

高温水中のステンレス鋼における複数き裂の発生及び成長挙動

Initiation and Propagation of Multiple Cracks of Stainless Steel in High Temperature Water Environment

釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya)* 千葉 吾郎 (Goro Chiba)*
中島 宣雄 (Nobuo Nakajima)* 戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)*

要約 環境助長割れにおけるき裂の発生挙動は、成長挙動と同様に応力や温度、水質などの環境の影響を大きく受ける。また、き裂の発生挙動自体も成長挙動に対し影響を及ぼす。この影響の典型的なものは、接近するき裂の合体や、応力緩和域でのき裂成長の停滞現象などの複数のき裂の相互作用として観察される。このき裂の発生挙動が成長へ与える影響を把握することは、比較的多数のき裂が観察される環境助長割れの寿命予測では重要である。

本研究ではき裂の発生挙動が成長挙動へ与える影響を評価した。第一に、き裂の発生挙動へ与える応力の影響を評価するために、溶存酸素を模擬した高温水中で鋭敏化ステンレス鋼の4点曲げ試験を実施した。次に、この結果を入力条件とした有限要素法にて複数き裂の相互作用を考慮したき裂の発生、成長シミュレーションモデルを作成し、これによりき裂の発生及び成長挙動が寿命へ与える影響を考察した。その結果、き裂発生数は応力が大きくなるほど増える傾向にあること、また、き裂発生数の増加はき裂進展を促進し、寿命を短くする方向へ作用することなどの事実が明らかになった。

キーワード き裂発生、環境助長割れ、ステンレス鋼、有限要素法、き裂進展シミュレーション

Abstract Environmentally assisted crack initiation behavior is greatly affected by applied stress and environmental factors, such as water temperature, contained impurities and so on. Crack initiation behavior also influences crack propagation. A typical example of this influence can be observed as the interference effects of multiple cracks, such as the coalescence of approaching crack tips or the arrest phenomena in the relaxation zone of an adjacent crack. To understand these effects of crack initiation on crack propagation behavior is very important to predict the lifetime of components, in which relatively large number of cracks tend to occur. This study aimed at revealing the crack initiation behavior and the influence of this behavior on propagation. At first, to evaluate the effect of applied stress on crack initiation behavior, sensitized stainless steel was subjected to a four-point bending test in high temperature water environment at the constant potentials of +50mV SHE and +150mV SHE. Secondly, a crack initiation and growth simulation model was developed, in which the interference effect of multiple cracks is evaluated by the finite element method, based on the experimental results. Using this model, the relationship between crack initiation and propagation was investigated, and it was revealed that the increasing number of the cracks accelerates crack propagation and reduces life.

Keywords crack initiation, environmentally assisted cracking, stainless steel, finite element method, crack growth simulation

1. 緒言

応力腐食割れや腐食疲労などの環境助長割れ (Environmentally Assisted Cracking, 以後 EAC) に

おけるき裂の発生及び進展挙動は、水質などの環境や応力の影響を大きく受ける。しかし、その影響の大きさは環境水中に存在するイオン種によりき裂の発生のみが促進され、成長に対する効果が少ない場

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

合やその逆の場合もある⁽¹⁾⁽²⁾など、発生及び進展挙動それぞれで違う。一般に原子力プラントを構成する機器材料の経年劣化を予測する場合、何10年オーダーの劣化を模擬するために、試験においては通常の運転状態より温度や応力を上げたり、さらには低ひずみ引張速度試験のように強制的に歪みを与えたりすることにより、劣化を加速する手法が用いられる。多くの場合、このような加速環境下ではき裂進展のみが加速されるのではなく、き裂発生も加速され多数のき裂が発生する⁽³⁾⁽⁴⁾。き裂発生数の増加は、き裂の進展過程においてき裂相互の干渉効果を増大し、進展に大きな影響を与える⁽⁵⁾。従って、試験結果より加速効果を差し引いて実際のプラント運転状態での劣化を評価する際には、き裂進展速度の加速のみに着目するのではなく、加速環境のき裂発生に与える影響、及びき裂発生と進展へ与える影響を考慮する必要がある。

本研究では以上のような問題に対し、環境がき裂の発生、進展挙動に与える影響、及びき裂の発生挙動がき裂進展に与える影響を考察した。そのため、まず高温水中で鋭敏化ステンレス鋼の4点曲げ試験を実施し、負荷応力のき裂発生及び進展挙動に与える影響を考察した。そして得られた試験結果を入力条件として、平面上に分布する複数のき裂の相互作用を考慮したき裂発生、成長シミュレーションによる解析を行い、き裂発生挙動のき裂進展及び寿命へ及ぼす影響について考察を行った。

2. 試験方法

試験には1050 30分の溶体化処理後、650 24時間の鋭敏化処理した304ステンレス鋼を使用した。この材料の化学成分を表1、機械的性質を表2に示す。これを75×25×8.6の平板試験片状に加工し、表面を6μm仕上げまで研磨した。この試験片上に25×20の応力が均一に負荷される部分ができるように4点曲げで荷重を負荷する。荷重には周期10分の三角波形の変動を与え、その応力比 R (最小応力/最大応力)は0.1及び0.9の2種類を適用した。水質は脱気した250の高温水(500ppmB+2ppmLi+2.7ppmH₂)にCl⁻、SO₄²⁻をそれぞれ40ppb添加した環境とした。また、溶存酸素環境を模擬するため、

試験片にECP+50とECP+150mVの2種類の電位を負荷した。

以上の条件で、設定された試験時間後に試験片を取り出し、表面を走査型電子顕微鏡により最高500倍の倍率で観察し、20μm以上のき裂について、その数と長さを測定した。発生及び進展に与える外乱を避けるため、き裂観察のために試験を中断した試験片は再使用せずに、それぞれの試験毎に別の試験片を用いた。実施した試験条件の一覧を表3に示す。

表1 供試材の化学組成 (mass %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
0.054	0.52	1.48	18.44	9.74	0.01	0.001	0.024

表2 供試材の機械的性質 (室温)

