ステンレス鋼 SUS 304 における応力腐食割れの 表面き裂効果を考慮したモンテカルロ・シミュレーション*

東郷 敬一郎^{*1}, 鈴木 洋光^{*2}, 島村 佳伸^{*3}
中山 元^{*4}, 平野 隆^{*4}

Monte Carlo Simulation Taking Account of Surface Crack Effect for Stress Corrosion Cracking in a Stainless Steel SUS 304

Keiichiro TOHGO^{*5}, Hiromitsu SUZUKI, Yoshinobu SHIMAMURA,
Guen NAKAYAMA and Takashi HIRANO

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

Stress corrosion cracking (SCC) in structural metal materials occurs by initiation and coalescence of micro cracks, subcritical crack propagation and multiple large crack formation or final failure under the combination of materials, stress and corrosive environment. In this paper, a Monte Carlo simulation for the process of SCC has been proposed based on the stochastic properties of micro crack initiation and fracture mechanics concept for crack coalescence and propagation. The emphasis in the model is put on the influence of semi-elliptical surface cracks. Numerical simulations are carried out based on CBB (creviced bent beam) test results of a sensitized stainless steel SUS 304 and the influence of micro crack initiation rate and coalescence condition on the simulation results is discussed. The numerical examples indicate the applicability of the present model to a prediction of the SCC behavior in real structures.

Key Words: Stress Corrosion Cracking, Monte Carlo Simulation, Crack Initiation, Crack Coalescence, Subcritical Crack Propagation, Surface Crack

1. 緒 言

近年, 国内外において原子炉等の発電プラント内構造物に経年劣化事象である応力腐食割れ (SCC) による損傷事例が顕在化している。高経年化した構造物のより高度な安全管理を行っていくためには, SCC 対策は最重要課題である。

SCC は材料, 環境および応力の組合せにより生ずる極めて複雑な破壊現象であり, しばしば, 溶接による SCC 鋭敏化と残留応力により, 溶接部近傍に沿って多数の SCC 表面き裂が報告されている。き裂長さは数 10mm から数 100mm に及ぶ場合がある。このような大 きき裂は, 腐食ピットの発生・成長, ピットからのき裂発生による微小分布き裂の形成, 微小き裂の合体・進展, 巨視的き裂の進展と合体といったミクロからマクロにわたる過程により形成され, SCC 挙動は階層構造

を示すことがわかる^{(1)~(3)}。一方, 現状は, 擬似環境の下で, 平滑表面に生ずる SCC による微小き裂の発生と合体に関して, 定荷重 (CL) 試験, 定ひずみ曲げ (CBB) 試験, 低ひずみ速度引張り (SSRT) 試験等が行われ^{(1)~(3)}, SCC によるき裂進展特性 (da/dt - K_I 関係および K_{ISCC}) に関しては, 破壊力学的手法に基づいて予き裂試験片を用いたき裂進展試験が行われている⁽⁴⁾。特に, 発電プラントなどの実際の構造物の SCC に対する余寿命評価法として提案されている方法や維持規格は, 比較的大きくなった検出可能なき裂を捉え, その後のき裂進展挙動により余寿命を予測しようとするものであり⁽⁵⁾, 微小き裂発生および合体により検出可能なき裂が形成されるまでの過程を考慮できない状況にある。SCC 挙動の各階層における現象を明らかにし, 各階層の統合化を行い, SCC 挙動の全過程を考慮できるならば, 実構造物中の SCC 挙動をより精度よく予測できるものと推察される。

各階層の挙動の統合化の方法としては, モンテカルロ法によるシミュレーションが挙げられる。平滑表面

* 原稿受付 2007 年 6 月 21 日。

^{*1} 正員, フェロー, 静岡大学工学部 (〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)。

^{*2} 学生員, 静岡大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員, 静岡大学工学部。

^{*4} IHI Corporation (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1)。

E-mail: tmktoug@ipc.shizuoka.ac.jp

の SCC 挙動と同様に、微小分布き裂の発生・合体・進展による破壊の進行は、腐食疲労、クリープ疲労、高温環境下での破壊現象に見られ、破壊現象の解明・評価のためにモンテカルロ法に基づくシミュレーションが行われている^{(8)~(13)}。しかし、その多くは貫通き裂を仮定しており、平滑表面の破壊現象を予測するには至っていない。表面き裂を想定したシミュレーションも報告されているが^{(9)~(12)}、表面き裂の形状を半円表面き裂と仮定しており（この仮定は応力拡大係数とき裂長さの関係では貫通き裂の取扱いと同一）、き裂の進展・合体による表面き裂の形状変化まで考慮した例は見当たらない。

