$ )。そして、式(3)は参照のために設定した一様応力分布となる (以後、 $\sigma_{RS(UNI)}$ )。解析では、残留応力に内圧 $P_i$ と、内圧によるHoop応力を考慮した。具体的には、内径 $D_i = 700$  mm、厚さ70 mmの配管を想定したHoop応力 $P_i \times D_i / (2t)$ と内圧の和に相当する $6P_i$ の圧力を亀裂面へ付与することになる。内圧をおおよそ15.4 MPaとして、 $(\sigma_{RS} + 100)$  MPaを亀裂面に付与してK値を算出した。

亀裂進展速度 $da/dt$ は、維持規格の事例規格 (ニッケル合金のPWR一次系水質環境中のSCC亀裂進展速度)<sup>(7)</sup>において、ニッケル合金 (600合金) 溶接金属の亀裂進展速度として規定されている次式を適用した。

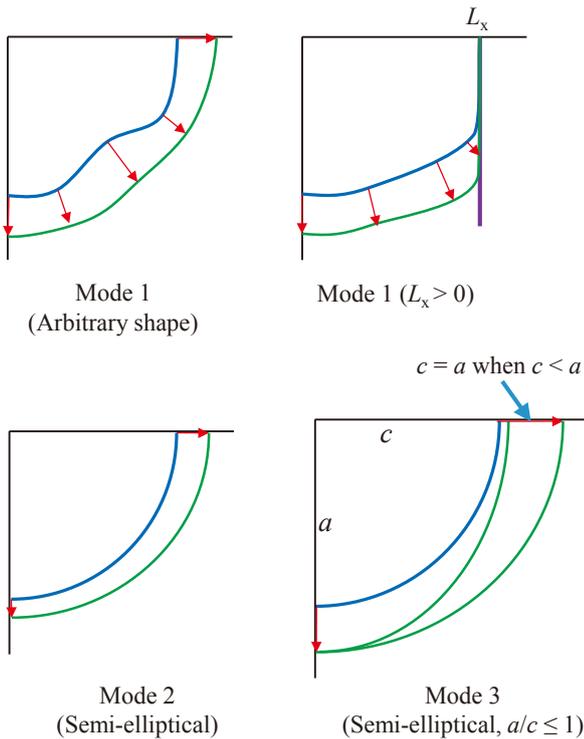
$$\frac{da}{dt} = 1.70 \times 10^{-14} K^{2.42} \quad (4)$$

単位は $da/dt$ が [m/s]、 $K$ が [MPa m<sup>0.5</sup>] となる。この式は、国産材 (132合金および82合金) を用いて、試験条件、試験方法を実機条件に合わせて取得された試験データ<sup>(8)</sup>を基に策定された。実験データの上限ではなく、平均値が採用されている。

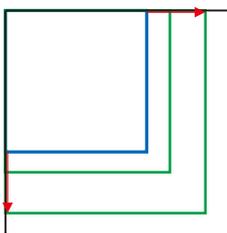
### 2.3 亀裂進展方法

亀裂進展方法としては、表1に示した3つの進展手順 (進展モード) を考慮した。これらのモードに従った進展方法を図5に模式的に示した。RECT-CRACKではモード2のみが対象となる。モード1はFE-CRACKの本来の機能を活用した方法で、亀裂前縁の各節点で算出されたK値にしたがって亀裂形状を変化させながら進展を模擬する。本報では、この方法による進展が実機を模擬していると考え、基本モードと位置づける。モード2とモード3では維持規格と同様に、表面点と最深点 (矩形亀裂の場合は中央点) の2点のK値のみを用いて進展を予測する。したがって、モード2とモード3では亀裂形状は、半楕円形状または矩形形状に限定される。モード3ではさらに、アスペクト比が1を超えないという制限を設ける。したがって、モード3が維持規格に従った進展予測方法となる。これらの進展方法に加え、表面方向に亀裂長さの制限 $L_x$ を設定した場合も想定する。これは、図1においてニッケル合金溶接金属に発生・進展した亀裂が低合金鋼、またはステンレス鋼との境界で停留することを模擬している。つまり、 $L_x$ は溶接金属幅の2分の1に相当し、 $L_x = 10$  mmまたは20 mmとした。

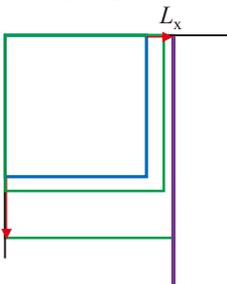
初期の亀裂深さは $a = 7$  mm ( $a/t = 0.1$ )、表面長さは $c = 7$  mmとした。一様荷重下でアスペクト比がおおよそ0.9になることから<sup>(4)</sup>、初期のアスペクト比を $a/c = 1$ とした。時間 $t_m$ あたりの各節点での亀裂進展量 $\Delta a$ は次式で算出した。



(b) For FE-CRACK



Mode 2

Mode 2 ( $L_x > 0$ )

(b) For RECT-CRACK

Fig. 5 Crack growth modes assumed in crack growth simulations. Table 1 describes the details of each mode.

