

令和元年6月22日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06052

研究課題名(和文) マルチマイクロプローブ電位差法によるその場損傷評価法および寿命予測法の開発

研究課題名(英文) Development of A New In-service Non-destructive Evaluation Method of Multiple-site Small Cracks by Using Multi-microprobe DC Potential Method

研究代表者

中曽根 祐司 (Nakasone, Yuji)

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：10266918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：先進発電設備は高温・高圧の厳しい環境で使用されるため、長期間の使用で機器部材の劣化・損傷、特に多数の微小き裂による破壊事故を起すことがある。本研究では、部材表面の多数の点の直流電位差を高速に効率よく測定できるマルチマイクロプローブ直流電位差測定システムを開発するとともに、部材中に発生したき裂が個々にランダムに成長することによって生じる電位差のばらつきの時間的変化、特に、破断直前にき裂同士が合体によって急速成長する少数のき裂によって電位差のばらつきが急増する点を検出することによってその部材の寿命を予測する新しい方法を開発した。この方法は、温度一定の場合にも時間的に変動する場合にも適用できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温機械・構造物の代表的な破壊様式である疲労やクリープでは、部材表面上に多数の微小なき裂が発生・成長し、互いに合体することによって急激に大きなき裂が発生して破壊に至ることがある。従来は、時間基準保全(定期検査)によってこのような破壊を回避していたが、この方式の保全は「いじり壊し」や稼働率の大幅な低下を招くため、最近では、機器や部材の状態を観察しながら、機器の検査を行う状態基準保全技術の開発が期待されている。本研究の成果は、状態保全技術の1つとして有望な方法となるばかりではなく、従来困難とされてきた微小分布き裂による破壊の寿命予測を可能とする技術の開発であり、学術的、社会的に大きな意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Structural components in advanced power plants can fail due to multiple-site small cracks in severe environments at elevated temperatures under high pressure. In order to evaluate these cracks non-destructively to predict component failure life, this study has developed a new DC potential difference measurement system equipped with the multiple microprobe and a new life-prediction method based on the statistical analysis of the variation in potential difference caused by the random nature of the growth of the multiple-site cracks.

Both for the low-cycle fatigue and creep of round bar type specimens of austenitic stainless steels such as SUS316L and 316FR, normalized variation of the potential difference on the specimens vs. number of cycles or time curves show bending points clearly at 90 to 95 % of life regardless of temperature and fracture process. Therefore, the bending points can predict the (residual) life of a component subjected to fatigue or creep at high temperatures.

研究分野：材料強度学

キーワード：寿命予測 微小分布き裂 直流電位差法 マルチマイクロプローブ 高温低サイクル疲労 クリープ  
非破壊検査 確率・統計的取扱

## 1. 研究開始当初の背景

近年、発電プラントの安全性・信頼性の向上に対する要求はますます高まっており、プラントの保全技術の向上が必要とされている。その中で重要な問題の1つは、高温低サイクル疲労によって発生する多数のき裂が関与する破壊である。現在、これらの劣化・損傷は一定周期ごとに実施される『時間基準保全(TBM; Time-Based Maintenance)』によって、機械・構造物の稼働を停止させた上でオフライン検出され、劣化・損傷度に応じて機械・構造物の補修や部材交換を行うといった取組が一般的である。しかし、このような取組ではプラントのディペンダビリティ (dependability; 稼働率を加味した信頼性) の著しい低下を招く原因となっている。

そのため、最近、プラントの各種機器・部材については、地震や温度異常などによる想定外の劣化・損傷に備え、プラントのディペンダビリティを向上させるため、機器・部材の状態を常時監視しながら、その劣化・損傷の状態に応じて適切な措置をとる『状態監視保全(CBM; Condition-Based Maintenance)』の導入が求められている。

しかし、現時点では、機器・部材の状態を供用中に常時監視し、劣化・損傷を非破壊的に検出する有効な方法がない[1]ため、CBMが実現できないのが現状である。

一方、複数疲労き裂の発生・成長・合体による破壊過程の解析と寿命予測については世界的に先駆的な研究が我が国でなされており[2]、その研究を応力腐食割れ(SCC)や非貫通き裂に発展させた研究は現在でも続けられているが、供用中に複数き裂を非破壊的に検出・評価し、CBMを構成しようとする研究はない。