本研究では、平滑表面における SCC 挙動を再現するために、特に表面き裂の効果を考慮して、微小表面き裂の発生から合体・進展により大きき裂が形成される過程のモンテカルロ・シミュレーションを開発した。その応用例として、高温高純度水環境におけるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の CBB 試験の結果を基礎データとしてシミュレーションを行い、解析結果と実験結果の比較を行うとともに、シミュレーションにおける合体条件、き裂発生条件の影響について検討した。

2. SUS 304 における SCC 挙動

ここでは、明石らによる溶存酸素を含んだ高温高純度水中の鋭敏化処理したステンレス鋼 SUS 304 の結果に基づいて、SCC 挙動を要約する^{(1)~(3)}。SCC 環境下では、図 1 に示すように、(I) 潜伏過程、(II) 腐食ピットの形成過程、(III) 腐食ピットからの結晶粒オーダー微小き裂の形成過程、(IV) 微小き裂の合体過程の 4 段階を経て、進展性き裂が形成され、その後のき裂進展と合体により大きき裂へと成長する。すなわち、SCC による大きき裂は進展性き裂が形成されるまでのマイクロな過程からその後のマクロな過程を経て形成される。

ピット、微小き裂に関する詳細な実験、観察により (II) と (III) はポアソン確率過程となり、微小き裂の発生数の分布はポアソン分布に従うことが報告されている。したがって、進展性き裂の発生過程は潜伏期間を有する指数分布に従う結晶粒オーダーの微小き裂の発生過程と微小き裂の合体過程により表現できることがわかる。指数分布による時間 t におけるき裂発生の累積確率 $F_i(t)$ は次式により表される。

$$F_i(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{(t-a_i)}{\theta_i}\right\} = 1 - \exp\{-H_i(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $H_i(t)$ は累積故障率、 a_i は累積確率分布の下限値あるいは潜伏期間を表す位置パラメータで、 θ_i は標準偏差を表す尺度パラメータである。 a_i と θ_i は一般には作用応力と環境の関数として与えられる。このようにして発生したき裂は隣接して発生したき裂と合体することにより、進展性き裂の臨界長さに達し、その後、合体と進展により大きき裂へと成長する。

3. SCC 過程のモデル化

前節で述べたように、平滑表面における SCC はき裂発生に対する確率過程とき裂の合体・進展に対する確定過程の組合せにより生ずる。本研究では、SCC 過程のき裂発生に関しては、発生時間、き裂長さ、位置はそれぞれの確率分布に基づいてランダムに起こり、き裂の合体と進展は破壊力学に基づいて確定的に起こるものと仮定し、一様引張応力下の平滑表面における表面き裂の発生、合体、進展を考慮したモンテカルロ・シミュレーションを開発した。図 2 にシミュレーションのフローチャートを示す。

Step 1: 発生するき裂は、表面長さ $2a$ 、深さ b 、アスペクト比 $\alpha(=b/a)$ の半楕円表面き裂とした。結晶粒寸法の粒界き裂が引張応力方向にほぼ垂直に

Fig. 1 A model of SCC behavior.

Fig.2 Flow chart of SCC simulation.

発生すると考えられる。従って、図 3 に示すように、1 結晶領域（升目）に 1 個のき裂が発生可能となるので、発生可能なき裂数は次式により与えられる。

$$N_{\max} = \frac{\text{Simulated area}}{\text{Average grain area}} \quad (2)$$

Step 2: $N_{\max}$ 個のき裂に対する発生時間はき裂発生 の累積確率分布 $F_i(t)$ に基づく乱数により割り当てられ、 $N_{\max}$ 個のき裂発生時間が決定される。

