応力分布下の平滑表面における応力腐食割れの モンテカルロ・シミュレーション[†]

鈴木 洋 光* 東 郷 敬一郎** 島 村 佳 伸**
中 山 元*** 平 野 隆***

Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking on Smooth Surface under Non-Uniform Stress Condition

by

Hiromitsu SUZUKI*, Keiichiro TOHGO**, Yoshinobu SHIMAMURA**,
Guen NAKAYAMA*** and Takashi HIRANO***

A Monte Carlo simulation model for the process of stress corrosion cracking (SCC) in structural metal materials under non-uniform stress condition has been proposed. The possible number of crack initiations is set for a given space and initiation times for all cracks are assigned by random numbers based on exponential distributions depending on stress level. Sites and lengths of the cracks are assigned by random numbers based on uniform distribution and normal distribution, respectively. Coalescence of cracks and subcritical crack growth are determined based on the fracture mechanics concept. Through the SCC process in the model, the influence of semi-elliptical surface cracks is taken into consideration. SCC simulations were carried out on a smooth surface under two kinds of non-uniform stress conditions such as residual stress distribution around a weld line. Multiple parallel cracks and multiple cracks along narrow high stress region were obtained depending on the stress distributions, respectively. Simulation results exhibit the applicability of the model to describe the SCC behavior observed in real structures.

Key words : Stress corrosion cracking, Monte Carlo simulation, Crack initiation, Crack coalescence, Subcritical crack growth, Surface crack, Non-uniform stress condition

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には、SCC 対策は重要な課題である。SCC は材料、環境および応力の組み合わせにより生ずる極めて複雑な破壊現象であり、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、ピットからの微小き裂の発生、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)~7)} この 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。

その手法の一つとして、モンテカルロ法によるシミュレーションが挙げられ、これまでに、平滑表面の SCC 挙動と同様に、腐食疲労、クリープ疲労、高温環境下での破壊現象に対して微小分布き裂の発生・合体・進展のシミュレーションが行われている。^{8)~12)} 著者らは、一様応

力場での SCC における微小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、表面き裂効果を考慮することの重要性を指摘した。さらに、シミュレーション結果に及ぼすき裂発生速度および合体領域の影響を考察した。^{13), 14)}

実構造物中では、溶接熱サイクルによる SCC 鋭敏化と溶接残留応力により溶接部近傍に多数の SCC 表面き裂が報告されている。例えば、Fig. 1 に示す溶接線表面近傍の溶接残留応力による SCC を考えると、Fig. 1 (a) では

Fig. 1 SCC on residual stress field.

[†] 原稿受理 平成 20 年 4 月 17 日 Received Apr. 17, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 静岡大学大学院 〒432-8561 浜松市中区城北, Shizuoka Univ., Naka-ku, Hamamatsu, 432-8561

** 正 会 員 静岡大学工学部 〒432-8561 浜松市中区城北, Shizuoka Univ., Naka-ku, Hamamatsu, 432-8561

*** (株) IHI 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町, IHI Corporation, Isogo-ku, Yokohama, 235-8501

Fig. 2 A model of SCC behavior.

溶接線方向の応力により溶接線に垂直な多数のき裂が、Fig. 1 (b)では溶接線垂直方向の応力により熱影響部 (HAZ) に沿ったき裂が予想され、類似の事例が報告されている。^{15)~18)}このような SCC 挙動を予測するためには応力分布を考慮することが重要となる。そこで、本研究では、前報¹⁴⁾で開発した一様応力場での SCC 挙動のモンテカルロ・シミュレーションを応力分布が考慮できるように拡張した。

2 構造材料における SCC 挙動

SCC 環境下では、Fig. 2 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裂へと成長する。^{1)~3)}すなわち、SCC による大き裂は進展性き裂が形成されるまでのミ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。腐食ピット、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。時間 t におけるき裂発生

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

ここで、 $H_i(t)$ は累積故障率、 a_i は分布の下限界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、定常進展の臨界長さに達し、その後、合体と進展により大きき裂へと成長する。

もし、Fig. 3 (a) に示すように、応力分布が存在するような場合は、式 (1) は応力に依存して a_i と θ_i は変化し、応力の高い所では、き裂は発生しやすく、また、き裂先端応力場も高くなるので、き裂進展、合体も生じやすくなるということになる。

Fig. 3 Simulation area under non-uniform stress condition.