また、超音波探傷や電磁氣的解析[3]により、単一き裂の検出や寸法同定を行う研究がなされてはいるが、ほとんどの場合、その対象は寿命後期に現れる単一の大きなき裂(主き裂)である。しかし、高温低サイクル疲労では寿命初期～中期において数十 $\mu\text{m}$ 程度の複数の微小き裂が高密度に発生し、これらが合体しながら成長し主き裂となって破壊を招くため、CBMに基づく予防保全技術を開発するためには数十 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの複数微小き裂を非破壊的に検出・評価できる方法が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、873および923Kの高温領域の高温低サイクル疲労における数十 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの複数微小き裂を非破壊的に検出・評価できる方法を開発するため、

- (1) マルチ・マイクロプローブ電位差法による劣化・損傷のその場非破壊検出・評価法の開発、
- (2) 高温低サイクル疲労損傷進展メカニズムの解明、ならびに
- (3) 高温低サイクル疲労の寿命予測法の開発

を有機的に統合した研究を行うことにより、代表的な耐熱鋼であるオーステナイト系ステンレス鋼の高温低サイクル疲労における分布微小き裂(multiple-site small cracks)が関与する高温低サイクル疲労の寿命予測を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 試験片および高温疲労試験

供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた。試験片は丸棒状で、全長 175 mm、平行平滑部の直径 8 mm、長さ 18 mm である。高温疲労試験は、873 および 923 K 大気中において、ひずみ速度  $d\varepsilon/dt=0.1\%/sec$ 、全ひずみ幅  $\Delta\varepsilon_f=0.35\sim 1.1\%$  の範囲で行った。中断試験法によって室温・大気中でマルチ・マイクロプローブによる電位差測定(3.2節)を行うとともに、き裂表面長を測定し、疲労の各段階におけるき裂表面長の確率分布を求めた(3.3節)。

### 3.2 マルチ・マイクロプローブ直流電位差法

電位差測定には 32 本の微小探針を有するマルチ・マイクロプローブを用いた。図 1 にマルチ・マイクロプローブの概略図を示す。プローブには、16 本の微小探針が 1 mm 間隔で一列に並んだものが 2 列配置されている。測定原理は 4 探針プローブの場合と同様で、相隣の 4 本の探針の外側 2 本から定電流を印加し、内側 2 本の探針で電位差を測定する。この針の役割を順次電氣的に切替えることで多点の電位差を効率

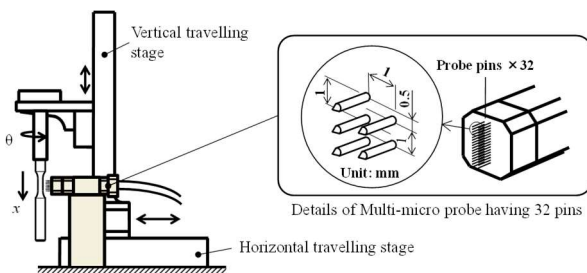


図 1 丸棒試験片表面全面の分布き裂を検出するマルチ・マイクロプローブ検査装置。

的に測定できる。このプローブで試験片表面の並行平滑部全面を走査し、試験片表面における電位差を測定する。本研究では、走査ステップ(運針間隔)を軸方向 0.5 mm, 円周方向 7.5°(約 0.5 mm)とした。

### 3.3 き裂表面長の測定とその分布形の決定

疲労試験を適当な間隔で中断し、試験片表面を耐水ペーパーにより #1500 まで研磨した後、1 μm のアルミナ懸濁液でバフ研磨して、走査型レーザ顕微鏡により試験片表面全面の顕微鏡写真を撮り、き裂の表面長および位置を測定した。き裂表面長は、き裂両端を結ぶ円周方向への投影長とし、その線分の中心をき裂の位置とした。ただし、本研究でのき裂は、表面長 20 μm 以上の表面傷とした。き裂の表面長および位置の確率分布は、有意水準 5 % でコルモゴロフ・スミルノフ検定によって決定した。