Step 3: き裂発生は割り当てられたき裂発生時間の短いものから順に生じ、き裂発生位置（き裂中心の x, y 座標）は解析領域内の一様乱数により、き裂長さは正規乱数により決定される。き裂発生位置が既にき裂発生している結晶領域（升目）となった場合は、発生時間、き裂長さに対する乱数はそのままとし、発生位置に対して新しい乱数で試みられる。更に、図 4 に示すように、既に存在するき裂の上下は応力解放によりき裂の発生しにくい場所となるので⁽⁹⁾、き裂発生位置がそのような場所になった場合は、き裂は発生できないものとし、次のき裂発生が発生時間、位置、長さに対する新しい乱数に基づいて試みられる。

Step 4: き裂発生が可能となった場合、直前のき裂発生からの時間 Δt におけるき裂の進展、合体が

Fig. 3 Crack initiation in SCC simulation.

Fig. 4 Inactive region around a pre-existing crack.

各表面き裂の表面部、最深部の応力拡大係数 K_{IA} 、 K_{IB} に基づいて計算される。 K_{IA} 、 K_{IB} は、図 5 の修正係数を用いて次式により評価した⁽¹⁴⁾。

$$K_{IA} = F_{IA} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$K_{IB} = F_{IB} \sigma \sqrt{\pi b} \quad (4)$$

Step 5: き裂合体に関しては、き裂先端の活性化領域を考慮することにより、図 6 に示すように、き裂先端の円形領域に他のき裂先端が入った場合に合体が起こるものとした⁽¹⁵⁾。2 つのき裂の合体領域の臨界半径は次式で表される。

$$r_c = \frac{k}{\pi} \left(\frac{K_{IA}}{\sigma_{ys}} \right)_{\text{crack 1}}^2 + \frac{k}{\pi} \left(\frac{K_{IA}}{\sigma_{ys}} \right)_{\text{crack 2}}^2 \quad (5)$$

ここで、 K_{IA} は各き裂の表面部での応力拡大係数、 σ_{ys} は材料の降伏応力、 k は材料、環境に依存する係数である。いくつかのき裂同士が合体条件を満たす場合には、条件を満たす全ての組について先端間距離 d を計算し、これを該当するき裂同士でつくる合体領域半径 r_c で除した値 d/r_c が最も小さいき裂同士を合体させる。これにより、先端間距離が短くて大きなき裂同士であるほど合体しやすくなり、一個のき裂とのみ合体するということになる。表面き裂の合体に関しては、図 7 に示すように、合体後の表面き裂の表面寸法は合体前の 2 個のき裂を含んだ長さ、深さ寸法は 2 個のき裂の

Fig. 5 Correction factors as functions of an aspect ratio for a semi-elliptical surface crack.

Fig. 6 Coalescence region between two cracks.

Fig. 7 Coalescence of two surface cracks.

うち深いほうの寸法とする。したがって、表面き裂の合体によりアスペクト比 b/a の小さい表面き裂になる。

Step 6: 合体により進展性き裂長さあるいは K_{ISCC} に達したき裂はき裂進展特性 ($da/dt-K_I$ 関係) に基づいて定常進展を開始し、き裂進展量は表面方向では表面部での応力拡大係数 K_{IA} 、深さ方向では最深部での応力拡大係数 K_{IB} を用いて計算される。

また、き裂の合体と進展は既に存在するき裂による応力解放の影響を受けるので、図4に示すように、その領域のき裂とは合体せず、その領域の中へは進展しないものとした。ただし、深い大きな表面き裂は内部では進展可能であり、小さな表面き裂による応力解放域の影響を制限するため、ここでは、既存き裂よりも2倍以上深いき裂は既存き裂による応力解放域の中に進展できるものとした。

Step 7: Step 3 から Step 6 の過程を新しいき裂に対して繰り返し、シミュレーションは最大き裂長さが設定した臨界長さに達するか、発生可能なき裂が全て発生したときに、時間経過に対するき裂の分布、各き裂の表面寸法、深さ寸法を出力して終了する。