3 SCC 過程のモデル化

Fig. 4 にシミュレーションのフローチャートを示す。本研究では Fig. 3 (a) に示すような応力分布下における SCC 挙動を解析するために、Fig. 3 (b) のように解析領域を n 個に分割し、個々の領域では領域平均の様な応力場となる問題を考える。なお、平滑表面から内部方向への応力分布は考慮せず、表面での応力分布が内部でも続くものとする。

Step 1: 発生するき裂は、表面長さ $2a$ 、深さ b 、アスペクト比 $b/a = \alpha$ の半楕円表面き裂とする。結晶粒オーダーの粒界き裂が引張応力方向にほぼ垂直に発生すると考えられる。従って、1 結晶粒領域に 1 個のき裂発生が可能なので、平滑表面での平均結晶粒面積 (Average grain area) を用いて、 i 番目領域 (面積 A_i) に発生可能なき裂数は式 (2) により与えられ、全領域では式 (3) で与えられる。

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

$$N_{\max} = N_{\max 1} + \dots + N_{\max n} \quad (3)$$

Step 2: $N_{\max}$ 個のき裂に対するき裂発生時間は、 n 個に分割された領域ごと与えられるき裂発生の累積確率

Fig. 4 Flow chart of SCC simulation.

分布 $F_i(t)$ に基づく乱数により決定される。

Step 3：き裂は割り当てられた発生時間の短いものから順に発生させ、き裂発生位置は発生時間を与えた領域における一様乱数により、き裂長さは正規乱数により決定される。Fig. 5 に示すように、既存のき裂の上下は応力解放によりき裂の発生が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ときは、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 Fig. 6 の修正係数を用いて次式により評価した。¹⁹⁾

$$K_{IA} = F_{IA} \sigma_y \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

$$K_{IB} = F_{IB} \sigma_y \sqrt{\pi b} \quad (5)$$

また、き裂が小さく一つの分割領域内に存在する場合にはその領域の応力値を用いて計算し、き裂が領域をまたいで存在する場合は、き裂表面部、最深部が存在する領

Fig. 5 Inactive region around a pre-existing crack.

Fig. 6 Correction factors as functions of an aspect ratio for a semi-elliptical surface crack.

域の応力値を用いて計算した。すなわち、応力拡大係数の評価には近似的な方法を用いた。

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、き裂先端の円形領域内に他のき裂先端が入った場合に起こるものとする。²⁰⁾2つのき裂の合体領域の臨界半径は次式で表される。

$$r_c = \frac{k}{\pi} \left(\frac{K_{IA}}{\sigma_{ys}} \right)_{\text{crack1}}^2 + \frac{k}{\pi} \left(\frac{K_{IA}}{\sigma_{ys}} \right)_{\text{crack2}}^2 \quad (6)$$

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き裂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作る合体領域半径 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、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 の小さい表面き裂となる。

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、Fig. 5 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。

4 応力分布下の SCC シミュレーション

シミュレーションは鋭敏化処理した SUS304 の高温高純度水環境 (288℃) を想定し, Fig. 3 に示されるような y 軸方向の引張応力 σ_y が x 軸方向に分布する 20mm × 10mm の長方形領域と Fig. 7 に示されるような y 軸方向に分布する 10mm × 20mm の長方形領域に対して行った. これらは Fig. 1 に示すような溶接線近傍の残留応力分布を模擬したものである. 平均粒径を 0.08mm として, これらの領域を 20mm × 2mm の長方形領域に 5 分割すると, 各領域の発生可能なき裂数は 6250 個となり, 全領域にわたる発生可能なき裂総数は 31250 個とした. 降伏応力は, SUS304 の 288℃での応力-ひずみ関係より $\sigma_{ys} = 162\text{MPa}$ とし, 作用応力はいずれの領域に対しても y 軸方向に引張応力が作用するものと仮定し, 中央領域が最も高く, 外側の領域ほど低くなるように設定し, 領域Ⅲで 200MPa, 領域Ⅱ, Ⅳで 160MPa, 領域Ⅰ, Ⅴで 120MPa とした. 微小き裂発生 の累積確率分布は式 (1) の指数分布を仮定し, 中央領域が最もき裂発生速度が大きく, 外側の領域ほど小さくなるように設定し, 領域Ⅲで $a_i = 0.0258\text{Ms}$, $\theta_i = 2.97\text{Ms}$, 領域Ⅱ, Ⅳで $a_i = 0.0652\text{Ms}$, $\theta_i = 7.50\text{Ms}$, 領域Ⅰ, Ⅴで $a_i = 0.3\text{Ms}$, $\theta_i =$

Fig. 7 Simulation area under non-uniform stress condition.