### 3.4 有限要素法(FEM)による定常電流解析

汎用 FEM ソフト ANSYS による定常電流解析により、疲労試験片表面上の分布微小き裂の成長を考慮した電位差分布の変化を求め、実験結果と比較した。すなわち、疲労試験片を模擬した直径 8 mm, 長さ 22 mm の円柱モデル表面上の軸方向 10 mm×円周方向 360°(周長 25.1 mm) の領域内のランダムな位置に 20 本のき裂を配置し、き裂は半楕円形のスリットでモデル化した。き裂の幅は 0.01 mm, 表面長  $2a$  の初期値には、一様乱数により 0.1~0.5 mm の値を与えた。き裂深さ  $d$  は、実験で得られたき裂のアスペクト比  $\alpha=d/(2a)$  と表面長の関係から、そのばらつきを考慮して、 $2a$  に対応する正規乱数で与えた。なお、分布微小き裂の成長は、き裂間の干渉なしに、表面、深さ方向ともに Paris 則:  $da/dN=C\Delta K^m$  (ただし、 $\Delta K$ : 応力拡大係数範囲,  $m=4$ ,  $C=4.8\times 10^{-13}$ , 単位: mm, MPa) に従うものとした。

## 4. 研究成果

### 4.1 き裂表面長 $2a$ の分布の繰返し数比 $N/N_f$ による変化

図 2 に、 $2a$  の分布の代表例として、 $\Delta\epsilon_f=0.8\%$  のときの  $2a$  の分布を示す。 $2a$  の分布は、観察したすべての場合に、 $N/N_f$  の値 ( $N$ : 繰返し数,  $N_f$ : 破断繰返し数) に関わらず、ワイブル分布とみなされた。図 2(b), (c) 中の点線は、図 2(a) の  $2a$  から Paris 則を積分して得た  $2a$  の分布である。簡便な計算ではあるが、その結果は実験結果と同様な傾向を示したことから、き裂成長がき裂長に強く依存するため、 $N/N_f$  の増加とともに  $2a$  の値のばらつきが増大したものと推察される。試験片表面のレーザ顕微鏡観察から、短いき裂は成長が遅いが、長いき裂は成長が速く、き裂同士の合体により、成長が Paris 則よりもさらに加速される傾向が見られた。

### 4.2 電位差分布 $V$ の $N/N_f$ による変化

図 3 に、図 2 と同一の  $N/N_f$  の値および同一の試験片に対して得られた正規化電位差  $V/V_0$  の分布を示す。ただし、 $V_0$  は、電位差  $V$  の各測定で得られた測定値の算術平均 (以下、「平均」) である。図 3 に示されているように、 $V/V_0$  は、疲労の全過程を通して正規分布に従っていると