0.2% 耐力 (MPa)	引張り強さ (MPa)	伸び (%)	ヤング率 (MPa)
205	581	87.4	195385

表3 試験条件及び結果

試験 No.	試験条件				試験結果	
	最大 応力 (MPa)	応力比	試験 時間 (hr)	電位 (mV SHE)	き裂数	最大き 裂長さ (μm)
M1	300	0.9	200	+50	1	1180
M2	300	0.9	500	+50	11	2780
M3	300	0.9	1000	+50	21	6020
M4	300	0.9	200	+150	1	200
M5	300	0.9	500	+150	15	2590
M6	300	0.9	1000	+150	10	1350
P1	200	0.9	1000	+50	0	-
P2	250	0.9	1000	+50	7	34
P3	250	0.9	2000	+50	10	1888
P4	275	0.9	2000	+50	12	2764
F1	300	0.1	200	+50	1	4890
F2	300	0.1	250	+50	Sub-cracks	Penetration
F3	300	0.1	500	+50	1	600
F4	300	0.1	200	+150	1	2567
F5	300	0.1	500	+150	2	1930
F6	300	0.1	500	+150	0	-

3. 試験結果及び考察

試験後に観察されたき裂の数と最大き裂長さを表3に示す．それぞれの試験は，き裂発生数の試験時間，応力，応力比の影響を調べる為にパラメータを変化させ実施している．図1は試験M1～6で得られた最大応力300MPa，応力比0.9とした場合の時間に対するき裂発生数の変化を示す．M6の1000時間のデータを除けば，き裂は時間と共に単調増加する様子がわかる．この傾向は最大応力250MPaの試験P2，P3の結果からも見ることができる．図2は応力比0.9，試験時間1000時間の条件での最大応力のき裂発生数に与える影響を示す．データは試験M3,6，P1,2及びP4の結果を用いた．ここで，

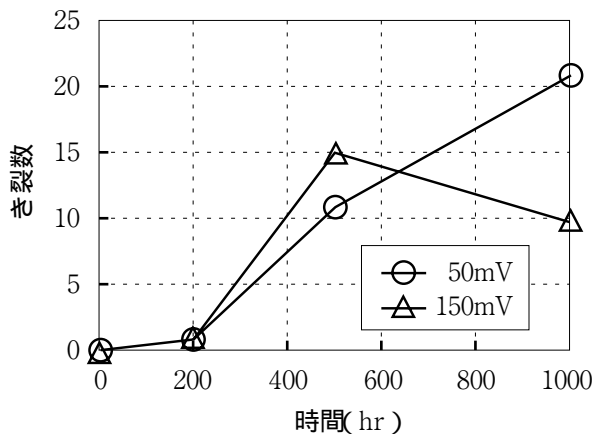


図1 試験時間とき裂発生数の関係 (試験 M1～M6)

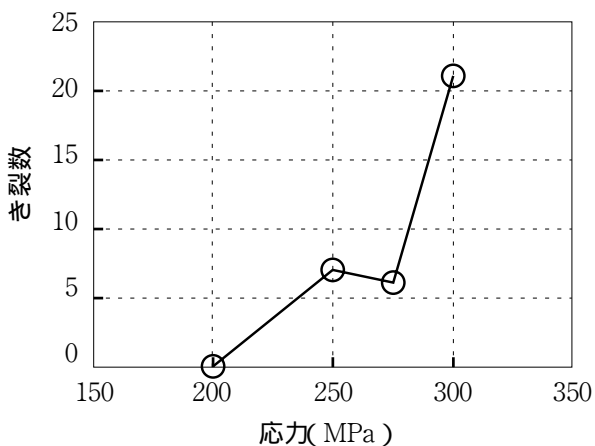


図2 負荷応力のき裂発生数の関係
(試験 M3, M6, P1, P2, P4)

275MPaのデータはP4の2000時間の結果に0.5をかけた値を用いた．この結果よりき裂発生数と応力には相関のあることがわかる．また，200MPaで発生数が0であること及び直線の傾きから，き裂の発生する応力には降伏応力付近で下限界値が存在することが推測できる．

F1～6の試験は最大応力300MPa，応力比0.1の条件で実施した．最大応力が同じ300MPaで，応力比が0.9のM1～6の試験と比較すると，き裂発生数が少ない結果となっている．また最大き裂長さもばらつきが大きく，さらに，F2の試験については250時間にてき裂が表面を貫通し試験が中断された．腐食疲労における応力比のき裂進展に対する影響は，応力拡大係数範囲 K の関数で表され， K に対する単調増加となることが知られている⁶⁾．一方，応力比のき裂発生に及ぼす影響については明確でない．本研究の試験結果からは，応力比の低下がき裂発生を促進することではなく，逆に抑制する傾向を示した．つまり，応力比の影響はき裂の進展と発生に対し，促進と抑制という相反する効果をもたらした．き裂の発生が抑制された要因として，応力比の違いから試験片に負荷される荷重の時間積分値が少なくなることが考えられる．最大き裂長さのばらつきが大きくなった原因も，このき裂発生の抑制と，進展の促進効果によると考えられる．一旦き裂が発生すると速い進展速度で成長し，結果としてき裂長さのばらつきが大きくなり，F2の試験でみられたようにき裂の貫通も発生する．

以上の結果，き裂発生数が負荷応力の時間積分値と相関があり，き裂が発生する負荷応力にしきい値が存在することが推測された．これらの結果を基に，き裂発生数と時間の関係を表すパラメータとして次式の C_f を仮定する．

$$C_f = \int_0^t \max(\sigma - \sigma_{th}, 0) dt \quad (1)$$

ここで σ_{th} は，き裂発生のしきい値となる荷重で図2の結果より200MPaとする．また， $\max(a, b)$ は a と b の大きい方の値をとる関数を表す．すなわち，(1)式では $\sigma - \sigma_{th}$ の正の部分のみを積分することを意味する．表3のすべての試験条件に対し， C_f を計算しこの値とき裂発生数の関係をプロットしたも