$$\Delta a = \frac{da}{dt} \times t_m \quad (5)$$

時間  $t_m$  は、最深点（中央点）における  $\Delta a$  が  $0.01a$  となるように決定した。  $\Delta a$  は前縁上の各節点にお

ける  $K$  値に応じて算出されるが、その亀裂進展方向は、亀裂前縁各点の法線方向とする。

亀裂深さが板厚の80%を超えた時点で解析を終了した。この手順に従うと、進展解析終了までに、 $K$  値をおおよそ207回計算することになる。

### 3. 解析結果 (FE-CRACK)

#### 3.1 基本モード(モード1)による進展解析

基本となるモード1による解析結果を図6に示す。残留応力が  $\sigma_{RS(ASME)}$  の場合、半円形状の初期亀裂は深さ方向に相対的に速い進展となり、縦長の（アスペクト比が1以上の）亀裂に成長した。この変化は、深くなるほど大きくなる残留応力分布に対応している。モード1では、任意の亀裂形状を許容するが、得られた亀裂形状は半楕円に近い形状となった。残留応力が  $\sigma_{RS(JPN)}$  の場合は、深さ方向よりも表面方向への進展が顕著であった。形状も、残留応力分布の複雑な変化に対応して変化している。一様な残留応力  $\sigma_{RS(UNI)}$  の場合、亀裂はほぼ半楕円形状を維持しながら進展した。

#### 3.2 維持規格の手順による解析 (モード2およびモード3)

表面点と最深点の  $K$  値から、表面方向と長さ方向の進展のみを計算するモード2、および、その際のアスペクト比が1を超えないように制限するモード3の計算結果を図7に示す。これらの進展モードでは、亀裂形状は半楕円形状を維持する。比較のため、モード1の結果を併せて示すが、残留応力が  $\sigma_{RS(ASME)}$  の場合、モード2の結果はモード1とほぼ一致した。一方、残留応力が  $\sigma_{RS(JPN)}$  または  $\sigma_{RS(UNI)}$  の場合は、モード2が安全側の予測となった。モード1が実際の進展を模擬していると考え、モード2の進展予測は実際に近く、かつ、安全側の予測となっている。つまり、表面点と最深点の2点の  $K$  値を用いる維持規格の進展予測方法の妥当性を裏付ける結果となった。

モード3では、アスペクト比が1を超えないように制限しているが、残留応力が  $\sigma_{RS(JPN)}$  と  $\sigma_{RS(UNI)}$  の場合は、モード2の場合でもアスペクト比が1を越えなかったため、モード2とモード3の結果は一致した。  $\sigma_{RS(ASME)}$  の場合は、亀裂は初期の半円形

