

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19360047
 研究課題名(和文) 応力腐食割れにおける各階層の挙動解明と統合化シミュレーションによる寿命評価
 研究課題名(英文) Study on multi-scale behavior of stress corrosion cracking and life prediction based on unified simulation
 研究代表者
 東郷 敬一郎 (TOHGO KEIICHIRO)
 静岡大学・工学部・教授
 研究者番号： 10155492

研究成果の概要(和文)： 構造用金属材料における応力腐食割れ(SCC)は、材料、応力および腐食環境の組み合わせの下で、微小なき裂の発生と合体、き裂進展、そして多数の大きなき裂の形成あるいは最終破壊というマイクロからマクロにわたる階層過程により生じる。本研究では、微小なき裂発生に対する確率過程とき裂の合体と進展に対する破壊力学に基づいて、SCC過程の Monte Carlo シミュレーションを開発した。特に、本シミュレーションでは、平滑表面における半楕円表面き裂の影響と部材の応力分布の影響を考慮できるようにしている。鋭敏化処理したステンレス鋼SUS 304に対するシミュレーション結果は実験により観察されるSCC挙動を再現しており、本シミュレーションは実構造物におけるSCC挙動の予測に適用できることを示した。

研究成果の概要(英文)： 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 research, 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 and consideration of non-uniform stress condition. The simulation results on a sensitized stainless steel SUS 304 describe well the SCC behavior observed in experiments, and indicate the applicability of the present model to a prediction of the SCC behavior in real structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2008年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：応力腐食割れ、モンテカルロ・シミュレーション、き裂発生、き裂合体、き裂進展、表面き裂、分布き裂、オーステナイト系ステンレス鋼

1. 研究開始当初の背景

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マイ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。SCC の進行を律速する支配因子は、微小分布き裂形成まではき裂発生の潜伏期間と確率過程、巨視的き裂形成までは微小き裂の合体、巨視的き裂形成後はき裂進展というように、各階層で異なるので、SCC 寿命を正確に予測するためには各階層での挙動解明が重要である。現状は、巨視的き裂形成後に重要となる進展挙動に関してはかなり解明されているものの、微小き裂発生過程および微小分布き裂から巨視的き裂が形成される過程は不明のままである。従って、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 (数 mm~十数 mm) 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、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。

2. 研究の目的

本研究では、各階層における SCC 挙動、すなわち微小き裂発生過程、微小き裂の合体・進展過程、巨視的き裂の合体・進展過程を明らかにすること、これらを統合化するモンテカルロ・コンピュータ・シミュレーションを開発すること、シミュレーション結果に基づいて実際の構造物の SCC 挙動、寿命評価を行う方法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)SCC試験によるSCC挙動の解明

鋭敏化処理したSUS304について、加速環境下でのSCC試験を行い、結晶粒オーダーの微小き裂発生からき裂の合体・進展により巨視的き裂が形成されるまでの各階層の基本的挙動を明らかにする。

(2)微小き裂の発生条件と合体条件

SCC試験結果に基づいて、結晶粒オーダーの微小き裂の発生条件すなわちき裂発生の累積確率分布を環境、応力の関数として決定する。また、き裂の合体状況の観察に基づいて、き裂合体条件を明らかにする。

(3)モンテカルロ・シミュレーションの開発

本シミュレーションでは、結晶粒オーダーの微小き裂が潜伏期間の後に確率的に発生するものとし、微小き裂発生は、発生時間、き裂長さ、発生位置の各確率分布に基づいてランダムに生じ、き裂の合体と進展はき裂の力学的状況により確定的に起こるものとし、モンテカルロ法と破壊力学を採用する。実構造物に見られる溶接残留応力によるSCC挙動にも適用するため、任意の応力分布下で、表面き裂の発生・合体・進展を考慮した高精度、高効率シミュレーション法を開発する。

(4) SCC寿命評価法の確立

実際の構造物中の部材が受ける応力状態、環境を境界条件としてシミュレーションが行われると、シミュレーション結果は、時間経過に対するき裂発生数、き裂分布、最大き裂長さおよび限界き裂に達する時間 (SCC寿命) 等が得られる。新たな乱数に対してこのシミュレーションを繰り返すことにより、シミュレーションの結果は統計量として得られることになる。この統計量に基づいた寿命評価法の確立を行う。