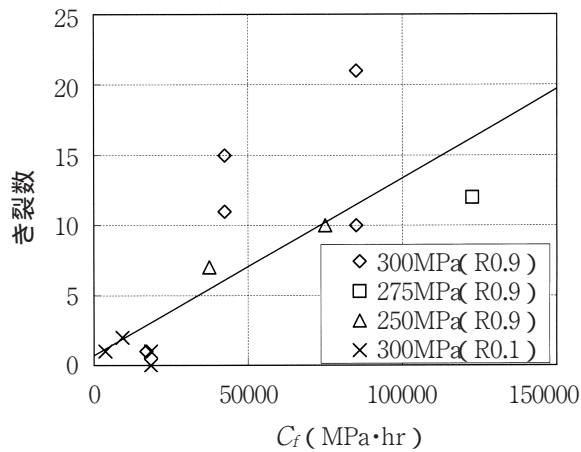


図3 パラメータ C_f とき裂発生数の関係

のを図3に示す．若干のばらつきはあるものの，時間，負荷応力，応力比の違う条件の結果を C_f により整理できることがわかる．

M1 ~ 6 の試験片上なき裂の分布の様子を図4,5に示す．図中で $200\ \mu\text{m}$ 以下のき裂は“ ”の記号で示している．き裂が時間とともに発生，進展している様子が見られる．M3, M5 の試験片では，比較的長いき裂が集中して分布する傾向が見られる．また，図3においてき裂発生数が多い方へ逸脱したデータがM3, M5と一致することから，長いき裂の存在はき裂先端付近での応力集中を引き起こすため，き裂発生数を増加させると考えられる．

図4及び図5で示した試験M2, M3で観察されたき裂の長さ分布を，ワイブル確率紙にプロットした

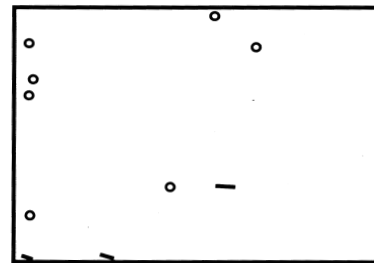
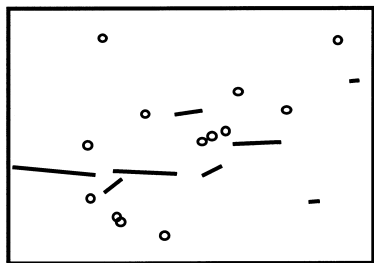
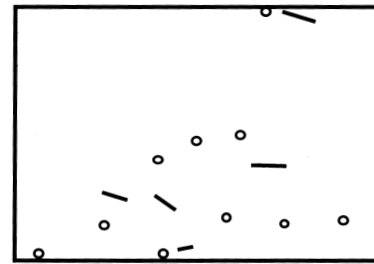
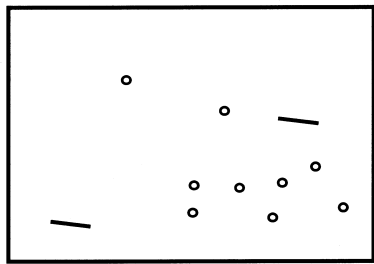
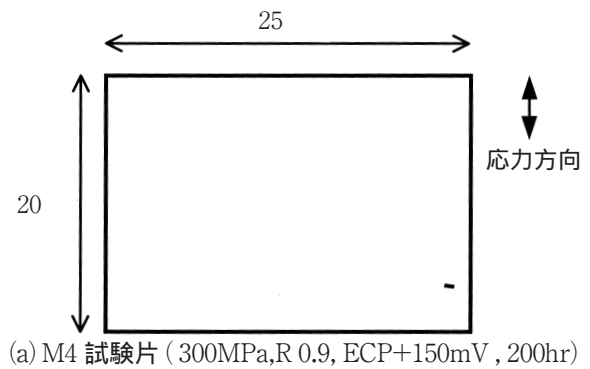
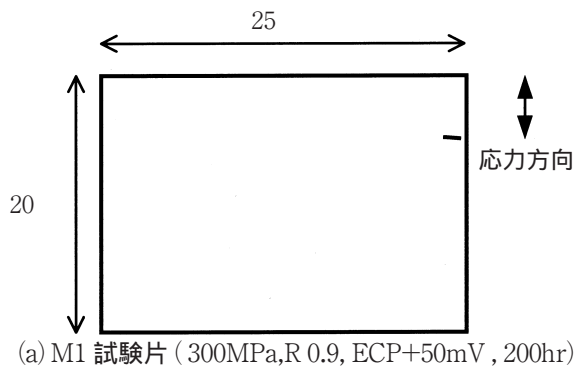


図4 M1, M2 及び M3 試験片表面なき裂分布状況

図5 M4, M5 及び M6 試験片表面なき裂分布状況

ものを図 6 に示す．ワイブル分布におけるき裂長さの累積分布関数 $F(x)$ は次式で表される．

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{m}\right)^m\right\} \quad (2)$$

ここで λ , m は、それぞれ尺度母数、位置母数、形状母数を表す．500hr の結果はデータ数が少ないことより傾向が明確でないが、1000hr の結果からは、き裂長さ分布が長さ 120 μm で分布形態が変化する複合ワイブル分布に従うことがわかる．EAC や疲労により発生するき裂長さ分布が、ワイブル分布に従うということはこれまでも報告されており⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、さらに 1000hr の分布のように、分布が屈曲した複合形態をとることも報告されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾．その中では、複合分布の解釈として分布が屈曲するまでのき裂の短い領域ではき裂の進展速度が遅く、屈曲するき裂長さ以上のき裂は進展速度が速くなる 2 つの成長ステージが存在すると考察されている．また、この 2 つのステージの機構論的な解釈については、不動態皮膜の破壊挙動の違いに着目した報告がある⁽¹²⁾．そこでは、遅い成長が粒界腐食による進展で、それ以上の速い成長は EAC による進展であると解釈されている．また、き裂先端のひずみ速度に関する考察から、あるしきい長さ以下の微小き裂では、進展速度の K 値依存性が小さく、 K 値に対して一定の速度で進展するという報告もある⁽¹³⁾．