本シミュレーションを新たな乱数に対して繰り返すことにより、設定された SCC 条件下での SCC 挙動の統計的特性を予測できることになる。

4. 鋭敏化 SUS 304 における SCC シミュレーション

4.1 CBB 試験 鋭敏化処理 ($700^{\circ}\text{C}/2\text{hr} + 500^{\circ}\text{C}/24\text{hr}$) を施した SUS304 に対して、BWR 原子炉冷却水環境の SCC に対する実験室加速試験として、高温高純度水環境 (288°C , 溶存酸素量 8ppm) で CBB (Crevice bent beam) 試験を行った。図8に示すように、試験片寸法 $10\text{mm} \times 50\text{mm} \times 2\text{mm}$ の短冊状試験片で、グラファイトワールにより試験

片表面に隙間を付与し、治具により1%の曲げひずみを与えた。24時間、48時間、96時間経過した試験片について微小き裂を計測した。試験片の両端5mmを除く $10\text{mm} \times 40\text{mm}$ の領域に対して、24時間経過後で1254個、48時間経過後で2975個、96時間経過後5572個のき裂が観察された。

4.2 シミュレーション方法 数値シミュレーションは一様引張応力場における $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ の正方形領域に対して行った。CBB試験に用いた SUS304 の 288°C での応力-ひずみ関係より、降伏応力を $\sigma_{ys}=162\text{MPa}$ 、1%のひずみの相当する作用応力を $\sigma=200\text{MPa}$ とした。また、同材料の平均結晶粒径は 0.08mm だったので、発生可能なき裂数を62500個とした。微小き裂発生 of 累積確率分布として指数分布(1)式を以下のように決定した。CBB試験の結果より、 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 当りのき裂数に換算すると、24時間で1256個、48時間で2972個、96時間で5572個となるので、累積確率はそれぞれ0.0201、0.0476、0.0892となる。経過時間が長くなるほど合体したき裂が含まれるので、より短い経過時間での結果を重視して、(1)式において、 $a_1=0.0258\text{Ms}$ 、 $\theta_1=2.97\text{Ms}$ とした。発生可能な62500個のき裂に対する発生時間を指数分布に基づく乱数で割り当て、時間の短いものから発生させた。き裂発生位置 (x, y) は区間 $0 \sim 20\text{mm}$ の一

Fig. 8 A CBB test fixture.

様乱数により、き裂長さ $2a$ は、粒径と同程度の大きさとして、供試材料の粒径分布を近似した正規分布より平均長さ 0.08mm 、標準偏差 0.03mm の正規乱数により決定し、アスペクト比は文献(3)より $b/a=1$ とした。また、き裂の合体条件は、(5)式において $k=0.5$ とした。進展性き裂長さに対しては、 $K_{ISCC}=2\text{MPa}\sqrt{m}$ とし、き裂の表面部、最深部の応力拡大係数がこの値を超えたときそれぞれ表面方向および深さ方向に進展し始めるものとした。また、き裂進展速度は、SUS 304 に対して提案されている $da/dt-K_I$ 関係⁽⁶⁾ に K_{ISCC} の値を考慮した次式に従うものとした。

$$\frac{da}{dt} = 1.1 \times 10^{-7} \left[2.5 \times 10^{10} \exp \left(- \frac{3 \times 10^{-19} - 1.5 \times 10^{-20} (K_I - 2)^{1/3}}{7.74 \times 10^{-21}} \right) \right]^{0.443} \quad (6)$$

ここで、 da/dt の単位は m/s である。

以上の条件下で 15 回のシミュレーションを行い、CBB 試験と同様に、時間 t が、24 時間、48 時間、96 時間経過時点でデータを取り、最大き裂長さが 10mm を超えた時点でシミュレーションを終了した。また、解析領域からき裂先端がはみ出した場合についてはそれより先の進展や合体は考慮されないため、その影響が出ないようにするためにき裂長さ 5mm に対する SCC 寿命について議論した。

本シミュレーションでは、厚さ 2mm の平板の曲げ負荷である CBB 試験結果より微小き裂発生条件を決定し、一様引張応力下での SCC 挙動を解析している。従って、厳密には、微小き裂発生後のき裂進展・合体挙動に関して、シミュレーション結果と CBB 試験結果を比較することには無理があるけれども、可能な範囲で比較を行った。シミュレーションの妥当性の検討は、一様引張応力下での実験結果との比較が必要である。