34.54Ms とした. 領域Ⅲにおける解析条件は, 前報¹⁴⁾におけるものと同じであり, これを基準に他の領域の解析条件を設定した. 各領域に対する発生可能な 6250 個のき裂に対する発生時間をそれぞれの指数分布に基づく乱数で割り当て, 全領域で発生時間の短いものから発生させた. き裂発生位置 (x, y) は, 各座標に対して区間 0 ~ 2mm, 区間 0 ~ 20mm の一様乱数により, き裂長さ $2a$ は, 粒径と同程度の大きさとして, 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 $b/a = 1$ とした. また, き裂の合体条件は, 式 (6)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, き裂進展速度は SUS304 に対し提案されている da/dt - K_I 関係⁶⁾に従うものとした. 2Ms (555 時間) 経過時点でシミュレーションを終了するものとし, 以上の条件でそれぞれ 15 回のシミュレーションを行った.

5 結果および考察

5.1 σ_y が x 軸方向に分布している場合

Fig. 3 に示すように σ_y が x 軸方向に分布している場合のシミュレーション結果を示し考察する. Fig. 8 はシミュレーションによって得られたき裂分布の時間に対する変化を示したものである. 100 時間経過時点では, 微小き裂が応力分布に応じて発生しており, 特に高い応力となっている中央部ではき裂密度が高くなっている. 300 時間経過後では, さらにき裂が発生するとともに, 中央部にき裂の合体と進展により大きく成長したき裂が観察されるようになる. 500 時間経過後では, 中央部に大きなき裂が多数並んでいる様子が観察されるが, 300 時間と比較すると, 中央領域では新たなき裂の発生はあまり見られず, 隣接する領域へ合体や進展によりき裂が成長していることがわかる. Fig. 9 は 15 回のシミュレーションに対して各領域におけるき裂の発生数と時間の関係を示したものである. 図中には各領域の指数分布に基づく計算

Fig. 8 Variation of crack distribution with time under the stress distribution of Fig. 3.

Fig. 9 Number of initiated cracks for each region as a function of time. (Stress distribution of Fig. 3)

結果も示してある。最も応力が高く、き裂発生速度の大きい領域Ⅲのき裂発生数は初期段階では指数分布によるき裂数とほぼ等しくなっているが、時間の経過とともに合体や進展などにより大きなき裂が形成され、き裂発生不可能領域が広がり、飽和状態となっている。一方、Ⅰ、Ⅴ領域ではき裂数が少なく、大きなき裂がほとんどないためにき裂発生不可能領域が形成されず、発生しき裂数はほぼ指数分布に基づくものに従う結果となっている。領域Ⅱ、Ⅳについては200～300時間経過後より指数分布からずれ始めているが、これはき裂数の増加とともに中央領域から成長してきた大きなき裂による影響が大きいと考えられる。Fig. 10は最大き裂長さを時間に対して示したものである。2mmを超えた時点から、小さなき裂との合体と進展を繰り返すことで成長している。これは、1つの領域の x 方向の長さは2mmであり、中央の領域Ⅲで形成された大きなき裂が隣接領域に入り、進展を阻害する大きなき裂が存在しないために進展しやすい状態にあるためである。さらに、6mmを超えた時点からは、ほぼ進展による成長となっている。これは、き裂が発生しにくい外側のⅠ、Ⅴ領域に大きき裂の先端が入り、合体するき裂や進展を阻害するき裂がさらに減少するためである。これより、低応力域では進展がき裂の成長に対し支配的になり、応力がさらに低くなるとき裂の進展が止まる可

Fig. 10 Maximum crack length as a function of time. (Stress distribution of Fig. 3)