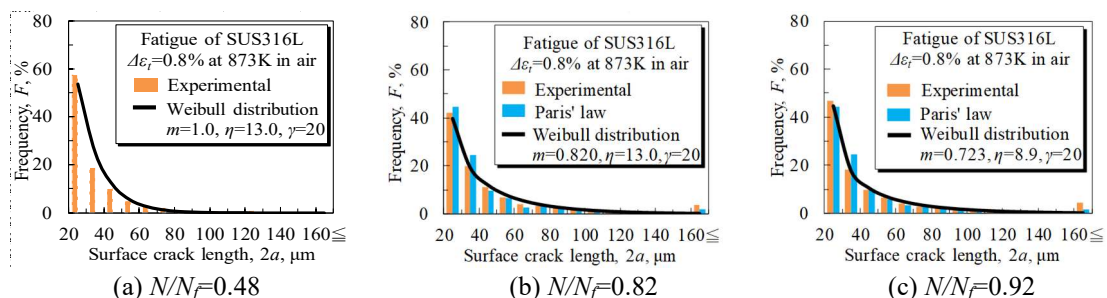


図 2 き裂表面長  $2a$  の分布の繰返し数比  $N/N_f$  による変化 ( $\Delta\epsilon_f=0.8\%$ , 873 K)。

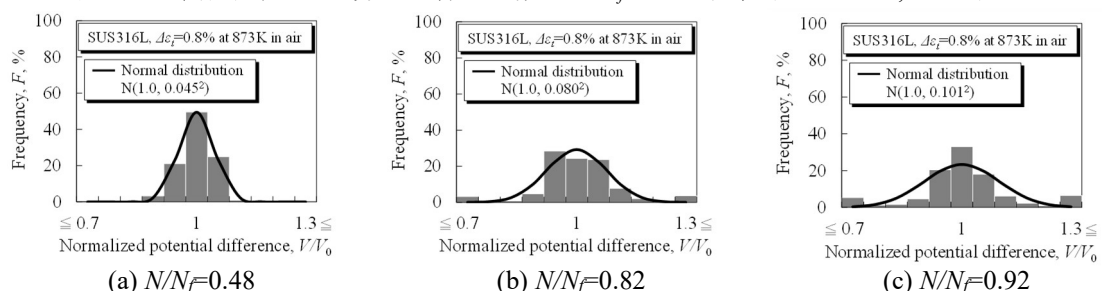


図 3 正規化電位差  $V/V_0$  の分布の繰返し数比  $N/N_f$  による変化 ( $\Delta\epsilon_f=0.8\%$ , 873 K)。

みなされ、 $N/N_f$ の値に対して  $V/V_0$ の平均は、 $(V/V_0)_{ave} \cong 1.0$  =一定となったが、 $V/V_0$ の算術標準偏差または変動係数(以下、「ばらつき」) $\sigma_V$ は  $N/N_f$ の増加とともに増加した。

図4は、本研究で提案する  $\sigma_V-N/N_f$ 線図である。線図の屈曲点により、分布微小き裂が関与する高温疲労の余寿命予測に適用可能と考えられる。図4には、873 K 大気中において、中実丸棒試験片に対して得られた  $\sigma_V-N/N_f$ 線図を示しているが、765 および 923 K 大気中においても同様な線図が得られている。実際、本研究で得られたすべての  $\sigma_V-N/N_f$ データは、狭い分散帯の中のほぼ同一の線図上にプロットされ、 $N/N_f > 0.85$  で屈曲点が現れ、ばらつき  $\sigma_V$ 値が急増する傾向が得られた。これは、 $N/N_f > 0.85$  で分布微小き裂の Paris 則による単独成長に加えて、き裂同士の合体による急速成長によって  $2a$  のばらつきが急激に増大し、それに伴って試験片表面上の局所的な電気抵抗値のばらつきが急増した結果、電位差分布のばらつきが急激に増加したことによるものと推察される。従って、 $\sigma_V-N/N_f$ 線図の屈曲点は、分布微小き裂の中から、き裂同士の合体によって少数の大きなき裂が現れて、試験片の破壊を招く時点を示すものと考えられ、この点を検出することによって高温疲労の余寿命予測が可能になると考えられる。

#### 4.3 有限要素法 (FEM) による定常電流解析結果

Paris 則に従って成長させた分布微小き裂が存在する円柱モデルの FEM による定常電流解析結果を図5(a), (b)に示す。き裂成長前後のいずれの場合でも  $V/V_0$ は正規分布に従い、 $(V/V_0)_{ave} \cong 1.0$  =一定となったが、ばらつき  $\sigma_V$ はき裂の成長後増加して、分布形状は扁平化し、図3の実験結果と傾向的に一致した。従って、分布微小き裂の成長によって  $\sigma_V$ の値は増加し、疲労寿命後期になって、き裂間の合体が頻度高く起これば、他のき裂との合体によって急激に大きく成長したき裂と単独成長のみによって安定成長して小さいままのき裂の大きさの差はますます増大することによって、き裂周囲の電圧のばらつきが顕著に増大したため、高温疲労の余寿命を予測する図4のような屈曲点が現れたものと推察される。