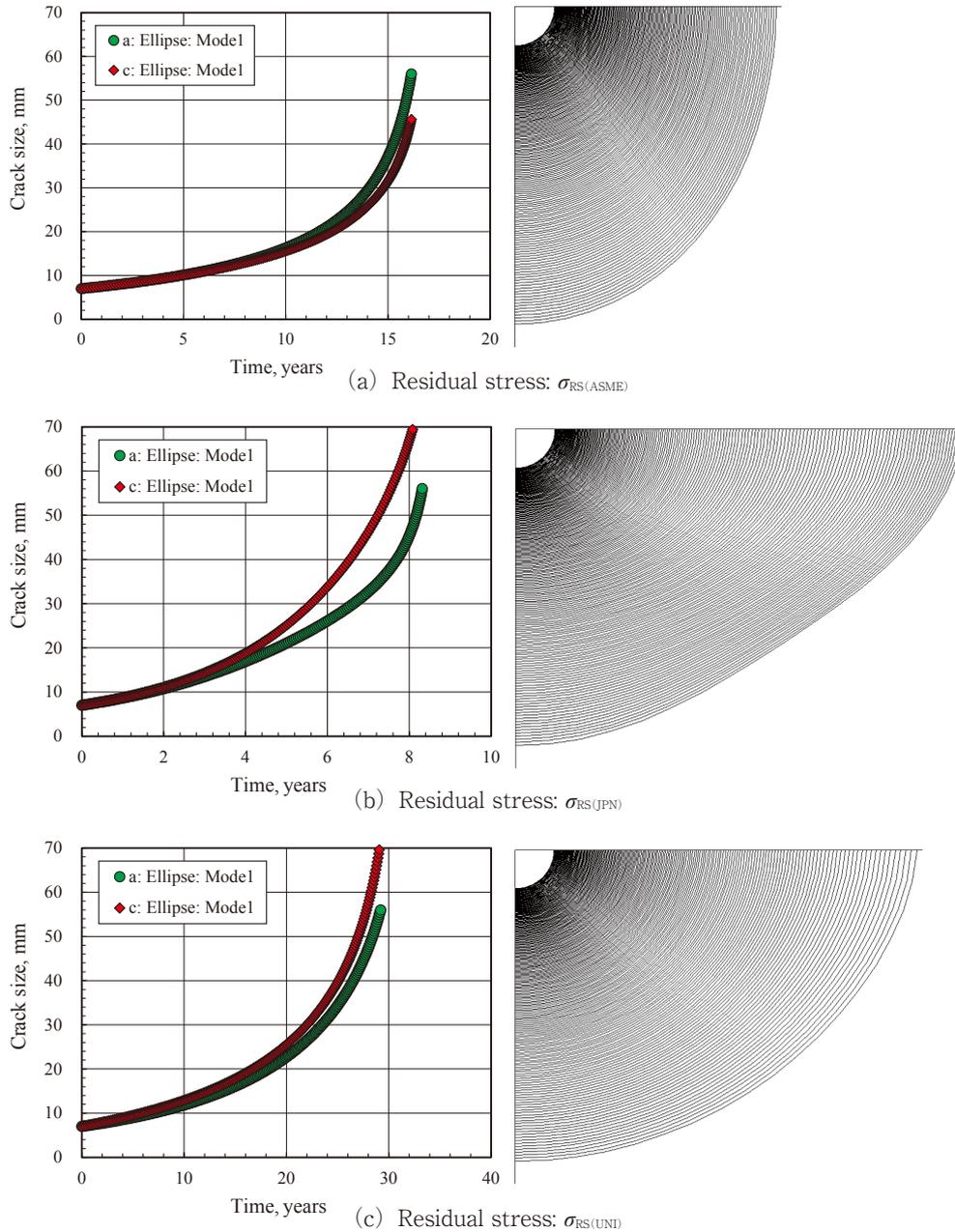


Fig. 6 Crack growth simulation results conducted for Mode I. The growth behavior depended on the residual stress distribution.

状態を維持したまま進展している。そして、その進展速度はモード1の場合に比べて速い。一般的に、亀裂面積が大きくなるほどK値は大きくなる。アスペクト比を1以下とするためには、表面方向に予測値以上の進展を仮定することになり、亀裂面積はモード2の場合よりも大きくなる。したがって、モード3は、モード1およびモード2よりも速い進展となった。現在の維持規格では、アスペクト比が1を超えることを許容していないが、1以上のアスペクト比を許容することで合理的な進展予測が可能と

なる。

### 3.3 亀裂長さ制限 $L_x$ の影響

残留応力 $\sigma_{RS(ASME)}$ に対して亀裂の長さを最大 $L_x$ に制限したモード1の結果を図8に示す。亀裂の表面長さが最大 $L_x$ で制限されている様子が再現されている。結果として、亀裂は深さ方向に進展し、板厚の80%に到達した。この進展は、亀裂が溶接金属を進展し、母材部で亀裂進展が停留することを模

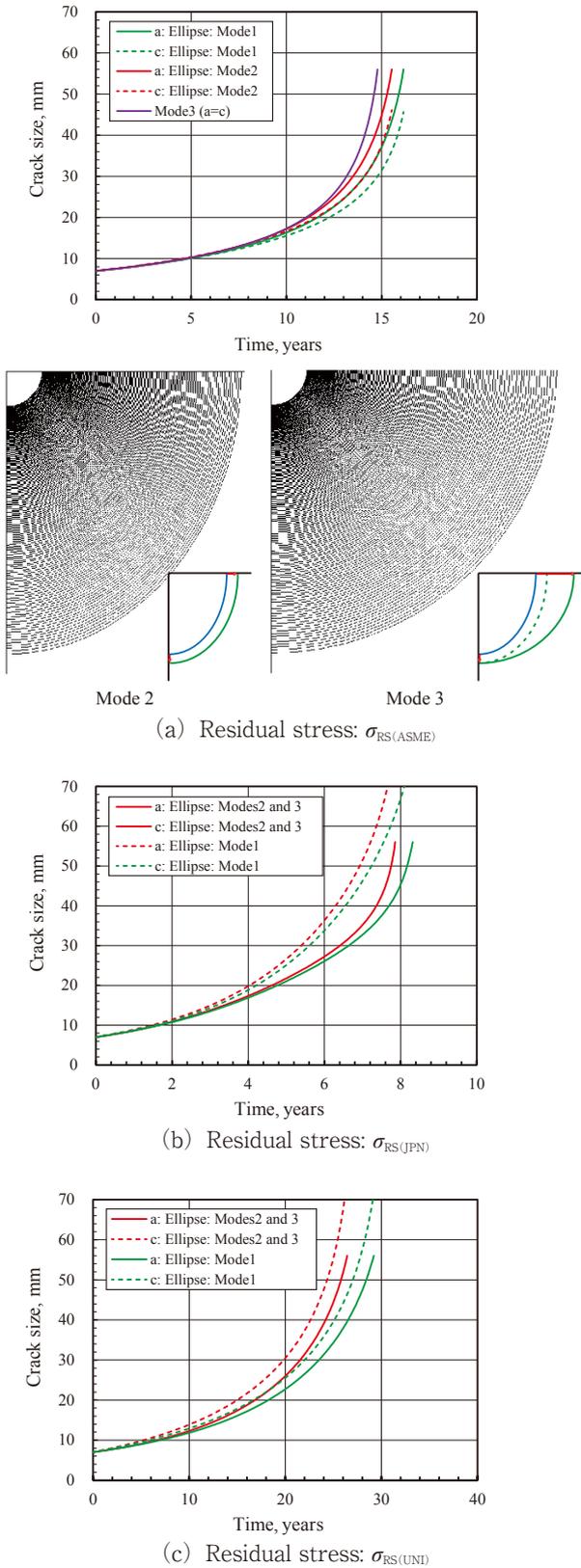


Fig. 7 Crack growth simulation results conducted for Modes 2 and 3. The cracks kept semi-elliptical in shape. The results of Modes 2 and 3 were the same for the