能性が考えられる。Fig. 11は最大き裂深さを時間に対して示したものである。深さ方向に対しては進展を阻害するものや合体がないため進展により成長し、シミュレーションによるばらつきも小さい。Fig. 12は最大き裂長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。微小き裂は発生時にアスペクト比1の半円状表面き裂となっているが、合体することによりアスペクト比は大きく低下する。その後、深さ方向に進展するためアスペクト比は増加する。これを繰り返し、時間の経過とともにき裂が大きくなるにしたがって、アスペクト比は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⁾

5・2 σ_y が y 軸方向に分布している場合

続いて、Fig. 7に示すように σ_y が y 軸方向に分布している場合のシミュレーション結果を示し考察する。Fig. 13のき裂分布の時間に対する変化においては、100時間経過時点では、微小き裂が応力分布に応じて発生しており、特に高い応力となっている中央部ではき裂密度が高くなっている。300時間経過後では、さらにき裂が発生するとともに、中央部にき裂の合体と進展により大きく成長したき裂が観察されるようになる。500時間経過後では、中央の高応力領域に沿って大きなき裂が多数存在する様子が観察される。Fig. 14の各領域におけるき裂の発生

Fig. 11 Maximum crack depth as a function of time. (Stress distribution of Fig. 3)

Fig. 12 Aspect ratio of the longest crack as a function of time. (Stress distribution of Fig. 3)

Fig. 13 Variation of crack distribution with time under the stress distribution of Fig. 7.

Fig. 14 Number of initiated cracks for each region as a function of time. (Stress distribution of Fig. 7)

数に関して, Fig. 9と比較すると, 領域Ⅲおよび領域Ⅰ, Ⅴについては同じような傾向を示しているが, 領域Ⅱ, Ⅳではばらつきが大きくなっている. これは x 軸方向に応力分布を有する場合では, 高応力領域からき裂の進展による影響を受けていたのに対し, y 軸方向に応力分布を有する場合では, 領域境界近傍における大きなき裂による応力解放域の影響を受けるためである. Fig. 15に示す最大き裂長さの時間に対する変化は, Fig. 10とは異なり, 大きなき裂は高応力領域に沿って成長するために合体が起こりやすく, 発生と合体が支配的となっている. また, Fig. 10では, シミュレーションによるばらつきが小さいのに対して, Fig. 15では, 大きなき裂が密集して

Fig. 15 Maximum crack length as a function of time. (Stress distribution of Fig. 7)

形成されることにより応力解放域が形成され, き裂の合体および進展が生じにくくなるために最大き裂長さが停留する場合もあり, ばらつきも大きい. Fig. 16の最大き裂深さに関しては, Fig. 11と同様に深さ方向へは進展により成長し, ばらつきも小さい. Fig. 17に示す最大き裂長さを持つき裂のアスペクト比は合体により0.2~0.4程度に低下するが, き裂の表面方向への成長が停留すると, 深さ方向には進展を続けるのでアスペクト比は大きくなる傾向にある. Fig. 12と比較するとばらつきがやや大きくなっている.

Fig. 16 Maximum crack depth as a function of time. (Stress distribution of Fig. 7)

Fig. 17 Aspect ratio of the longest crack as a function of time. (Stress distribution of Fig. 7)

以上の σ_y が y 軸方向に分布している場合は、き裂進展方向 (x 軸方向) への応力分布は一樣であるため、シミュレーション結果の最大き裂長さ (Fig. 15), 最大き裂深さ (Fig. 16), 最大き裂のアスペクト比 (Fig. 17) に及ぼす y 軸方向応力分布の影響は小さく、前報の一樣応力場のシミュレーション結果とほぼ同様な結果となっている。

6 結 言

本研究では、応力分布下の SCC 挙動を予測するために、前報で開発した一樣応力場での SCC 挙動のモンテカルロ・シミュレーションをさらに応力分布が考慮できるように拡張した。SUS 304 における溶接部近傍の残留応力を模擬した 2 種類の応力分布下で SCC 挙動のシミュレーションを行った結果、溶接線に垂直に形成された多数のき裂や HAZ に沿って形成された多数のき裂の状況を示すことができた。このようなき裂の事例として、原子炉内のシュラウドサポート溶接部¹⁵⁾シュラウドリング溶接部¹⁶⁾その他^{17), 18)}に報告されている。実際には、溶接金属、母材、HAZ など材料の SCC 感受性の違いの影響もあり直接の比較はできないが、本シミュレーションにおいて事例に類似したき裂の様子が得られたことは、本シミュレーションの可能性を示唆するものである。