#### 4.4 他の破壊過程への本法の適用可能性の検討(1)：円管(中空丸棒)の高温疲労の余寿命予測

SUS316L 鋼製中空丸棒試験片の高温低サイクル疲労に本研究で開発したマルチ・マイクロプローブ電位差法による新しい劣化・損傷のその場非破壊検出・評価法を適用し、その適用可能性を示すと同時に、破壊機構の相違を明らかにした。主な結論を要約して、以下に示す。

- (1) 中空丸棒試験片では、丸棒の内外両表面が高温環境に暴露されたにも関わらず、中実試験片で観察されたような多数の分布微小き裂の発生はなく、破断間近あるいは破断後に 100~300  $\mu\text{m}$  程度の少数の微小なき裂が観察された。破断間際に大きなき裂が発生し、急速成長することで破壊に至った。
- (2)  $V/V_0$ の分布は、Kolmogorov-Smirnov 検定により、 $N/N_f < 0.99$  では有意水準 5% で正規分布とみなされたが、 $N/N_f = 1.0$  では有意水準 1% でも正規分布とみなせなかった。破断間近の特異的に大きなき裂の発生のため、 $V/V_0 \cong 1.0$  から大きく逸脱した外れ値の頻度が高くなった。
- (3)  $\sigma_V$ は、 $0 \leq N/N_f \leq 0.95$  の範囲でほとんど一定であったが、破断間近に急激に増加し、 $N/N_f \cong 0.95$  で  $\sigma_V-N/N_f$ 線図に屈曲点が現れた。中空丸棒試験片に対しても  $\sigma_V-N/N_f$ 線図の屈曲点を検出することで寿命予測が可能であるが、中実丸棒よりも破断時刻間際の予測となる。

#### 4.5 他の破壊過程への本法の適用可能性の検討(2)：中実丸棒のクリープ余寿命予測

SUS316L 鋼製中実丸棒試験片のクリープ損傷過程に本研究で開発したマルチ・マイクロプローブ電位差法による新しい劣化・損傷のその場非破壊検出・評価法を適用し、その適用可能性を示すと同時に、破壊機構の相違を明らかにした。主な結論を要約して、以下に示す。

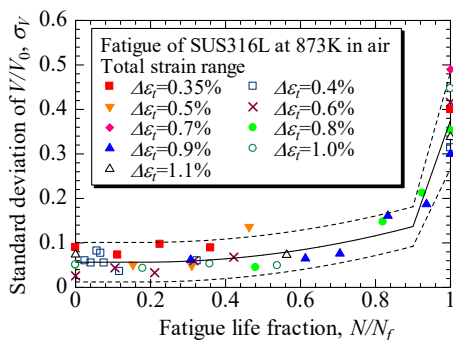
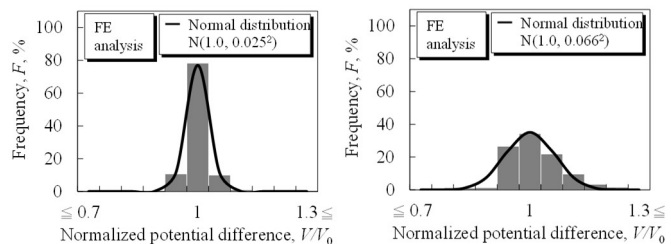


図4 SUS316L 製中実丸棒試験片の 873 K・大気中疲労試験から得られた  $\sigma_V-N/N_f$ 線図



(a) 疲労初期の  $V/V_0$ の分布 (b) 疲労後期の  $V/V_0$ の分布

図5 FEMによる定常電流解析で得られた  $V/V_0$ の分布

- (1) 低温(873 K)のクリープでは、分布微小き裂の発生が少なく、くびれによる断面積の減少によって破壊が生じることが多く、少数派の大きなき裂によるばらつきはあまり大きくならなかった。このため、くびれ部における電位差の減少、すなわち、電位差の平均  $V_0$  の増加が顕著となるため、 $V_0-t/t_r$  線図 ( $t$ : 時間,  $t_r$ : クリープ破断時間) の屈曲点が  $t/t_r \geq 0.9$  で明瞭に現れた。従って、 $\sigma_V-t/t_r$  線図ではなく、 $V_0-t/t_r$  線図により余寿命予測が可能となった。
- (2) 高温(948K)クリープでは、くびれ部を含む試験片全体で分布微小き裂の発生数が多くなり、少数派の大きなき裂も現れるため、寿命後期で電位差の平均  $V_0$ 、ばらつき  $\sigma_V$  のどちらも急激に増加するため、 $V_0-t/t_r$ 、 $\sigma_V-t/t_r$  どちらの線図の屈曲点を使っても余寿命予測は可能であることが示された。