4・3 シミュレーション結果 図 9 に各時間における表面でのき裂分布を示す。 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 領域から最大き裂を含む $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 領域を示したものである。24 時間および 48 時間経過時点では微小き裂が一様に分布している。96 時間経過すると、き裂の合体や進展により成長したき裂が観察できるようになる。230 時間経過したとき、最大き裂長さは臨界長さ 5mm に達し、全体に大きなき裂が分布している様子がわかる⁽⁵⁾。図 10 はき裂数と時間の関係を示したものである。図中には指数分布に基づく計算結果および CBB 試験結果も示してある。図中の 1 本の曲線は 1 回のシミュレーションに対応する。き裂数は初期段階では発生き裂数とほぼ等しく、指数分布による結果と一致し、時間の経過とともにき裂の合

Fig. 9 Variation of crack distribution with time.

Fig. 10 Number of cracks as a function of time

Fig. 11 Maximum crack length as a function of time.

Fig. 12 Maximum crack depth as a function of time.

Fig. 13 Aspect ratio of the deepest crack as a function of time.

Fig. 14 Comparison of number of cracks between CBB test and simulation.

Fig. 15 Exponential distribution plots for SCC lifetime.

体や、大きなき裂によるき裂発生不可能領域の形成により、飽和する傾向にある。図 11、図 12 は最大き裂長さおよび最大き裂深さを時間に対して示したものである。図 11 において、き裂は表面方向には進展と合体により徐々に成長している様子がわかる。最大き裂長さの各シミュレーション間のばらつきは、経過時間 1Ms 程度までは少ないが、1Ms 以降では大きくなる。これは、図 9 (d) に示すように、約 1Ms 経過すると大きなき裂も含めて約 8000 個のき裂が存在し、き裂発生、進展、合体が生じにくい領域が増加し、破壊の進行がき裂の分布状況に依存するようになるためである。図 12 の最大き裂深さは、深さ方向にはき裂の合体は生じないので、き裂最深部の応力拡大係数とき裂進展特性から評価され、結果のばらつきは小さい。図 13 は最大深さを持つき裂のアスペクト比と時間の関係を示したものである。き裂のアスペクト比は、微小き裂の発生段階での 1 から、時間の経過とともにき裂が大きくなるにしたがって、0.2～0.4 に低下する。これは実際に見られる SCC き裂の特徴をよく表している⁽³⁾。経過時間 1Ms 以降は、

前述したように表面方向の破壊の進行が停留する一方、深さ方向には進展を続けるので、アスペクト比が大きくなる傾向にある。図 14 はき裂長さ分布をシミュレーション結果と CBB 試験結果と比較したものである。シミュレーション結果は CBB 試験結果と一致しており、SCC 過程を再現していると考えられる。図 15 は臨界き裂長さ 5mm に達したときを SCC 寿命と仮定し、15 回のシミュレーションにおいて得られる SCC 寿命に基づいて、SCC 寿命の累積確率を指数分布確率紙にプロットしたものである。このプロットがほぼ直線関係を示すことから、臨界長さに達するまでの SCC 寿命も指数分布によって表されることがわかる。このことは、小直径試験片の定荷重試験で得られる SCC 破断寿命が指数分布で表されるという実験結果を再現しており、興味深い結果である^{(2) (3)}。

5. 表面き裂の効果

本シミュレーションの大きな特徴は表面き裂の効果、すなわちき裂の進展、合体によるアスペクト比の変化を考慮していることである。これまで報告されているき裂の発生、合体、進展のモン

Fig. 16 Simulation results of through-thickness cracks.

テカルロ・シミュレーションはほとんどの場合、貫通き裂としての取り扱いである^{(8) (11)~(13)}。そこで、表面き裂の効果を明らかにするために、第4節で行ったシミュレーションを貫通き裂とした場合について行った。き裂の応力拡大係数は次式で評価した。

$$K_I = F_I \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

修正係数はアスペクト比 $\alpha=1$ の表面き裂の表面部に対する値に等しくし、 $F_I=0.707$ とした。他の条件は第4節と同じである。

このシミュレーションにより得られた最大き裂長さと時間の関係および最終時のき裂分布の様子を例を図16(a), (b)に示す。図16(a)には、図11の表面き裂の結果も併記している。これらの図よりわかるように、貫通き裂とした場合は、非常に少ないき裂数で連鎖的な合体により限界き裂長さに達し、SCC寿命は極めて短くなる。これは、貫通き裂とした場合、応力拡大係数はき裂長さとともに増加し、き裂の進展と合体が促進されるためである。一方、表面き裂として扱った場合は、き裂の合体によりアスペクト比が低下するため、表面部の応力拡大係数は必ずしも増加せず、き裂の合体、進展が抑制されることになる。