本シミュレーションは、き裂発生条件、き裂合体条件、き裂進展特性、さらに材料の SCC 感受性に関する不均質性など適切なインプットデータを用いるならば、応力分布を考慮した実機における SCC 挙動、寿命予測に有効な手法になり得るものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) M. Akashi and G. Nakayama, "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, pp.99-106 (1997).
- 2) K. Nakanishi, Y. Tanaka, K. Yoshida and M. Akashi, "Effects of Applied Stress on the Stress-Corrosion Cracking Lifetime of Carbon Steel Weld Metal in High-Purity Water Environment at 250°C", Proceedings International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, T. Shoji and T. Shibata, Eds., JSCE-NACE International, pp.691-698 (1997).
- 3) M. Akashi and G. Nakayama, "A Process Model for the Initiation of Stress-Corrosion Crack Growth in BWR Plant Materials", ASTM STP 1281, pp.150-164 (1997).
- 4) M. Kamaya, G. Chiba, N. Nakajima and N. Totsuka, "Multiple Cracks Initiation and Propagation Behavior of Stainless Steel in High Temperature Water Environment", Zairyo-to-Kankyo, Vol.50, pp.57-64 (2001).
- 5) M. Kamaya and T. Haruna, "Influence of Local Stress on Initiation of Stress Corrosion Cracking for 304 Stainless Steel", Proceedings of Zairyo-to-Kankyo 2007, pp.149-150 (2007).
- 6) K. Saito and J. Kuniya, "Mechanical Model to Predict Stress Corrosion Crack Growth of Stainless Steel in High Temperature Water", Corrosion Science, Vol.43, pp.1751-1766 (2001).
- 7) JSME Fitness-For-Service Code, JSME SNA1-2004 (2004).
- 8) H. Kitagawa and Y. Nakasone, "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, pp.14-20 (1984).
- 9) N. Tada, T. Kitamura and R. Ohtani, "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, pp.28-34 (1990).
- 10) K. Fujiyama, "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, pp.137-142 (1996).
- 11) Y.-Z. Wang, D. Hardie and R. N. Parkins, "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, pp.1705-1720 (1995).
- 12) M. Kamaya and T. Kitamura, "A Simulation on Growth of Multiple Small Cracks under Stress Corrosion", International Journal of Fracture, Vol.130, pp.787-801 (2004).
- 13) K. Tohgo and N. Ogai, "Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking in Structural Metal Materials", Key Engineering Materials, Vols.306-308, pp.447-452 (2006).
- 14) K. Tohgo, H. Suzuki, Y. Shimamura, G. Nakayama and T. Hirano, "Monte Carlo Simulation Taking Account of Surface Crack Effect for Stress Corrosion Cracking in a Stainless Steel SUS 304", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Ser. A, Vol.74, No.737, pp.128-136 (2008).
- 15) Homepage of The Japan Atomic Power Company, <http://www.japc.co.jp/news/bn/h11/111210.html>.
- 16) Homepage of Ministry of Economy, Trade and Industry, <http://www.meti.go.jp/report/data/g41022bj.html>.
- 17) M. Rivera, S. Bolinger and C. Wollenweber, "Carbonate Cracking Risk Assessment for a FCCU Gas Plant", Corrosion 2004, Paper No.04639, NACE International (2004).
- 18) E. Yamamoto, "Damage to Stainless Steel at Chemical Plants and Countermeasures", Symposium on Recent Progress in Welding Technology from the Viewpoint of Stainless Steels, The Iron and Steel Institute of Japan, pp.1-10 (2002).
- 19) Y. Murakami and H. Nishitani, "Stress Intensity Factor for Interacting Two Equal Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. A, Vol.47, No.415, pp.295-303 (1981).
- 20) H. Kitagawa, T. Fujita and K. Miyazawa, "Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue", ASTM STP 642, pp.98-114 (1978).