<引用文献>

- [1] 中曽根祐司, 日本保全学会第6回学術講演会要旨集, pp. 325~330 (2009).
- [2] H. Kitagawa, Y. Nakasone and S. Miyashita, ASTM STP 811, pp. 233-263 (1983).
- [3] S. Nakasumi, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10 (2011).
- [4] 燈明泰成, 非破壊検査, Vol. 57, No. 5, pp. 236~239 (2008).
- [5] 東郷敬一郎ほか4名, 日本機械学会論文集(A編), Vol. 74-737, pp. 128~136 (2008).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ① 中西紫緒, 遠藤貴昭, 中曽根祐司, オーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労における分布微小き裂の寸法および密度の測定領域の統計的検討, 日本材料学会第65期学術講演会論文集, 査読無, pp. 267~268 (2016).
- ② S. Nakanishi and Y. Nakasone, Non-Destructive Evaluation of Multiple-Site Small Cracks in High-Temperature Fatigue by Multiple-Microprobe, Abstract Book of FEOFS2016, 査読無 (2016).
- ③ Y. Nakasone and H. Matsushita, Polycrystal Elasto-Viscoplastic and Damage Analysis of Creep Behavior in a Modified 9Cr-1 of Mo Steel Weld, Abstract Book of FEOFS2016, 査読無 (2016).
- ④ 中曽根祐司, 松下日出彦, 改良9Cr-1Mo鋼溶接板のクリープ挙動に関する損傷力学・多結晶弾粘塑性力学連成解析, 日本機械学会第29回計算力学講演会 CD-ROM 論文集(2016), 査読無, pp. 211-1~3.
- ⑤ 中西紫緒, 中曽根祐司, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労余寿命予測: 分布微小き裂の成長が電位差に及ぼす影響, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス講演論文集, No.16-3, 査読無, pp. 258~260 (2016).
- ⑥ 中西紫緒, 前田拓己, 中曽根祐司, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労余寿命予測: 有限要素法解析による探針間隔および運針間隔が与える影響の検討, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス講演論文集, No.16-3, 査読無, pp. 261~263 (2016).
- ⑦ S. Nakanishi and Y. Nakasone, Residual Life Prediction of High-temperature Fatigue of Austenitic Stainless Steel SUS 316L Involving Multiple-site Small Cracks by Using Multi-microprobe DC Potential Difference Method, International Journal of Engineering Research and Science & Technology, 査読有, pp. 45-56 (2017). ISSN: 2319-5911
- ⑧ S. Nakanishi and Y. Nakasone, Non-Destructive Evaluation of Multiple-Site Small Cracks in High-Temperature Fatigue by Multiple-Micro Probe, Abstract Book of FEOFS2016, e-book, 査読有 (2017).
- ⑨ S. Nakanishi and Y. Nakasone, New DC Potential Difference Method Applied to Residual Life Prediction of High-temperature Fatigue of Austenitic Stainless Steel SUS316L Involving Multiple-site Small Cracks, International Journal of Engineering Research and Science & Technology, 査読有, pp. 1-14 (2018). ISSN: 2319-5911
- ⑩ 中曽根祐司, 中西紫緒, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L のクリープ寿命予測に及ぼす環境温度の影響, 第27回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 査読有, OS7-1-1~4 (2018).
- ⑪ 中曽根祐司, 金本光平, 高温疲労破壊過程における複数き裂周りの電位差分布の変化の FEM 解析, 第27回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 査読有, OS7-2-1~4 (2018).