4. 研究成果

(1)SCC試験およびき裂発生条件と合体条件

鋭敏化処理 (700°C/2hr+500°C/24hr) を施した SUS304 に対して、沸騰水型原子炉 (BWR) 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

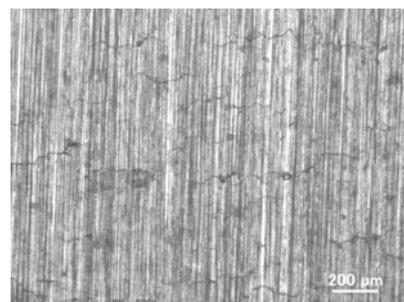


図1 SCC試験による微小表面き裂の例

素量 8ppm) で CBB (Crevice bent beam) 試験と定荷重 SCC 試験を行った。その結果、図 1 に示すように、試験片平滑表面に多数の微小き裂の発生が観察された。例えば、引張応力 200MPa で 10mm×40mm 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。

SCC 試験の観察結果に基づいて、SCC 過程は、図 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ことが明らかとなった。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。(II) と (III) はポアソン確率過程とみなされることから、微小き裂の発生数の分布はポアソン分布に従うこととなる。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。

また、き裂の合体は隣接する 2 つのき裂のき裂先端がある限界の距離に近づくと起こり、き裂長さ、作用応力に依存することが分かった。そこで、以下のき裂の合体条件を提案した。き裂の合体は、き裂先端の活性化領

域を考慮することにより、図 3 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する。2 つのき裂の合体領域の臨界半径は次式で表される。

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

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。表面き裂の合体に関しては、図 4 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。

(2) モンテカルロ・シミュレーションの開発

SCC における大きき裂は、図 2 に示したように、腐食ピットの発生・成長、ピットからの微小き裂発生による微小分布き裂の形成、き裂の進展と合体といったマイクロからマクロ

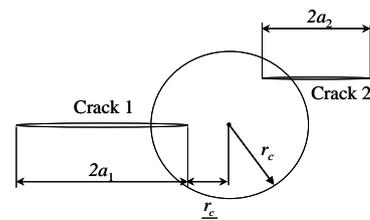


図 3 き裂の合体条件

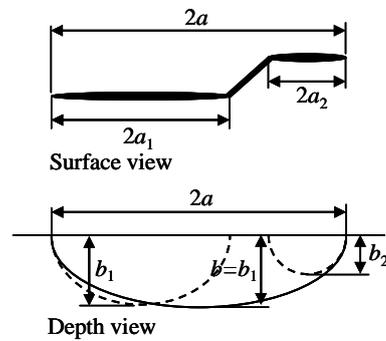


図 4 表面き裂の合体

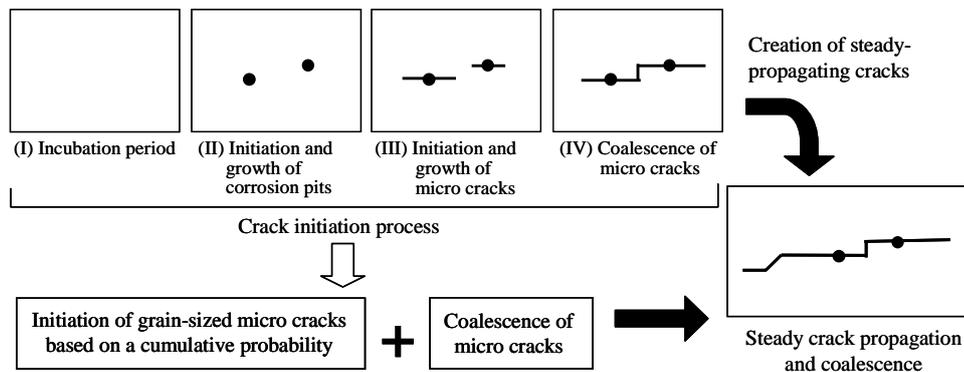


図 2 SCC 挙動のモデル

にわたる各階層の過程を経て形成される。微小き裂が形成されるまでの過程を潜伏期間と結晶粒オーダーの微小き裂の発生にモデル化して、この微小き裂発生過程とその後の過程を統合化したモンテカルロ・シミュレーションを開発した。図5にシミュレーションのフローチャートを示す。