M1 ~ 6 で観察された主なき裂について、表面研

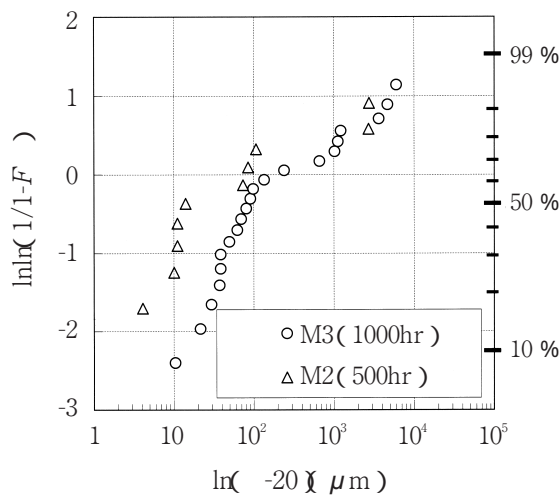


図 6 M 2 及び M 3 試験片表面で観察されたき裂の分布(ワイブル確率紙)

削により最深点でのき裂深さを調べた．そして、それぞれのアスペクト比(深さ/表面半長)を図 7 に示す．アスペクト比に関しては、明確な傾向は見られず単純平均では約 0.85 であった．

4. シミュレーションによる考察

4.1 シミュレーション手法

これまでの実験結果より、き裂発生に対する時間、負荷応力及び応力比の影響が明らかになった．これらの関係を用いてき裂発生挙動の進展に与える影響を計算機シミュレーションにより考察する．平面上に分布するき裂の相互作用を考慮した進展挙動をモンテカルロシミュレーションで評価した報告はあるが⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾、それらはき裂の位置関係から決定される単純なルールに従って相互作用を考慮している．しかし、き裂の相互作用はき裂の相対長さや位置関係により複雑に変化する⁽⁵⁾ことから、これらの手法では正確な評価ができない．そこで、本研究ではこの複数き裂の相互作用をより正確に評価する為に、複数き裂の分布する平面をメッシュ分割し、それぞれのき裂先端での J 値を有限要素法により解析した．そして、その J 値をもとにき裂進展速度を決定し、き裂進展過程をシミュレートする手法を用いた⁽¹⁹⁾．有限要素法の計算には汎用プログラム ABAQUS を用いた．このプログラムで J 値は仮想き裂進展法により求められる．

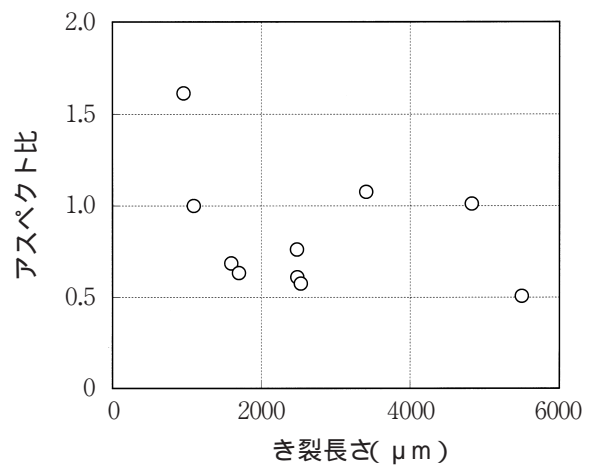


図 7 き裂長さのアスペクト比(き裂深さ/き裂半長)の関係(試験 M 1 ~ 6)．

4.1.1 複数のき裂が分布する平面のモデル化

有限要素法を用いて複数のき裂が分布する平面のモデル化を行う。モデルでは、2次元平面に存在する貫通き裂を想定し、8節点平面応力要素を用いて、任意の位置と長さのき裂をモデル化できるように、図8のようなメッシュを作成した。対象とする平面を長さ X_d の正方形の要素(以後、基本要素)に分割し、この基本要素の格子の上にき裂の要素をはめ込むようにメッシュを自動生成する。試験においてアスペクト比に規則性が見られなかったことから、き裂先端の J 値も貫通き裂で計算した結果に一定の値をかけることで近似できると仮定する。有限要素法の計算における境界条件は図9のように設定した。

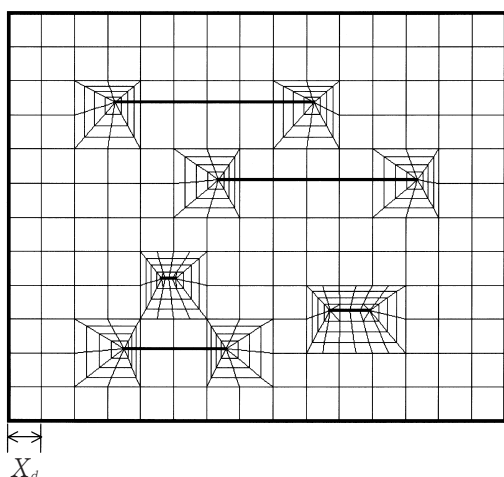


図8 シミュレーションで用いた有限要素メッシュの例

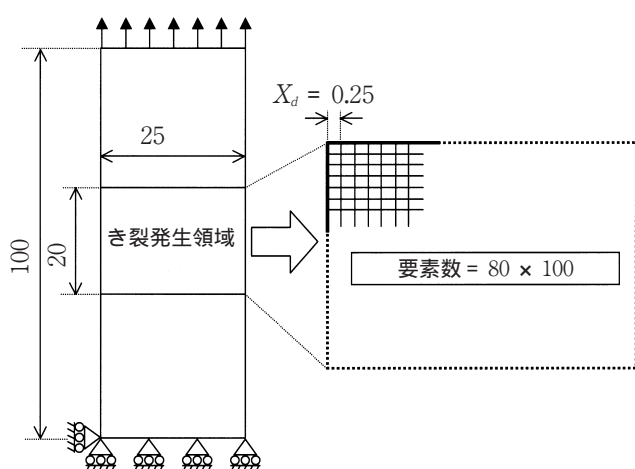


図9 シミュレーションにおける境界条件

試験で用いた試験片のき裂発生面 25×20 を想定し、この領域を基本要素長さ $X_d = 0.25$ になるようメッシュ分割し、この領域に一樣な応力が負荷されると仮定した。このメッシュ分割での有限要素法計算による J 値の解析誤差は、本シミュレーションで対象とするき裂長さでは1%以下であることを確認した。