[学会発表] (計10件)

- ① 中西紫緒, 遠藤貴昭, 中曽根祐司, オーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労における分布微小き裂の寸法および密度の測定領域の統計的検討, 日本材料学会第65期通常総会・学術講演会 (2016/5/29).

- ② S. Nakanishi and Y. Nakasone, Non-Destructive Evaluation of Multiple-Site Small Cracks in High-Temperature Fatigue by Multiple-Microprobe, FEOFS2016 (2016/8/30).
- ③ Y. Nakasone and H. Matsushita, Polycrystal Elasto-Viscoplastic and Damage Analysis of Creep Behavior in a Modified 9Cr-1Mo Steel Weld, FEOFS2016 (2016/8/30).
- ④ 中曽根祐司, 松下日出彦, 改良 9Cr1Mo 鋼溶接板のクリープ挙動に関する損傷力学・多結晶弾粘塑性力学連成解析, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会 (2016/9/22).
- ⑤ 中西紫緒, 中曽根祐司, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労余寿命予測: 分布微小き裂の成長が電位差に及ぼす影響, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス (2016/10/8).
- ⑥ 中西紫緒, 前田拓己, 中曽根祐司, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼の高温疲労余寿命予測: 有限要素法解析による探針間隔および運針間隔が与える影響の検討, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス (2016/10/8).
- ⑦ 中西紫緒, 中曽根祐司, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L のクリープ余寿命予測, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス (2017/10/8).
- ⑧ 中曽根祐司, 山口遼, 微小分布き裂の極値統計解析による SUS316L 鋼のクリープ寿命推定, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス (2018/12/22).
- ⑨ 中曽根祐司, 中西紫緒, マルチ・マイクロプローブ直流電位差法によるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L のクリープ寿命予測に及ぼす環境温度の影響, 第 27 回 MAGDA コンファレンス, 日本 AEM 学会 (2018/10/20).
- ⑩ 中曽根祐司, 金本光平, 高温疲労破壊過程における複数き裂周りの電位差分布の変化の FEM 解析, 第 27 回 MAGDA コンファレンス, 日本 AEM 学会 (2018/10/21).

[図書] (計 10 件)

- ① 中曽根祐司, 金属の疲労破壊のメカニズムと破面解析, 『金属疲労・破面解析』 セミナーテキスト, 135 pp. (2016), R&D 支援センター.
- ② 中曽根祐司, 金属材料の破面解析とその評価法, 70 pp. (2016), 株式会社 情報機構.
- ③ 中曽根祐司, 金属の疲労破壊のメカニズムと寿命評価・耐疲労設計および FEM による疲労解析, 114 pp. (2016), 株式会社日本テクノセンター.
- ④ 中曽根祐司, 金属疲労のメカニズムと FEM による疲労解析および寿命評価・耐疲労設計への応用, 79 pp. (2017), 株式会社 日本テクノセンター.
- ⑤ 中曽根祐司, 金属材料の破面解析とその評価法～破壊の基礎から破面の見方・考え方および破面解析事例まで～, 79 pp. (2017), 株式会社 情報機構.
- ⑥ 中曽根祐司, 金属の疲労破壊のメカニズムと破面解析－機械・構造物・電子部品の安全安心な設計・使用法を目指して－, 89 pp. (2017), R&D 支援センター.
- ⑦ T. A. Stolarski, Y. Nakasone and S. Yoshimoto, Engineering Analysis with ANSYS Software, 2nd ed., 562 pp. (2018), Elsevier Butterworth-Heinemann.
- ⑧ 中曽根祐司, 金属の疲労破壊のメカニズムと寿命予測, 破面解析, 101 pp. (2018), 株式会社 技術情報協会.
- ⑨ 中曽根祐司, 金属材料の破面解析とその評価法, 78 pp. (2018), 株式会社 情報機構.
- ⑩ 中曽根祐司, 金属疲労の基礎と FEM 解析・寿命評価および耐疲労設計への応用, 116 pp. (2019), 株式会社 日本テクノセンター.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/~nakaslab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中曽根祐司 (NAKASONE YUJI)  
東京理科大学・工学部第一部・教授  
研究者番号: 10266918

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし