

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19083

研究課題名（和文）粒子法と微視強度解析技術が切り拓くき裂発生ダイナミクスのフロンティア

研究課題名（英文）Frontier of crack initiation dynamics opened up by particle method and microscopic strength analysis technology

研究代表者

野上 修平（Nogami, Shuhei）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00431528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、微視強度計測技術と粒子法を融合させることにより、き裂発生の予測とそのモデル化を目的とした。微視強度解析技術によるき裂発生挙動評価については、マイクロメートルレベルの試験片により、き裂発生などの機械特性評価が可能な技術として確立した。粒子法によるき裂発生シミュレーションについては、入力パラメータを調整し、き裂発生のシミュレーションを可能とした。いずれも、方法論は確立され、基盤技術は構築できた。しかし、実際に即した現象を評価する手法として構築することが研究期間内で達成できなかった。いずれも、基盤技術は構築できたため、当初の研究目標の達成のため、引き続き研究を推進する計画である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実用部材などの複雑系において、空間的（場所）にも、時間的（時間、繰返し数）にも、き裂発生そのものを的確に予測できない原因は、き裂発生の瞬間を定量的に説明しうる学術が構築されていないことにある。本研究では、微視強度計測技術による実験的アプローチと、き裂発生シミュレーションに適した粒子法を融合させることにより、機器材料のき裂発生の予測とそのモデル化を目的とした。本研究を端緒とし、長期的には、き裂発生を要因とした技術的課題を学術的な視点から抜本的に解決する学術体系「き裂発生ダイナミクス」の確立に挑戦する。これにより、様々な分野におけるき裂発生を要因としたあらゆる課題の解決に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to predict crack initiation and to model it by combining microscopic strength analysis technology and particle method. As for the crack initiation behavior evaluation by microscopic strength analysis technology, it was established as a technology capable of evaluating mechanical properties such as crack initiation by using micrometer-size test specimens. As for the crack initiation simulation by the particle method, the input parameters were adjusted to enable the simulation of crack initiation. In each case, the methodology and the basic technology were established. However, it was not possible to establish within this research period as a method for evaluating a real phenomenon that actually fits. In each case, the basic technology has been established, therefore we plan to continue research to achieve the original research goals.

研究分野：構造材料

キーワード：粒子法 微視強度解析 き裂発生 シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、機器に発生するき裂に対しては、①検査によりき裂を検知し、当該き裂の許容可否を既存のき裂進展速度データなどに基づき判断し、必要に応じて補修や交換をする保全手段が取られる場合がある。また、②事前にデータベース化されたき裂寸法と時間や負荷繰返し数の関係から、そのデータの外挿により、き裂発生時間や寿命を予測する保全手段が取られる場合もある。

しかし、き裂発生自身が許容できない機器では、①は適用できない。また、②による予測結果は比較的ばらつきが大きいので、機器設計において大きな安全マージンを取らざるを得ず、合理的な設計の妨げになり得る。さらに、き裂発生が許容できる機器においても、初期き裂寸法が大きい場合は許容不可能な場合もあるため、いずれにせよ、精度の高いき裂発生予測が必要である。

このように、実用部材などの複雑系において、空間的(場所)にも、時間的(時間、繰返し数)にも、き裂発生そのものを的確に予測できない原因は、き裂発生の瞬間を定量的に説明する学術が構築されていないことにある。き裂発生サイトの種類(例えば結晶粒界など)や結合強度、発生サイトに作用する応力場や温度場など、様々な因子が総合的に影響してき裂が発生することが想定されるが、要素毎の影響評価はなされているものの、上記の課題解決には至っていない。また、破壊力学に代表される従来の学術やそれらを支持する有限要素解析などは、既に存在するき裂の管理に結びつく理論が主であり、既存の保全体系も、それらに基づく場合が多い。

2. 研究の目的

これらの状況を踏まえ、本研究では、微視強度計測技術による実験的アプローチと、き裂発生シミュレーションに適した粒子法を融合させることにより、機器材料のき裂発生の予測とそのモデル化を目的とした。本研究を端緒とし、長期的には、き裂発生を要因とした技術的課題を学術的な視点から抜本的に解決する学術体系「き裂発生ダイナミクス」の確立に挑戦する。これにより、様々な分野におけるき裂発生を要因としたあらゆる課題の解決に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 微視強度計測技術による機械特性評価