4.1.2 解析条件

シミュレーションは、試験 M1 ~ 3 の最大応力 300 MPa、応力比 0.9 の試験を対象に実施する。試験中の最大応力及び応力比を一定とした時、き裂発生数は (1)式より時間の1次関数として表現できる。また図1においても、き裂数が試験時間にほぼ比例して増加しており、潜伏期間もほとんどないと考えられることから、き裂数 n_c を時間 t の関数として次式で設定する。

$$n_c = R_n \times t + 1 \quad (3)$$

ここで R_n は、き裂発生レート示す定数で、単位を(個/1000時間)とする。従って、M1 ~ 3の試験結果は $R_n = 20$ となる。また発生時の初期き裂長さは、試験で観察した際の最低長さ $20 \mu\text{m}$ とする。

図2及び(1)式より、き裂発生には応力と時間に相関があることがわかっている。したがって、平面上のき裂の発生する位置も既に存在するき裂周りの応力場の影響を受けることが考えられる。そこで、き裂発生箇所を決定するパラメータとして、基本要素毎に次式の C_{ele} を定義する。

$$C_{ele} = w_{ini} \times \left\{ \max(\sigma_i - \sigma_{th}, 0) \times dt \right\} \quad (4)$$

ここで、 σ_i は、各計算ステップ毎に有限要素計算から求まる要素毎の Mises の相当応力、 dt は1ステップ当たりの時間そして w_{ini} は各要素毎のばらつきを表す係数で 0 ~ 1 の一樣乱数を各要素に割り当てる。また、 σ_{th} は図3より 200MPa とした。(3)式で決定されるき裂数と時間の関係に従い、き裂発生の各タイミングで C_{ele} が最大値をとる基本要素に新たなき裂が発生するとする。基本要素内での発生位置

は、乱数によって決定した。したがって、新たに発生するき裂は、既に存在するき裂先端の応力集中域に発生する確率が大きくなる。

き裂の進展については図6で考察したように、2つの成長ステージが存在すると考えられる。そこで、発生したき裂は次の2つの成長ステージをたどって進展すると仮定する。まず第一のステージは、微小き裂進展領域に相当する成長ステージで、このステージにおいてき裂は長さにかかわらず一定の速度 V_c で成長すると仮定する⁽¹³⁾。

$$V_c = P_1 \tag{5}$$

ここで P_1 は、き裂進展速度を示す定数である。そして第二のステージは、き裂の先端の応力集中の強さによって進展速度の変化するステージである。このステージでの進展速度は、文献(6)を参考に、 J の関数で表現される次式で速度 V_s で成長すると仮定する。

$$\begin{aligned} V_s &= P_2 \times (V_{air} + V_{scc} + V_{env}) \tag{6} \\ V_{scc} &= 2.1 \times 10^{-13} K^{2.161} \\ V_{env} &= 1.5 \times 10^{-4} V_{air} (K)^{0.5} \\ K &= \frac{J \times E}{J \times E} \end{aligned}$$

ここで、 P_2 は定数、 V_{air} は ASME の Boiler and Pressure Vessel Code Section XI⁽²⁰⁾ (以下、ASME 維持基準) で定義されている空気中の疲労進展曲線の値、 E はヤング率で表2の値を使用する。単位は速度については m/s、 J 値は N/m である。き裂は成長過程において、図6の複合ワイブル分布の分布屈曲き裂長さ 120 μm を境にステージ1よりステージ2へ移行する。また、き裂が結晶粒界に沿って進展する場合、き裂の進展に対する抵抗が結晶粒界毎に変化する⁽²¹⁾⁽²²⁾。そこで、この粒界のき裂に対する進展抵抗を表現する為に、シミュレーション対象平面を試験材の平均結晶粒界長さ約 65 μm の辺をもつ正方形で分割する。そして、分割された領域それぞれに、0 ~ 1 の一様乱数で決定される進展抵抗 w_p を与える⁽²²⁾。この w_p を用いてき裂の進展速度 V を以下のように仮定する。

$$\begin{aligned} V &= w_p \times V_c \quad (\text{き裂長さ} < 120 \mu\text{m}) \tag{7} \\ &= w_p \times V_s \quad (\text{き裂長さ} \geq 120 \mu\text{m}) \end{aligned}$$

定数 P_1, P_2 については、後に述べるシミュレーションによって得られるき裂長さ分布が図6と一致するよう試行錯誤で求め、 $P_1=0.103$ ($\mu\text{m/hr}$)、 $P_2=3.0$ を得た。この時のき裂長さ分布を図10に示す。

以上、得られたき裂進展速度と K 値の関係を図11に示す。この図において、 K 値は 300MPa 膜応力の負荷された平面の中心にあるアスペクト比 0.85 の半楕円き裂が試験片中央部にあるとして Raju-Newman の式⁽²³⁾により算出した。また、(7)式の w_p は 0.5 としている。成長ステージの境目となっているき裂長さ 120 μm 相当の K 値でカーブが不連続と

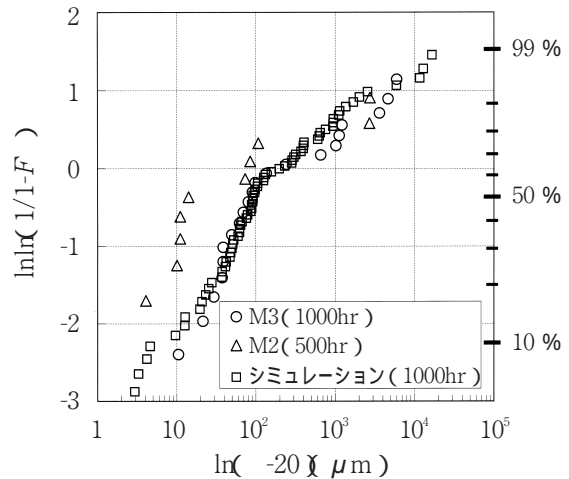


図10 M2及びM3試験片表面で観察されたき裂及びシミュレーションで得られたき裂の長さ分布(ワイブル確率紙)

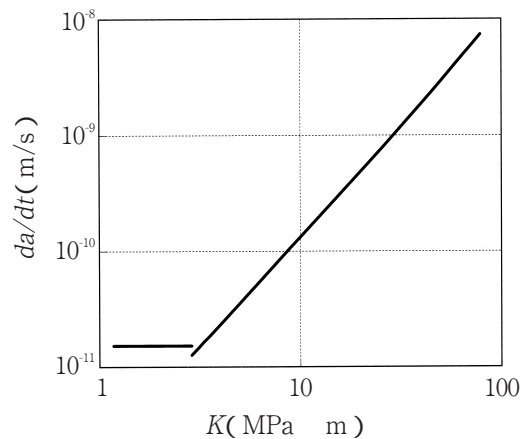


図11 シミュレーションにより推定された応力拡大係数とき裂進展速度の関係

なっているが、この点において個別に推定した2つのステージの進展速度がほぼ同じになることは、推定された速度が妥当であることを示すと考えられる。

ひずみ硬化の影響については、次式の Ramberg-Osgood タイプのひずみ ϵ と応力 σ の関係を仮定する。

$$E \times \epsilon = \sigma + F \times \sigma \times \left[- \right]^{n-1} \quad (8)$$

ここで、 F 及び n は塑性係数で $F=2.56$, $n=6.74$ とする。また、 σ_y は降伏応力で表2の値を用いた。

接近した2つのき裂の相互作用の典型的な形態として、き裂の合体がある。合体の発生する条件については、試験的に検討されており幾つかの条件式も提案されている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。しかし、これらは材料や条件により異なり、本研究で想定されるき裂の長さの差が大きい場合の取り扱いなどまだ考察すべき点が多い。また、本シミュレーションモデルのように有限要素法を用いて複数のき裂の力学的な相互作用を考慮した場合には、例え合体しない場合でも、き裂は相互作用により合体した場合と同様の相対的に速い進展速度で成長することが、計算により明らかにされている⁽⁵⁾。そこで、本シミュレーションではき裂の合体について、メッシュ作成上やむおえない場合を除いては考慮しない。

4.2 シミュレーション結果及び考察

以上の仮定をもとに、M3の試験を想定したシミュレーションを行う。計算は最初10時間を1ステップとして、ステップ毎にき裂先端の J 値を有限要素計算にて求め、その結果を用いて、(7)式でき裂進展速度を計算して進展させる。そして、各ステップでのき裂進展長さが最大で0.25mmを越えないようにステップ間隔を最小2時間まで制御した。図12に(4)式の w_{ini} 、及び(7)式 w_p を決定する乱数を変化させた3ケースについて、時

間毎のき裂分布の様子を示す。き裂が時間と共に発生、進展する様子が再現されており、き裂が集中して分布する傾向を示す等、き裂の分布状態は図3、4の様子とよく似ている。本シミュレーションにおいては、Case3の $t=980\text{hr}$ の状態を平面が破断した状態と定義する。この状態においてハッチングした部分は、き裂部の要素及び Mises の相当応力が破断応力 σ_b を越えた基本要素を示している。この要素が、応力軸に対して垂直方向に平面を貫通した時間を破断時間 (Time to Failure, 以後 TTF) と定義する。ここで、 σ_b は表2の材料の引張り強さを用いた。(3)式におけるき裂発生レート R_n を変えた時の破断時のき裂分布状態の例を図13に示す。破断には比較的離れた位置にあるき裂も関与しており、破断時の最大き裂長さは必ずしも一定でないことがわかる。図14に乱数を変えた20ケースについ

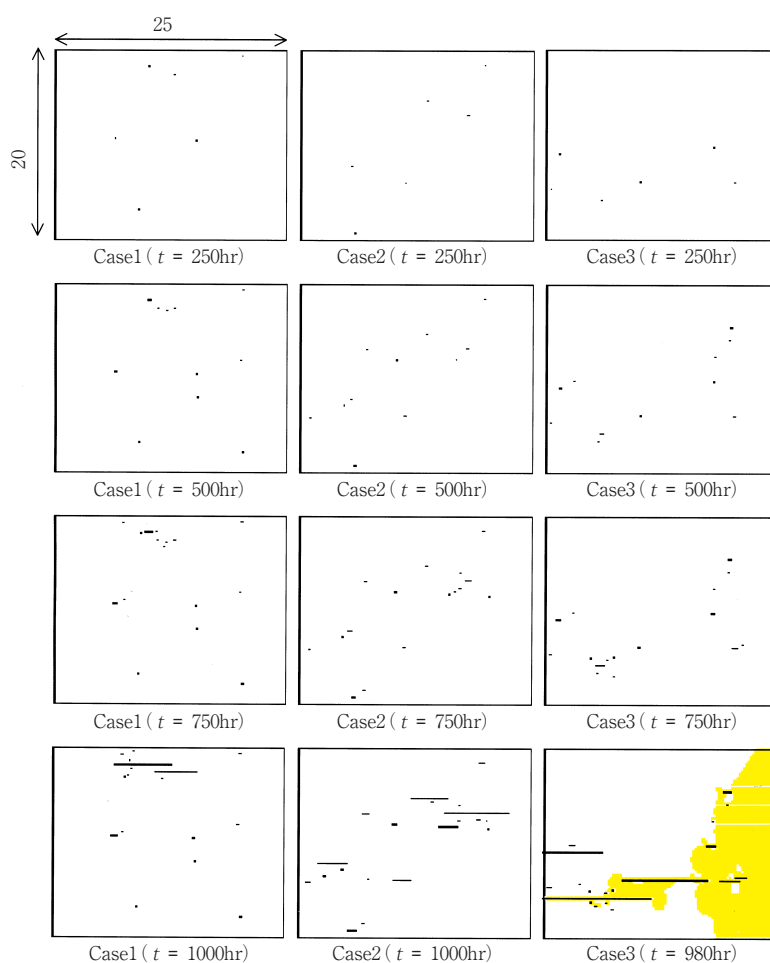


図12 シミュレーションで得られたき裂成長挙動 (300MPa, $R0.9$, $R_n = 20$)

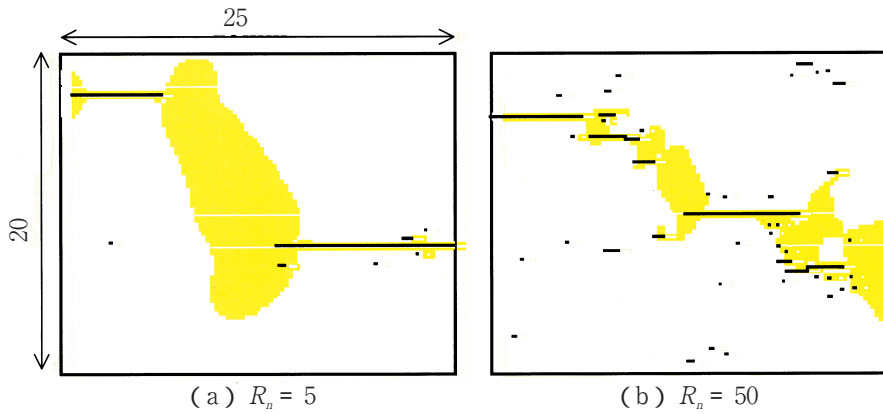


図 13 シミュレーションで得られた試験片破断時のき裂分布の様子 (300MPa, R0.9) との関係を図 16 に示す。

て、 R_n と破断時の最大き裂長さの関係をプロットする。 $R_n=0$ の場合を除いて、破断時の最大き裂長さは大きくばらつき、その平均はき裂発生数の増加と共に減少する傾向にある。従って、き裂が複数発生する状態では、破断時の長さが大きくばらつく最大き裂長さで余寿命評価を行うと破壊評価に対して危険側の評価を行う可能性がある。複数き裂の相互作用を考慮した評価法として、ASME 維持基準では接近した複数のき裂を単一のき裂と見なして評価を行う手法が規定されている。また、き裂長さの総和等を考慮することで、相互作用を考慮した寿命評価が可能であるとの報告もあるが⁽²⁷⁾、図 12,13 のように多数のき裂が分布する状態で正確な評価を行うためには、本シミュレーションで行ったように有限要素法等を用いた数値的な評価が必要と考えられる。

図 14 における TTF を指数分布確率紙にプロットしたものを図 15 に示す。この図より TTF 分布が指数分布に従うこと、き裂発生数の増加とともに

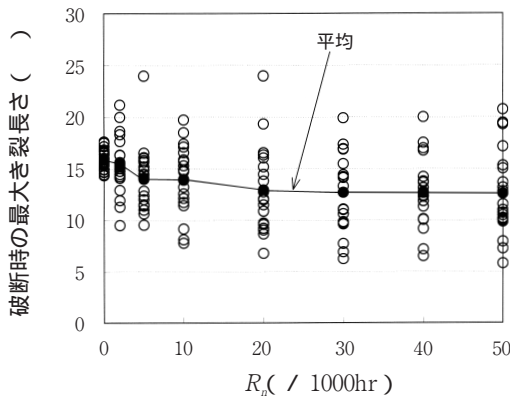


図 14 破断試験片上の最大き裂長さとき裂発生レート R_n の関係 (300MPa, R0.9)

破断時間が短くなる傾向があることが分かる。EAC や疲労において TTF が指数分布に従う報告は多くあり⁽²⁸⁾、本シミュレーションにおいても、これが再現できたことになる。図 15 の分布の中央値をとるケースについて、平面上に存在する全き裂の平均長さ

と時間 t の関係を図 16 に示す。本シミュレーションではき裂数は(3)式に従い時間の一次関数で増加すると仮定している

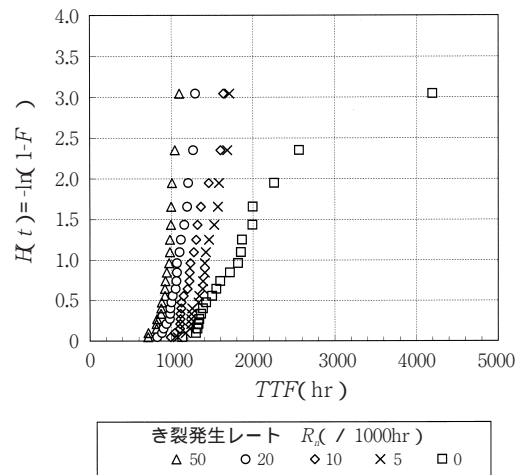


図 15 シミュレーションで得られた破断寿命 (TTF) 分布 (300MPa, R0.9) 指数分布確率紙。

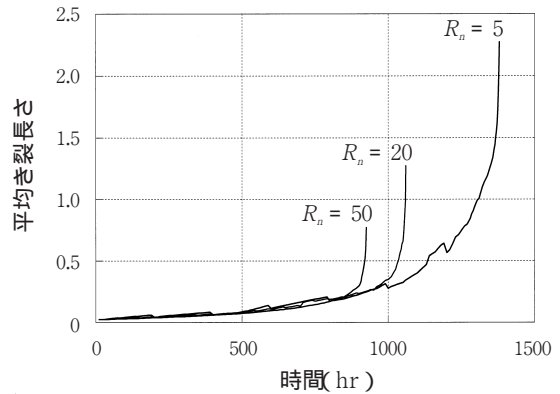


図 16 試験片上にある全てのき裂の平均長さと試験時間の関係 (300MPa, R0.9)

長さは、およそ 800 時間までは R_n に関わらずほぼ同じであるが、 TTF に近づくと、平均的な曲線から上方へ逸脱する傾向が見られる。これはき裂の成長に伴い、き裂同士の相対的な距離が小さくなったため、相互作用により進展が加速されることが要因になっていると考えられる。一方、破断時の平均長さは、き裂の連結により R_n が大きくなるほど短くなる傾向が見られるが、このことが TTF にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

次に、き裂発生数が TTF へ与える影響を定量的に見るために、各 R_n における TTF の平均を、 $R_n = 0$ の場合の値で正規化したものを図 17 に示す。横軸は TTF におけるき裂数の平均値とした。これらのプロットを近似すると次式が得られた。

$$\frac{TTF_{mean}}{TTF_{R_n=0}} = 1.08n^{-0.186} \quad (9)$$

ここで、 n は TTF 時のき裂数の平均であるが、き裂数は(3)式より時間に対して一意に決定されるので、 TTF の平均におけるき裂数とも言える。この(9)式を用いてき裂発生数の TTF へ与える影響を考慮することができる。また、図 17 には有限要素計算及び(6)式のき裂進展速度で、最大応力 250MPa 及び 275MPa、応力比 0.9 の負荷を想定した場合の計算結果を示した。 R_n は図 2 の結果よりそれぞれ $R_n=10$ 及び 15 として計算し、それぞれの応力における $R_n=0$ 時の TTF で正規化している。これらの結果より、(9)式が違う応力条件の場合にも成り立つと考えられる。