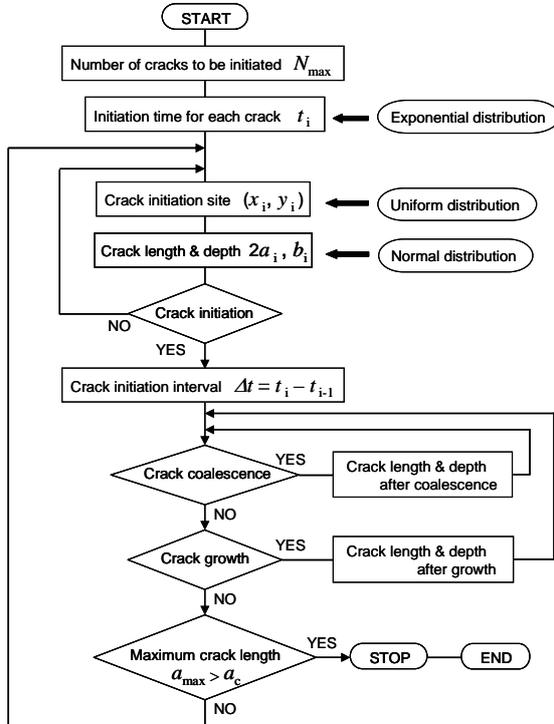


図5 シミュレーションのフローチャート

①本シミュレーションの特徴

- i) 一様応力場あるいは分布した応力場にある平滑表面における半楕円表面き裂の発生、合体、進展を取り扱っている。
- ii) 結晶粒オーダーの微小粒界き裂の発生を、発生時間に関しては(1)式の指数分布に基づく乱数、き裂寸法に関しては正規乱数、場所に関しては一様乱数によりランダムに生じるものとしている。
- iii) き裂の発生に関して、一結晶粒の領域内には1個のき裂しか発生できないものとし、粒界破壊を表現している。
- iv) き裂先端の応力の強さは応力拡大係数で表現し、表面き裂に対して表面部と最深部の応力拡大係数を用いている。
- v) き裂の進展は、定常進展製き裂の形成に対しては、応力拡大係数がき裂進展の下限界 K_{ISCC} に達すること、その後の進展挙動はき裂進展特性 ($da/dt - K_I$ 関係) により記述されるものとしている。
- vi) 表面き裂の合体は、図4、図5に基づいて起こるものとしている。したがって、表面き裂の応力拡大係数は、合体により、表面部では低下し、最深部では生じることになる。

vii) 既に形成されたき裂の上下の円形領域は、応力開放により低応力状態になっていることから、この領域には亀裂は発生しないこと、この領域内のき裂とは合体しないこと、この領域内へはき裂は進展しないこととしている。

以上の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、シミュレーションの結果は統計量として得られることになる。

②シミュレーション例

鋭敏化処理 (700°C/2hr+500°C/24hr) した SUS304 における SCC 挙動のシミュレーション例を示す。数値シミュレーションは一様引張応力場の平滑表面における 20mm×20mm の正方形領域に対して行った。CBB 試験の微小き裂発生データに基づいて、微小き裂発生の指数分布(1)式において、 $a_i=0.0258Ms$, $\theta_i=2.97Ms$ とした。き裂発生位置(x, y)は区間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の正規分布による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、(2)式において $k=0.5$ とした。進展性き裂長さに対しては、 $K_{ISCC}=2MPa\sqrt{m}$ 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。進展量は SUS304 の $da/dt - K_I$ 関係により決定した。以上の条件化で15回のシミュレーションを行った。

図6は、シミュレーションによる230時間後の分布き裂の例である。き裂の発生、合体、進展により、大きなき裂が形成されている様子がわかる。図7は経過時間に対するき裂数の変化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8は最大き裂長さを経過時間に対して示したものである。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