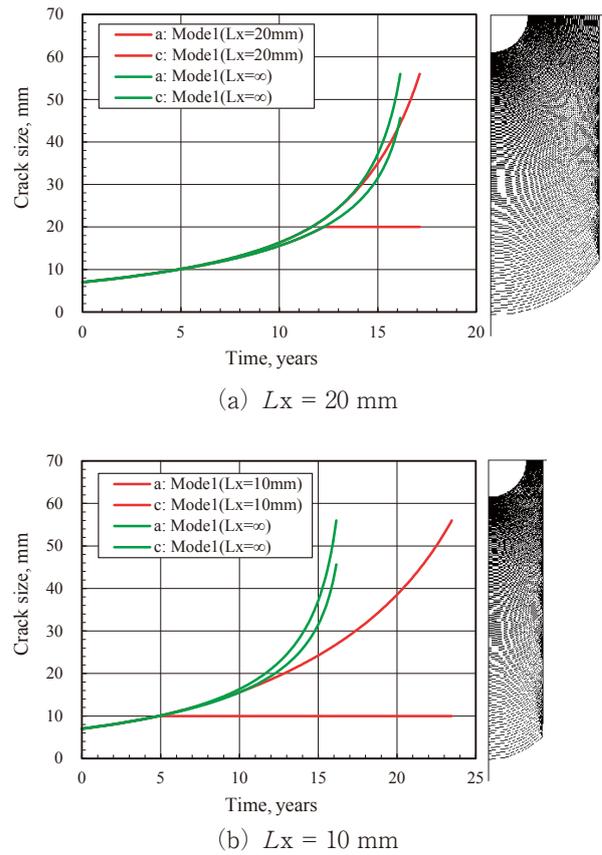
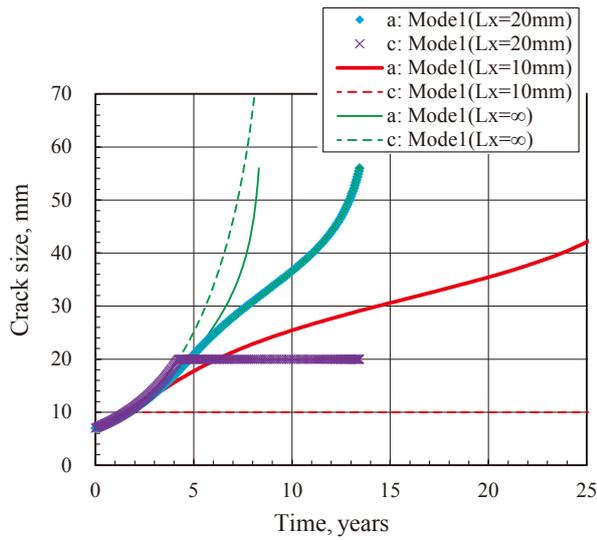


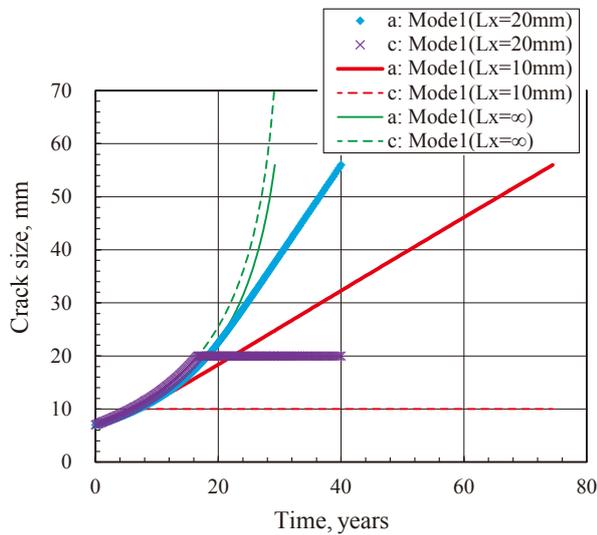
Fig. 8 Crack growth simulation according to Mode 1 considering limitation in growth in the surface direction. The surface length can be larger than  $L_x$ . Residual stresses of  $\sigma_{RS(ASME)}$  was applied.

擬している。  $L_x$  による制限を仮定することで、制限のない場合（図中で“ $L_x = \infty$ ”と表示）の進展よりも遅くなった。つまり、実機において亀裂進展が停留すると、深さ方向の進展が遅くなると考えられる。そして、その進展は、  $L_x$  の制限のないモード1によって安全に予測できる。  $L_x$  が小さくなるほど、進展が遅くなっている。これは、  $L_x$  による制限のため亀裂面の面積が小さくなるためと考えられる。図9に示すように、残留応力が  $\sigma_{RS(JPN)}$  と  $\sigma_{RS(UND)}$  の場合も同様の結果が得られた。つまり、進展に対して溶接境界で進展が停留する場合でも、現状の維持規格の手順にしたがえば安全側の進展予測ができる。

維持規格では亀裂形状は半楕円形状としてモデル化される。モード2の解析において  $L_x = 20 \text{ mm}$  とした場合、図10に示すように、亀裂は半楕円形状を維持しながら進展することになる。表面長さが  $L_x$  に到達した時点で表面方向の進展は停止し、半楕円形状を維持しながら、深さ方向にのみ進展する。



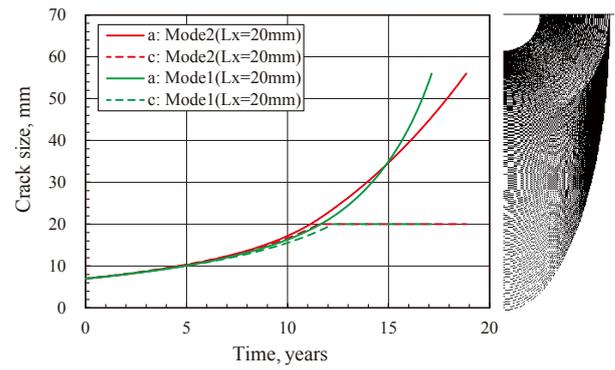
(a) Residual stress:  $\sigma_{RS(JPN)}$



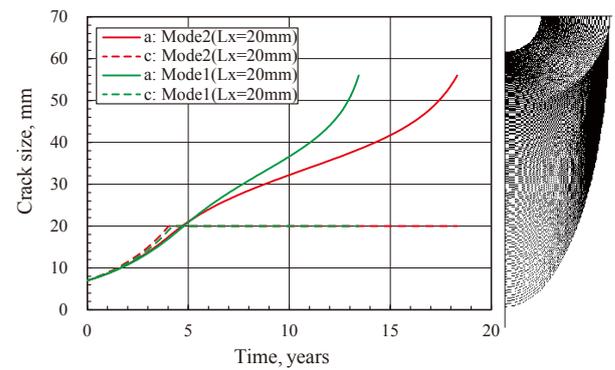
(b) Residual stress:  $\sigma_{RS(UNI)}$

Fig. 9 Crack growth simulation according to Mode 1 with limitation of growth in the surface direction  $L_x$ . Residual stresses of  $\sigma_{RS(JPN)}$  or  $\sigma_{RS(UNI)}$  was applied.

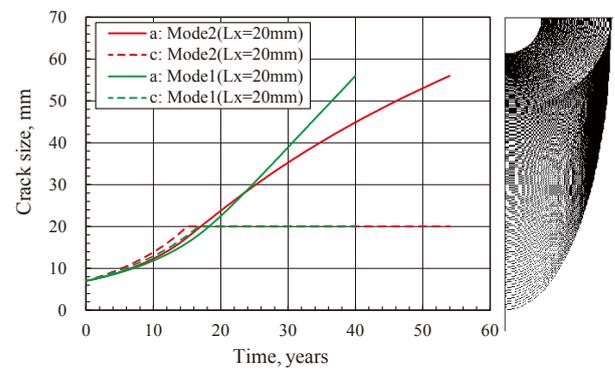
$L_x = 20 \text{ mm}$ としたモード1の結果と比較すると、モード2の予測は危険側となっている。つまり、モード1の予測が実機を想定していると考えた場合、溶接境界での亀裂の停留を考慮したモード2による予測は、危険側となる場合がある。図は省略するが、 $L_x = 10 \text{ mm}$ とした解析におけるモード1とモード2差は、 $L_x = 20 \text{ mm}$ とした場合より大きくなった。亀裂が母材に進展しないと想定された場合でも、解析上は進展するとした ( $L_x$ による制限を設定しない) 解析を実施する必要がある。



(a) Residual stress:  $\sigma_{RS(ASME)}$



(b) Residual stress:  $\sigma_{RS(JPN)}$



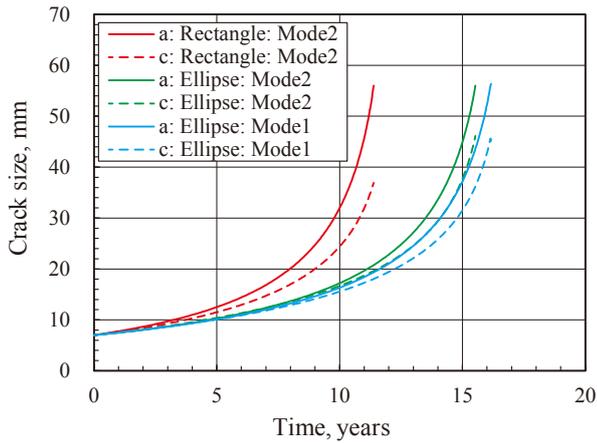
(c) Residual stress:  $\sigma_{RS(UNI)}$

Fig. 10 Crack growth simulation according to Mode 2 considering the limitation in the growth in the surface direction. The crack kept semi-elliptical shape and the surface length could not be larger than  $L_x$ .

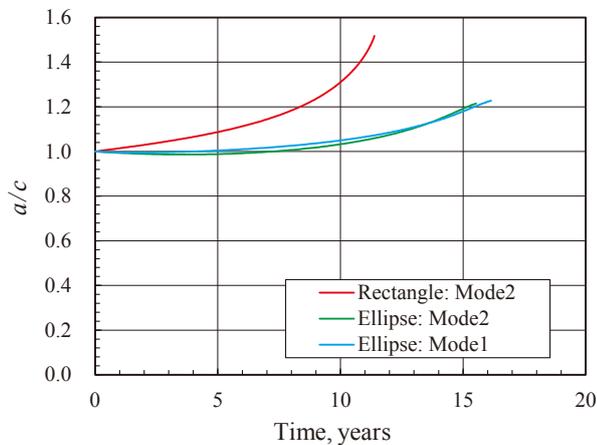
#### 4. 解析結果 (RECT-CRACK)

##### 4.1 残留応力 $\sigma_{RS(ASME)}$ の場合の進展

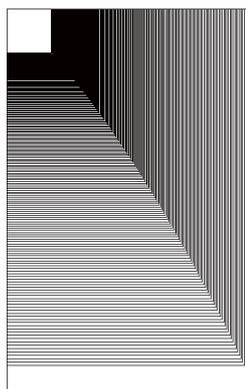
矩形亀裂の進展に関する基本的な特徴を考察するために、残留応力が  $\sigma_{RS(ASME)}$  の場合の解析結果を



(a) Change in crack size



(b) Change in aspect ratio



(c) Change in crack shape

Fig. 11 Crack growth simulation results obtained by RECT-CRACK code. The Mode 2 growth rule was applied for a surface crack of rectangular shape.

図11に示す。K値は矩形形状の前縁に沿って算出されるが、進展計算には表面点と中央点におけるK値を用いて、表面方向と深さ方向の進展量を計算

した。FE-CRACKによるモード1とモード2の結果も併せて示すが、矩形亀裂でモデル化した結果が、半楕円形状でモデル化した場合（モード2）より明らかに速いことがわかる。モード1と比べると、矩形でモデル化した場合の進展予測は、安全側となった。図には、アスペクト比 $a/c$ の変化も示したが、矩形でモデル化した場合のアスペクト比は、FE-CRACKよりも大きくなり、その変化は亀裂形状からも確認できる。

$a = c = 7$  mmの半円と矩形形状の亀裂に対する解析で得られた前縁に沿ったK値の分布を図12に示す。矩形亀裂のK値は同じ亀裂寸法の半円亀裂に比べて大きくなった。とくに、中央点でのK値の差が大きく、その差によって、深さ方向の進展が相対的に速くなり $a/c$ が大きくなったと考えられる。一方、矩形のコーナー部近傍ではK値が相対的に小さく、コーナー部ではK値が急減に減少する特異点となった。

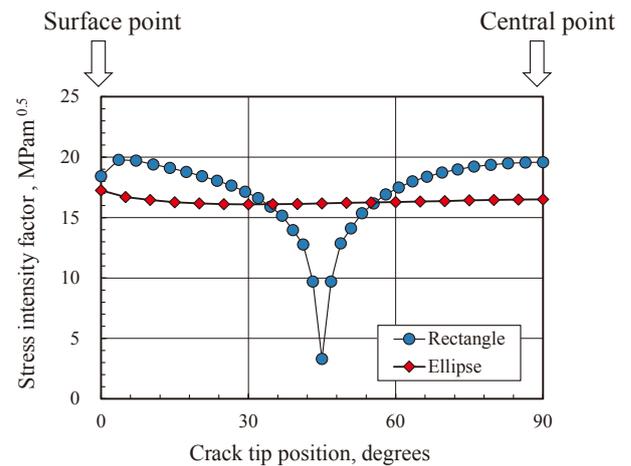
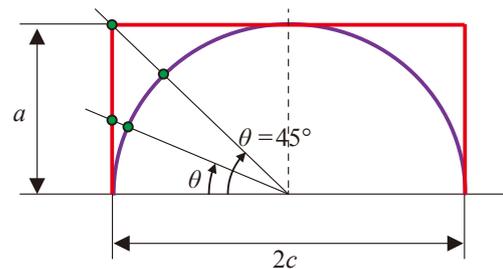


Fig. 12 Comparison of stress intensity factors along crack front for semi-circular and rectangle cracks. Calculations were conducted for  $a = c = 7$  mm and  $\sigma_{RS(ASME)}$ . The stress intensity factor of the rectangle crack was larger than that of semi-circular crack.

## 4.2 亀裂長さ制限 $L_x$ の影響

FE-CRACKを用いて、表面方向に亀裂長さの制限  $L_x$  を設定した場合の亀裂形状は、半楕円というよりはむしろ、矩形に近かった。また、維持規格の進展評価方法に近いモード2によって、 $L_x$  を設定した場合の進展予測は、実際の進展を模擬したモード1の進展を危険側に予測した。したがって、溶接部の進展を模擬する場合は、亀裂を矩形でモデル化することが選択肢の一つとして考えられる。そこで、 $L_x$  を 10 mm とした場合に、矩形でモデル化した亀裂の進展解析結果を図13に示す。比較のために、FE-CRACKのモード1を用いて、 $L_x$  を設定した場合の結果も示す。