微視強度解析技術によるき裂発生試験として、収束イオンビーム装置(FIB)により超小型試験片を製作し、同装置内において引張試験を実施した。図1に、その製作方法の概要を示す。試験片の採取位置は、FIBの走査イオン顕微鏡像(SIM像)により決定した。SIM像における種々の境界と、実際の材料における種々の境界との対応は、電子後方散乱回折像(EBSD像)により事前に確認した。

本研究で用いた供試材は、一般工業材料として、また発電機器材料などとしても用いられる、オーステナイトステンレス鋼と焼戻しマルテンサイト鋼である。これらの材料から、平行部寸法が $L4 \sim 10 \mu\text{m} \times W1 \mu\text{m} \times T1 \mu\text{m}$ の引張試験片をFIB装置を用いて製作した。一部の試験片については、強制的にき裂を当該部から発生させるため、平行部にノッチを加工した。マイクロ梁とFIB装置に付属のマイクロプローブを用いてマイクロ引張試験をFIB内で室温において実施した。マイクロプローブの移動に伴ってマイクロ梁に固定された試験片が変形するとともに、試験片に荷重

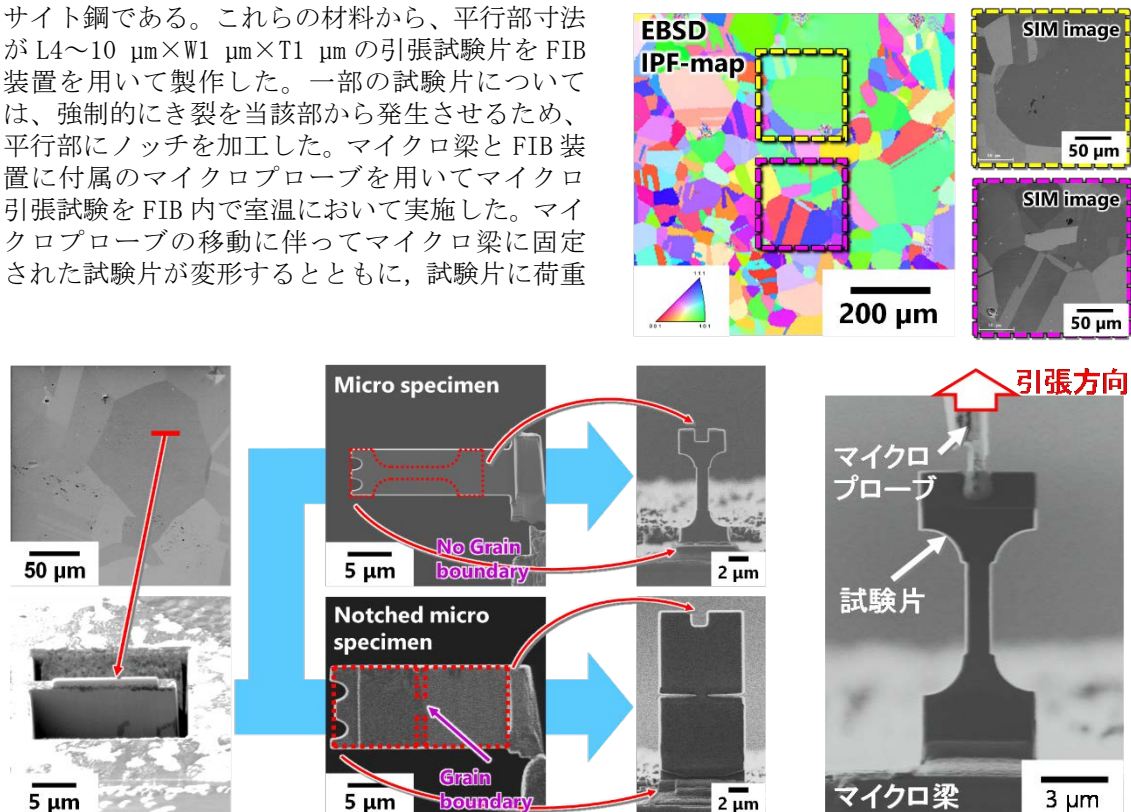


図1. FIB装置を用いた超小型引張試験片の製作および引張試験の方法の概要

が負荷される。マイクロプローブにはロードセルが取り付けられていないため、試験片に負荷されている荷重はマイクロ梁のたわみ量から算出した。試験片の伸びと試験片に負荷される荷重を1秒毎に取得したSIM像を用いて評価した。

(2) 粒子法によるき裂発生シミュレーション

本研究では、粒子法によるき裂発生シミュレーションとして、個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) を適用した。図2のように、DEM法は、連続体を有限個の粒子によって表すとともに、各要素間の相互作用力をばねとダッシュポッド、スライダで表現し、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する。相互作用としては、並進運動の相互作用と回転運動の相互作用の2種類を考える。通常連続体力学における変形挙動の解析手法と異なり、粒子法では材料内の応力とひずみの関係を弾塑性構成則で求めておらず、粒子間の相互作用力と変位から求めている。よって、前述の目的のためには、相互作用力の表現に用いる各パラメータ (ばね定数等) を最適化する必要がある。

粒子法モデルと連続体の変形挙動の等価性は明らかでない。そこで本研究では、変形挙動に関するパラメータを調整することで、解析結果が連続体と等価性を持つようにし、き裂発生シミュレーションの際にパラメータを適用するため、最も簡単な解析である弾性解析から実施した。

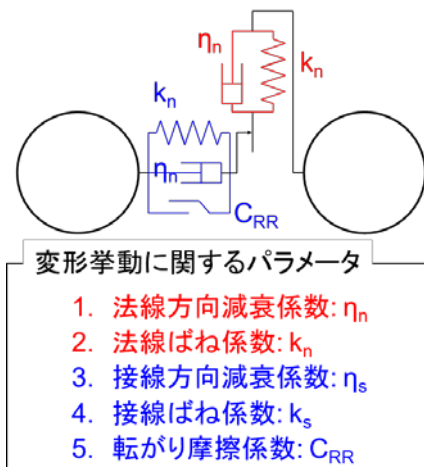


図2. DEM法による計算の概要

4. 研究成果

(1) 微視強度計測技術による機械特性評価

図3に、(上段) オーステナイトステンレス鋼と (下段) 焼戻しマルテンサイト鋼の超小型引張試験の様子と結果 (応力-ひずみ曲線) の一例を示す。応力-ひずみ曲線として、ミリメートルオーダーの標準サイズの試験片による結果も赤点線で示した。その結果、超小型試験片で測定された強度は、標準サイズ試験片と同等であり、同試験片の強度評価に対する有効性が、一般性の高い材料2種類で材料によらず示された。一方、超小型試験片で測定された破断時の伸びは標準サイズ試験片に比べ約3割小さく、同試験片では加工硬化が見られなかった。

単結晶の引張試験ではせん断すべりによって試験片の変形が開始するため、微細組織が焼戻しマルテンサイト鋼に比べ単純で、本研究の超小型引張試験片の試験部が単結晶相当になるオーステナイトステンレス鋼については、降伏応力ではなく、臨界分解せん断応力を用いた評価が必要である。オーステナイトステンレス鋼の超小型引張試験により得られた臨界分解せん断応

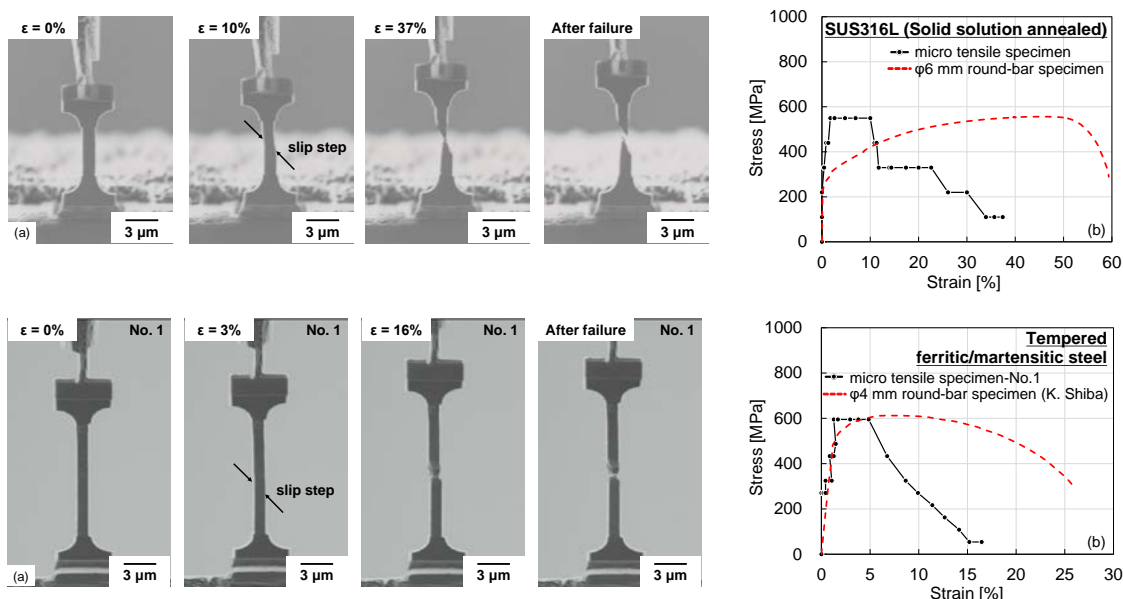


図3. (上段) オーステナイトステンレス鋼と (下段) 焼戻しマルテンサイト鋼の超小型引張試験の様子と結果 (応力-ひずみ曲線) の一例

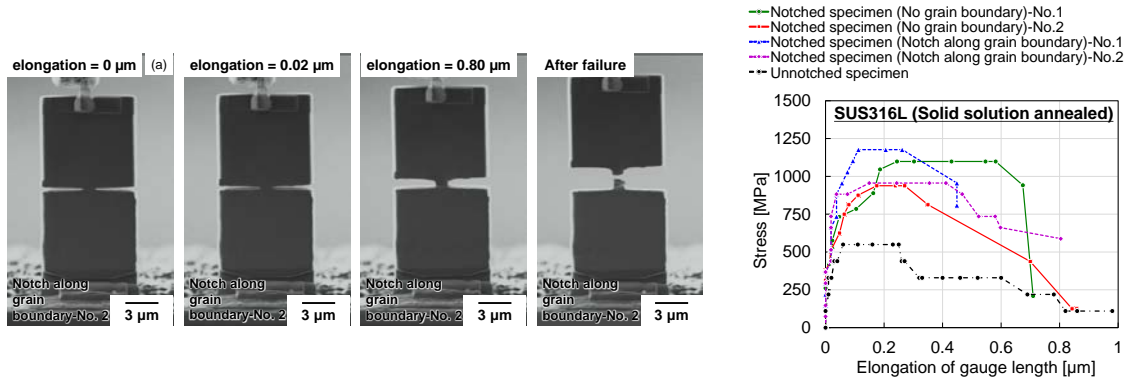


図 4. オーステナイトステンレス鋼のノッチ付き試験片を用いた超小型引張試験の様子と結果（応力-ひずみ曲線）の一例

かと、既往研究において報告されているミリメートルオーダーの単結晶引張試験の臨界分解せん断応力を比較した結果、試験片寸法の減少に伴い臨界分解せん断応力が増加することが明らかとなった。同様の評価を焼戻しマルテンサイト鋼で実施した結果、超小型引張試験により得られた強度と、標準サイズ試験片により得られた強度はほぼ同じであった。これらの結果から、超小型引張試験では、試験片の寸法が小さくなることで試験片に含まれる転位源や可動転位の数が少なくなり、高い強度が得られることが示唆された。

図 4 に、オーステナイトステンレス鋼のノッチ付き試験片を用いた超小型引張試験の様子と結果（応力-ひずみ曲線）の一例を示す。試験片としては、ノッチを入れた部位に粒界を配置した試験片と、粒内マトリックスを配置した試験片の両方を試験した。まず、ノッチ付き試験片は、概してノッチなし試験片に比べ、塑性拘束や切り欠き効果などにより強度が高く現れた。また、ノッチ付き試験片において、最狭部における粒界の有無による強度および伸びの違いは認められなかった。考察の結果、粒界強度を測定するためには、隣接粒のシュミット因子が最小となる粒界を用いて試験を実施するなど、更なる工夫が必要であると考えられる。

以上より、微視強度解析技術については、基本的な技術の確立と、その適用限界については見いだせたものの、粒子法の入力データとして適当な定量性あるデータを得るまでには、本研究の範囲内では至らなかった。

(2) 粒子法によるき裂発生シミュレーション

DEM 法に関する主なパラメータとしては、法線方向減衰係数、法線ばね係数、接線方向減衰係数、接線ばね係数、転がり摩擦係数がある。これら減衰係数、ばね定数および摩擦抵抗の値を変化させて、4 点曲げ試験を模擬した解析をし、曲げ応力の解析結果を理論値と比較することで、