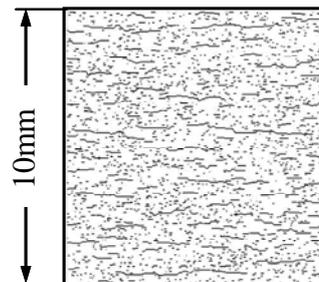


図6 シミュレーションによる分布き裂の例

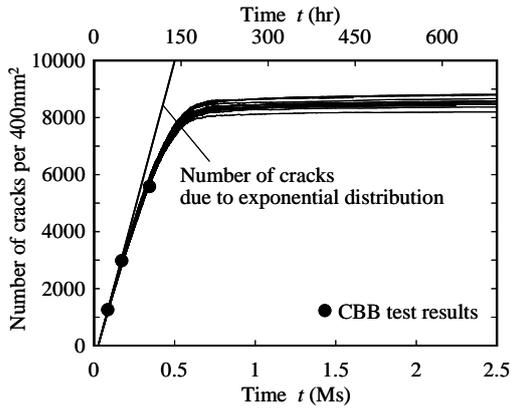


図7 経過時間に対するき裂数の変化

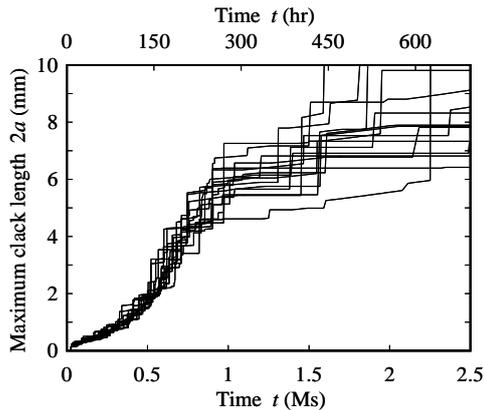


図8 経過時間に対する最大き裂長さの変化

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、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9はき裂長さ分布をシミュレーション結果とCBB試験結果で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10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。

図11は中央部が高い応力となっている応力分布下でのシミュレーションによるき裂分布の例である。中央部に大きく成長したき裂が多数並んで観察される。この結果より、本シミュレーションは構造物中の溶接線近傍の溶接残留応力場でのSCC挙動を予測でき