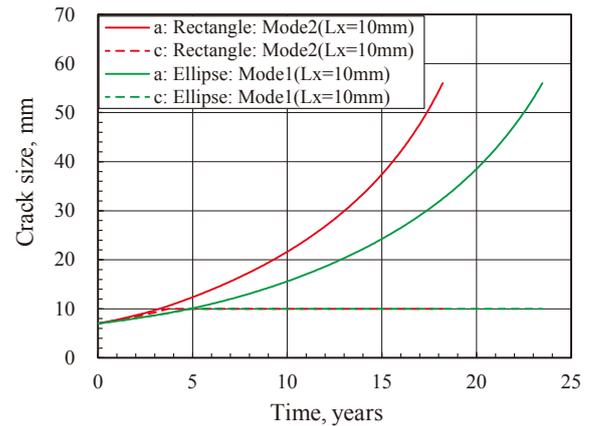
いずれの残留応力に対しても、モード1の結果(実機を模擬した解析)よりも安全側の予測となっている。モード1の結果は矩形に近く、また、矩形亀裂のK値は中央点で相対的に大きくなったことから、矩形亀裂による進展解析(モード2)は安全側の予測になったと考えられる。図には  $L_x = 10$  mm の結果を示したが、 $L_x = 20$  mm の場合は、矩形亀裂の進展予測がさらに安全側となった。

## 5. 考 察

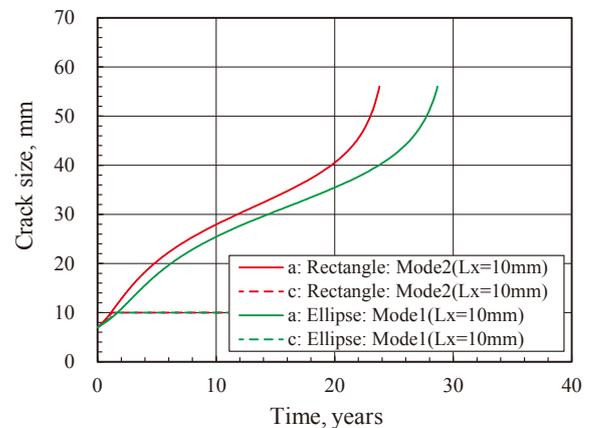
### 5.1 亀裂を矩形でモデル化することの妥当性

本報では、ニッケル合金の溶接金属に発生したSCCの進展予測を行うことを想定し、アスペクト比が1よりも大きくなる場合、および亀裂進展が継手界面で停留する場合 ( $L_x$  を設定する場合) を想定し、維持規格での進展予測方法を検討した。とくに、半楕円でモデル化されている亀裂を、矩形形状でモデル化することの是非について考察した。

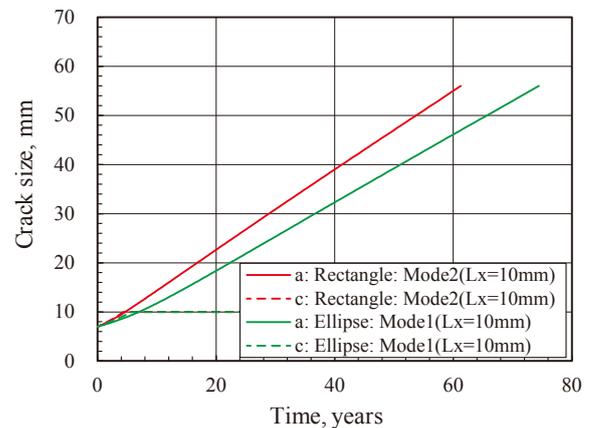
半楕円形状で亀裂をモデル化した場合、アスペクト比が1より大きくなる場合でも、モード2の方法によってSCCの進展が妥当に予測できることが示された。一方、ニッケル合金に発生したSCCがステンレス鋼や低合金鋼に進展しないことを解析上模擬する場合 ( $L_x$  を設定する場合) は、モード2の進展は危険側の予測になった。この対応として、 $L_x$  を設定する場合は矩形でモデル化することで、実際の進展を模擬した解析(モード1で  $L_x$  を設定した場合) を安全側に予測できた。



(a) Residual stress:  $\sigma_{RS(ASME)}$



(b) Residual stress:  $\sigma_{RS(JPN)}$



(c) Residual stress:  $\sigma_{RS(UNI)}$

Fig. 13 Crack growth simulation obtained using RECT-CRACK code with limitation of growth in the surface direction.

維持規格の評価を考えた場合、配管に発生した周方向の亀裂をモデル化する際も、矩形でモデル化する方法が考えられる。周方向亀裂では、厳密な半楕円でのモデル化はできない。対応方法として、半楕

円形状を円弧上に写像変換する方法，または半楕円形状を配管断面に重ね合わせる方法の2通りが考えられるが，維持規格では，どちらの方法を選択するかは規定されていない。また，亀裂が表面方向に進展し，アスペクト比が極端に小さくなると，表面近傍の亀裂形状は大きく歪むことになる。これに対し，矩形亀裂は，図14に示すように，一定深さの円周亀裂として一意に定義することができる。亀裂が表面方向に進展して，アスペクト比が小さくなる場合，その形状は，半楕円よりも，矩形（一定深さの円周亀裂）でモデル化の方が妥当であるとの考え方もできる。さらに，維持規格において周方向亀裂の極限荷重を算出する際の亀裂形状は，矩形形状を想定している。進展評価と破壊評価の一貫性の観点からも，矩形形状でモデル化することを許容することも選択肢の一つとして考えられる。

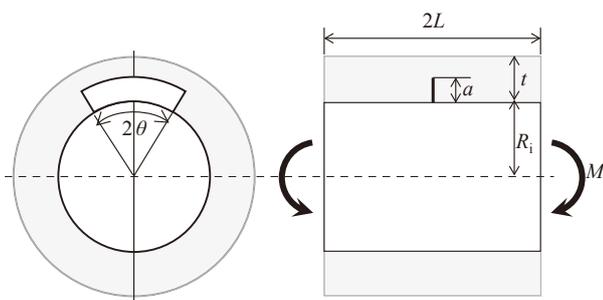


Fig. 14 Possible modeling procedure for a circumferential surface crack. The uniform crack depth is assumed.

## 5.2 進展予測において考慮すべき事項

本報では，FE-CRACKによるモード1の予測が実際の進展挙動である（または，それに近い）として，各種の解析結果を比較・検討してきた。しかし，実際の亀裂進展が必ずしもモード1で模擬できるとは限らない。FE-CRACKによるモード1の解析で考慮できていない事項として以下が挙げられる。

- ①材料変形特性（ヤング率など）の材料毎の違い（界面で不整合応力が発生する可能性がある）
- ②進展速度の異方性（組織に沿った深さ方向の進展が，表面方向よりも速い可能性がある）
- ③亀裂は2次元平面内を進展すると仮定しているが，実際には面外に進展する可能性もある。
- ④実際の亀裂進展は配管軸方向に進展することが想定されるが，解析では全て平板内を進展する

と仮定した。

そもそも，亀裂進展速度や残留応力にはばらつきが存在することから，実際の進展を予測するという観点からは，予測誤差はさらに大きくなる可能性がある。維持規格では，実用的に適用可能で，工学的に妥当と判断できる方法として，現在の手順が規定されている。そこでは，亀裂進展速度がK値によって予測できることが前提となっている。本報のモード1の解析では，K値にしたがって，材料特性の不均一分布や速度の異方性を考慮せずに，亀裂を同一平面状に進展させるという維持規格と同じ考え方で，進展を模擬した。維持規格の考え方が妥当とする前提では，モードIを基本モードと位置づけることは問題ないと考えられる。しかし，本解析を踏まえた進展予測手順の検討においては，上記の①から④に加え想定する亀裂進展速度や残留応力の妥当性についても留意する必要がある。

## 6. 結 言

任意の亀裂形状に対してK値を算出する機能を有するFE-CRACKと矩形亀裂を対象に進展解析が実施できるRECT-CRACKを用いて，残留応力下での亀裂進展を模擬した。種々の条件の解析結果から，進展予測手順の検討を行った。その結果，以下の結論を得ることができた。

- (1) 現在の維持規格で規定されている  $a/c \leq 1$  でモデル化するという制約は，残留応力下での亀裂進展を予測する段階では，撤廃しても問題ないことを確認した。
- (2) 異材界面などで進展が制限される場合でも，表面方向の進展に制限がないと仮定して進展を予測することで，評価上は安全側の予測ができる。
- (3) 逆に，進展の制限があると仮定して，半楕円の亀裂進展を予測した場合 ( $L_x$ を設定したモード2による予測) は，実際の進展（モード1による解析）を危険側に予測する可能性がある。
- (4) 亀裂形状を半楕円ではなく矩形でモデル化しても，時間に対する亀裂深さの変化は安全側に予測できる。
- (5) 表面方向の進展が制限される場合 ( $L_x$ を設定

する場合)を想定して進展予測を安全側に行うためには、亀裂形状は半楕円でなく、矩形でモデル化の方がよい。

## 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 NA1-2016 (2016).
- (2) Kamaya, M., Stress intensity factors of surface crack with undulated front, JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, Vol.49 (2006) , pp.529-535.
- (3) Kamaya, M., J-integral solutions for surface crack inside pipe under bending load, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 3 (2009) , pp.1115-1126.
- (4) Kamaya, M., Growth evaluation of multiple interacting surface cracks (part I: experiments and simulation of coalesced crack) , Engineering Fracture Mechanics, Vol.75 (2008) , pp.1336-1349.
- (5) Broussard, J. E., Standard through-wall distributions of dissimilar metal weld residual stress, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2015) , paper no.45950.
- (6) Ogawa, N., Muroya, I., Iwamoto, Y., Hojo, K., Ogawa, K., Kingston, E. and Smith, D. J., Residual stress evaluation of dissimilar weld joint using reactor vessel outlet nozzle mock-up model (Report-2) , Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (2009) , paper no.77269.
- (7) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 事例規格 (ニッケル合金のPWR一次系水質環境中のSCCき裂進展速度) , JSME NA-CC-006 (2010).
- (8) 原子力安全基盤機構, 平成17年度Ni基合金応力腐食割れ (SCC) 進展評価技術調査 (定荷重試験) に関する報告書, 06基材報-0012, 平成18年7月 (2006).