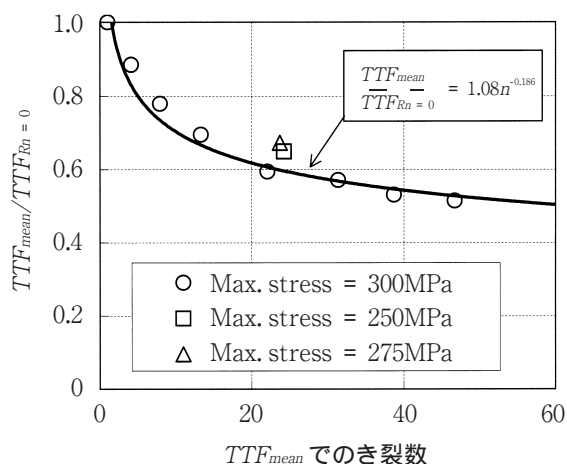


図 17 破断時間 (TTF) の平均と破断時のき裂数の関係

5. 結論

以上、鋭敏化 304 ステンレス鋼の 4 点曲げ試験によるき裂の発生及び成長挙動の試験的考察、及びそれらのデータを基にしたシミュレーションによる検討を通じて、以下のことが明らかになった。

まず、試験結果により

- (1) き裂数は、時間に対し単調増加する。
 - (2) き裂発生数と負荷応力は比例関係ではなく、き裂の発生する負荷応力には下限界値が存在する。また、下限界値以上では、き裂発生数は応力の上昇に対し、単調増加となる。
 - (3) 最大応力を固定した状態ではき裂進展は応力比が小さくなることで促進されるが、き裂発生は逆に抑制される。
 - (4) き裂の分布形態は、比較的集中する傾向を示す。
 - (5) き裂長さ分布は複合ワイブル分布の形態を示し、このことよりき裂進展において 2 つの成長ステージが存在することが推測される。
- またシミュレーションにより、
- (6) 複数き裂の相互作用によって、破断時の最大き裂長さは大きくばらつき、その平均はき裂数が増えるに従い短くなる傾向にある。したがって、破壊評価により寿命評価を行う場合、最大き裂長さをを用いると危険側の評価になる可能性がある。
 - (7) き裂発生数の増加はき裂進展を加速し、破断時間を短くする方向へ作用する。

文献

- (1) S.Zhang, T.Shibata and T.Haruna : Corrosion, 54[6], 428(1998).
- (2) S.Zhang, T.Shibata and T.Haruna : Corrosion Science, 39[9], 1725(1997).
- (3) 釜谷昌幸, 千葉吾郎, 光田弘道, 中島宣雄, 戸塚信夫, D.R.Tice: 材料と環境 '99 講演論文集 (Proc.JSCE Materials & Environments 1999),169, 腐食防食協会(JSCE)(1999).
- (4) 安齋英哉, 国谷治郎, 山本道好, 鈴木俊一, 田中良彦: 第 75 期通常総会講演論文集, 566, 日本機械学会(1998).
- (5) 釜谷昌幸: 日本機械学会論文集 A 編, 66 [648]

- 1491 , (2000) .
- (6) W. J. Shack and T. F. Kassner : NUREG/CR 6176 (1994).
- (7) Y.-Z.Wang, K.Ebtehaj, D.Hardie and R.N.Parkins : Corros. Sci., 37[11],1677 (1995).
- (8) 釜谷昌幸, 酒井俊治, 戸塚信夫, 中島宣雄 : 材料と環境 (M.Kamaya, S.Sakai, N.Nakajima and N.Totsuka) [Zairyo-to-Kankyo(Corros.Eng.)],48[12] , 790(1999).
- (9) C.M.Suh, J.J.Lee, Y.G.Kang : Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 13[5],487 (1990).
- (10) 戸梶恵郎, 安藤善司, 杉本幹哉, 中野典彦 : 材料,30[328] , 15(1981).
- (11) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿 : 日本機械学会論文集 A 編,54[504] , 1482(1988).
- (12) N.Konda, K.Tokimasa, K.Yamanaka and M.Inoue : Proc. of Inter. Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, Sapporo,265 (1995).
- (13) F.P.Ford and S.J.Hudak:TMS-ASME,289(1986).
- (14) H.Kitagawa,S.Takahashi,C.M.Suh and S.Miyashita : ASTM STP 675,420 (1979).
- (15) C.M.Suh, J.J.Lee, Y.G.Kang, H.J.Ahn and B.C.Woo : Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 15[7],671(1992).
- (16) Y.-Z.Wang, K.Ebtehaj, D.Hardie and R.N.Parkins : Corros. Sci., 37[11],1705 (1995).
- (17) 藤山一成 : 材料, 45[1],137 (1996).
- (18) 多田直哉, 北村隆行, 大谷隆一 : 日本機械学会論文集 A 編, 56[524],708 (1990).
- (19) 釜谷昌幸 : 第 49 期学術講演会講演論文集 203 , 日本材料学会(2000).
- (20) ASME Boiler and pressure Vessel Code Sec.XI (1998).
- (21) 釜谷昌幸, 酒井俊治, 戸塚信夫, 中島宣雄 : 材料と環境 (M.Kamaya, S.Sakai, N.Nakajima and N.Totsuka) [Zairyo-to-Kankyo(Corros.Eng.)],49[3] , 159(1999).
- (22) 大谷隆一, 北村隆行, 村山英明, 多田直哉 : 日本機械学会論文集 A 編, 54[503] , 1312(1988).
- (23) J.C.Newman,Jr and I.S.Raju : Engng Fract. Mech., 15[1],185(1981).
- (24) Y.-Z.Wang, K.Ebtehaj, D.Hardie and R.N.Parkins: Corros. Sci., 37[11],1651 (1995).
- (25) Y.Ochi, A.Ishii and S.K.Sasaki : Fatigue Fract. Engng Mater. Struct, 8[4],327 (1985).
- (26) X.J.Xin and E.R.De Loas Rios : Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 17[9] ,1043(1994).
- (27) 釜谷昌幸 : 材料 , 50[3],263 (2001).
- (28) G.Nakayama, M.Akashi and A.Ohtomo : ISIJ Int.,31[2],223 (1991).