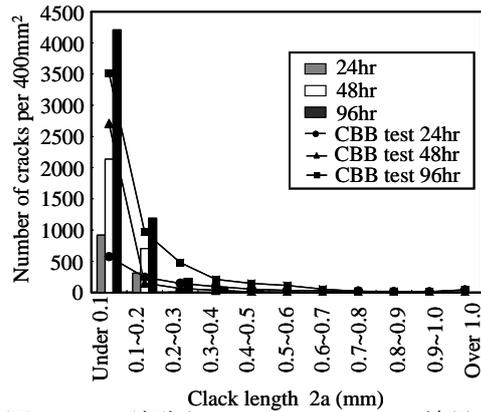


図9 CBB試験とシミュレーション結果におけるき裂数の比較

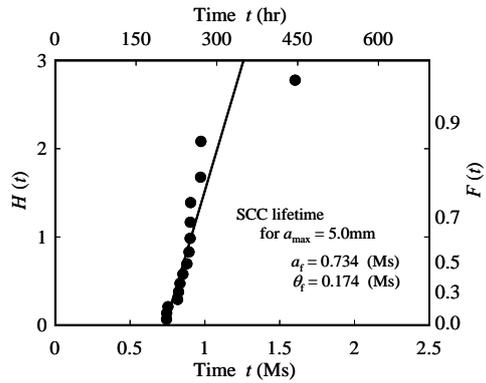


図10 シミュレーションによるSCC寿命の指数分布確率紙プロット

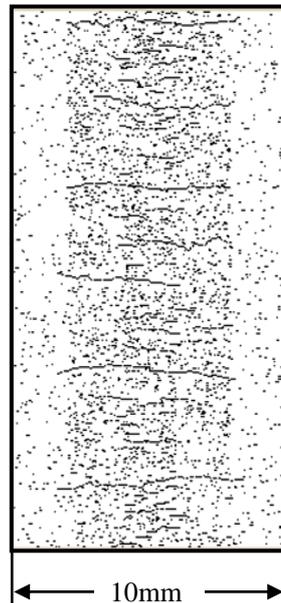


図11 応力分布下でのシミュレーションによるき裂分布

ることがわかる。

(3)SCC挙動のシミュレーションに基づく寿命評価法の確立

シミュレーション例に示したように、SCC挙動のシミュレーションを種々のき裂発生

条件、合体条件、進展特性をインプットデータとして入力して行った結果、これまで実験により観察されていたSCC挙動を合理的に説明できた。ある条件化でモンテカルロ・シミュレーションを繰返すことにより、き裂分布、限界き裂長さあるいは最終破壊に達するまでの時間（SCC寿命）等が統計量として得られ、これらの統計量に基づく余寿命評価（図10参照）が可能であることを明らかにした。（4）実機におけるSCC挙動への応用と有効性

鋭敏化度の異なる材料におけるSCC過程をシミュレーションした結果、鋭敏化度が低くなるほど、き裂進展過程が重要となり、数個の主き裂の形成により破壊に至ることが示唆された。このことは実機のSCC挙動の特徴を説明するものである。この結果および前年度開発した大きき裂まで解析可能な階層化シミュレーション法により、本手法による実機の寿命予測が可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

- ① K. Tohgo, H. Suzuki, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano Monte Carlo simulation of stress corrosion cracking in a smooth surface of sensitized stainless steel type 304, Corrosion Science, 査読有, Vol. 51, 2009, pp. 2208-2217.
- ② 鈴木洋光, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 中山元, 平野隆, 応力分布下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, 材料, 査読有, 57巻, 2008, pp. 1191-1197.
- ③ 東郷敬一郎, 鈴木洋光, 島村佳伸, 中山元, 平野隆, 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, 日本機化学会論文集 A 編, 査読有, 74巻, 2008, pp. 128-136.
- ④ K. Tohgo, H. Suzuki, Y. Shimamura, Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking in Structural Metal Materials Taking Account of Surface Crack Effects, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 353-358, 2007, pp. 1068-1071.

〔学会発表〕（計9件）

- ① H. Suzuki, K. Tohgo, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano, Monte Carlo simulation of stress corrosion cracking on smooth surface of a sensitized stainless steel type 304 under non-uniform stress condition, APCMM, 2009年11月14日, 横浜.

- ② H. Suzuki, K. Tohgo, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano, Monte Carlo simulation of stress corrosion cracking in an austenitic stainless steel type 304, 12th International Conference on Fracture, 2009年7月14日, Ottawa, Canada.
- ③ H. Suzuki, K. Tohgo, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano, Monte Carlo simulation of stress corrosion cracking on smooth surface under non-uniform stress condition, Asian-Pacific Corrosion Forum-Corrosion in Nuclear Systems 2009, 2009年5月22日, さいたま.
- ④ 鈴木洋光, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 原木良輔, 応力腐食割れのモンテカルロ・シミュレーションのマルチスケール化, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008年9月17日, 草津.
- ⑤ H. Suzuki, K. Tohgo, Y. Shimamura, G. Nakayama, T. Hirano, Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking on Smooth Surface under Non-uniform Stress Condition, JSSUME2008, 2008年8月25日, 浜松.
- ⑥ H. Suzuki, K. Tohgo, Y. Shimamura, G. Nakayama, Y. Sakakibara, T. Hirano, Monte Carlo Simulation of Stress Corrosion Cracking in an Austenitic Stainless Steel Type 304 Taking Account of Surface Crack Effect, 腐食防食協会 材料と環境 2008, 2008年5月13日, 大宮.
- ⑦ 鈴木洋光, 東郷敬一郎, 島村佳伸, 中山元, 平野隆, 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, 日本材料学会 第13回破壊力学シンポジウム, 2007年12月17日, 熱海.

〔その他〕

<http://mechmat.eng.shizuoka.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東郷 敬一郎 (TOHGO KEIITIRO)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号：10155492

(2) 研究分担者

島村 佳伸 (SHIMAMURA YOSHINOBU)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号：80272673

荒木 弘安 (ARAKI HIROYASU)
静岡大学・工学部・助教
研究者番号：60115433