すなわち、表面き裂としての扱いは、平滑表面でのSCC挙動の現実的なシミュレーションを行う上で極めて重要であることがわかる。

6. 各パラメータの影響

6・1 合体領域 SCC挙動を考える上でき裂成長は合体により大きく影響されるため、合体挙動を明らかにすることは重要である。第4節のシミュレーションでは、合体条件を(5)式において $k=0.5$ として行った。(5)式において K_{IA} および σ_{ys} は作用応力および材料の機

械的特性によって決定される。よって、環境などの影響は k によって表現することになり、詳細な検討が必要であるが、現時点ではシミュレーションが実験結果をよく再現できるように決定するということになる。そこで、合体領域の変化によるシミュレーション結果への影響を見るために k の値を変えてシミュレーションを行った。合体領域は第4節で行ったシミュレーションを基準として、合体領域が1/2および2倍となるように k を0.25, 0.5, 1.0の3種類とした。他の条件は第4節と同じである。

図17(a)に各条件下での最大き裂長さが5mmに達したときのき裂分布の例を示す。合体を生じやすくするほど、SCC経過時間は短く、き裂数は少なくなることがわかる。図17(b), (c), (d)に、き裂数と時間の関係、最大き裂長さと時間の関係およびき裂長さ5mmに対するSCC寿命の累積確率を指数分布確率紙にプロットしたものを示す。図17(b)よりわかるように、合体領域が大きいほどき裂の合体や進展によるき裂の表面長さの成長が早いので、より早く応力解放によるき裂発生不可能領域を拡大することにより飽和状態となるき裂数は少なくなる。また、図17(c), (d)からは、合体領域が小さいほど、長寿命となるとともにき裂数が多くなり、寿命のばらつきが大きくなることがわかる。

6・2 き裂発生速度 第4節では、CBB試験による微小き裂発生条件に基づいてシミュレーションを行ったが、この試験では比較的高い鋭敏化度によりSCCによるき裂が発生しやすい状態になっている。そのため、シミュレーションにおいてSCC挙動はき裂の発生と合体に支配される結果になった。そこで、鋭敏化度が低くなった場合、つまりき裂発生速度が低くなった場合にSCC挙動がどのように変化するか見るため、(1)式における a_0 , θ_1 の値を変化させた場合についてシミュレーションを行った。き裂の発生は(1)式を用いて、

き裂が発生するまでの潜伏期間を長く、またき裂発生速度を低くするために $a_0=0.3\text{Ms}$, $\theta=34.54\text{Ms}$ とした。ほかの条件は第4節と同じである。

このシミュレーションにより得られたき裂数と時間の関係および最大き裂長さと時間の関係を第4節の結果とともに図 18(a), (b)に示す。これらの図において、き裂発生速度が低くなることにより、当然の結果として破壊の進行は遅れているが、注目できることは飽和状態になるき裂数が減少していることである。図 18(c)は最大き裂長さが5mmに達し、き裂数がほぼ飽和状態にあるときのき裂分布の例である。図 9(d)に比べてき裂数がかなり少ない様子がわかる。これは、き裂発生速度が遅いため、破壊の進行に対してき裂進展が大きく

く寄与し、初期に形成された進展性き裂の進展によりき裂発生不可能領域が拡大していくためである。以上の結果のように、き裂が発生しにくい条件では、SCC寿命は進展性き裂の形成およびき裂進展速度に強く依存する傾向となる。

7. 結 言

本研究では、表面き裂の効果を考慮して、SCCにおける微小表面き裂の発生から合体・進展により大きき裂が形成される過程のモンテカルロ・シミュレーション

Fig. 17 Influence of coalescence region on simulation results.

Fig. 18 Influence of crack initiation rate on simulation results.

を開発した。高温高純度水環境におけるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の CBB 試験の結果を基礎データとしてシミュレーションを行った結果、シミュレーション結果は、実験結果を良く再現していることを示した。また、貫通き裂を仮定したシミュレーションと比較することにより、平滑表面の SCC 挙動の現実的なシミュレーションを行うためには、表面き裂の効果を考慮することが重要であることを明らかにした。さらに、シミュレーションにおける合体条件、き裂発生条件の影響を明らかにした。

本シミュレーションにおいて、適切な微小き裂発生条件、き裂合体条件、き裂進展特性を用いるならば、実機における SCC 挙動、寿命予測に有効であると思われる。したがって、これらの条件を解明していくことが極めて重要となる。

文 献

- (1) Akashi, M. and Nakayama, G., Stress-Corrosion Crack Initiation Process Model for BWR Plant Materials, *Proceedings International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures*, T. Shoji and T. Shibata, Eds., *JSCE-NACE International*, (1997), p.99-106.
- (2) Nakanishi, K., Tanaka, Y., Yoshida, K. and Akashi, M., Effects of Applied Stress on the Stress-Corrosion Cracking Lifetime of Carbon Steel Weld Metal in High-Purity Water Environment at 250C, *Proceedings International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures*, T. Shoji and T. Shibata, Eds., *JSCE-NACE International*, (1997), p.691-698.
- (3) Akashi, M. and Nakayama, G., A Process Model for the Initiation of Stress-Corrosion Crack Growth in BWR Plant Materials, *ASTM STP 1281*, (1997), pp. 150-164.
- (4) Kamaya, M., Chiba, G., Nakajima, N. and Totsuka, N., Multiple Cracks Initiation and Propagation Behavior of Stainless Steel in High Temperature Water Environment, *Zairyo-to Kankyo*, Vol. 50 (2001), pp. 57-64 (in Japanese).
- (5) Kamaya, M. and Haruna, T., Influence of Local Stress on Initiation of Stress Corrosion Cracking for 304 Stainless Steel, *Proceedings of Zairyo-to-Kankyo 2007* (2007), pp.149-150.
- (6) Saito, K. and Kuniya, J., Mechanical Model to Predict Stress Corrosion Crack Growth of Stainless Steel in High Temperature Water, *Corrosion Science*, Vol. 43, (2001), p.1751-1766.
- (7) JSME Fitness-For-Service Code, JSME S NA1-2004 (2004) (in Japanese).
- (8) Kitagawa, H. and Nakasone, Y., A Monte Carlo Analysis Model of Corrosion Fatigue Process Characterized by Initiation, Growth and Coalescence of Distributed Small Cracks, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.33, No.364, (1984), p.14-20 (in Japanese).
- (9) Tada, N., Kitamura, T. and Ohtani, R., Monte Carlo Simulation of Creep-Fatigue Small Cracks Based on a Three-Dimensional Model of Random Fracture Resistance of Grain Boundaries, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. A*, Vol. 56, No. 524 (1990-4), pp. 28-34 (in Japanese).
- (10) Fujiyama, K., Computer Simulation on Fracture of Engineering Materials at High Temperature, III: Total and/or Remaining Life Assessment of Structural Material, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 45, No. 1 (1996), pp. 137-142 (in Japanese).
- (11) Wang, Y.-Z., Hardie, D. and Parkins, R.N., The Behaviour of Multiple Stress Corrosion Cracks in a Mn-Cr and Ni-Cr-Mo-V Steel: III Monte Carlo Simulation, *Corrosion Science*, Vol. 37, No. 11 (1995), pp. 1705-1720.
- (12) Kamaya, M. and Kitamura, T., A Simulation on Growth of Multiple Small Cracks under Stress Corrosion, *International Journal of Fracture*, Vol.130, (2004), p.787-801.
- (13) Tohgo, K. and Ogai, N., Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking in Structural Metal Materials, *Key Engineering Materials*, Vols. 306-308 (2006), pp. 447-452.
- (14) Murakami, Y. and Nishitani, H., Stress Intensity Factors for Interacting Two Equal Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. A*, Vol. 47, No. 415 (1981), pp. 295-303 (in Japanese).
- (15) Kitagawa, H., Fujita, T. and Miyazawa, K., Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue, *ASTM STP 642*, (1978), p.98-114.