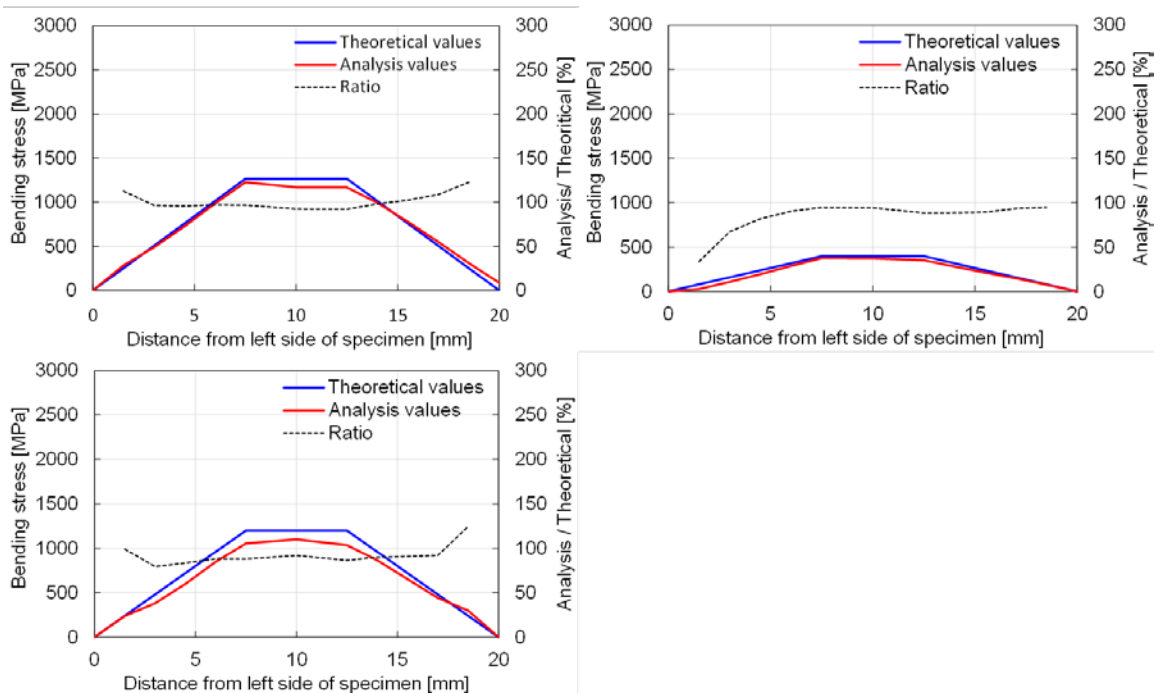


図 5. DEM 法による曲げ応力の分布と理論値との比較

解析値の評価を行った。また、断面形状を変化させ、解析結果に及ぼす断面形状依存性の評価を行った。図5に、曲げ試験片の最大引張応力が生じる面の試験片長手方向の応力分布を示す。断面形状に関わらず、適切なパラメータを設定することで、曲げ応力の解析値と理論値は良く一致した。材料の変形挙動に関するパラメータを弾性解析の結果から得ることができた。

次に、前述の基礎検討の結果を基に、粒子の質量、慣性モーメント、半径、結合パラメータとしての減衰係数、ばね係数、転がり摩擦係数、影響半径などその組み合わせを調整し、き裂発生シミュレーションのための計算を実施した。図6に、DEM法によるき裂発生シミュレーションの結果の一例を示す。また、図7には、異なるき裂進展抵抗性を持つ境界を含んだモデルに対するDEM法によるき裂発生シミュレーションの結果の一例を示す。これらのシミュレーションでは、実験によるき裂発生を模した挙動を精度良く表現できているが、一方で、前述のパラメータの絶対値やその組み合わせが、実在の材料の物性値とは離れた条件であった。一方で、実在の材料の物性値に近い条件の入力パラメータの組み合わせによるシミュレーションでは、計算が収束せず発散してしまい、当該部でのき裂発生を模したシミュレーションには至らなかった。

(3) まとめと今後の課題

以上のように、微視強度計測技術においては実際に即した応力-ひずみ関係などの材料特性を得ることが、粒子法においては実際に即した現象を模擬する計算手法を構築することが、研究期間内ではできず、本研究の当初計画を達成することができなかった。いずれも、基盤となる技術は構築できたと考えられるため、当初の研究目標の達成のため、引き続き研究を推進する計画である。

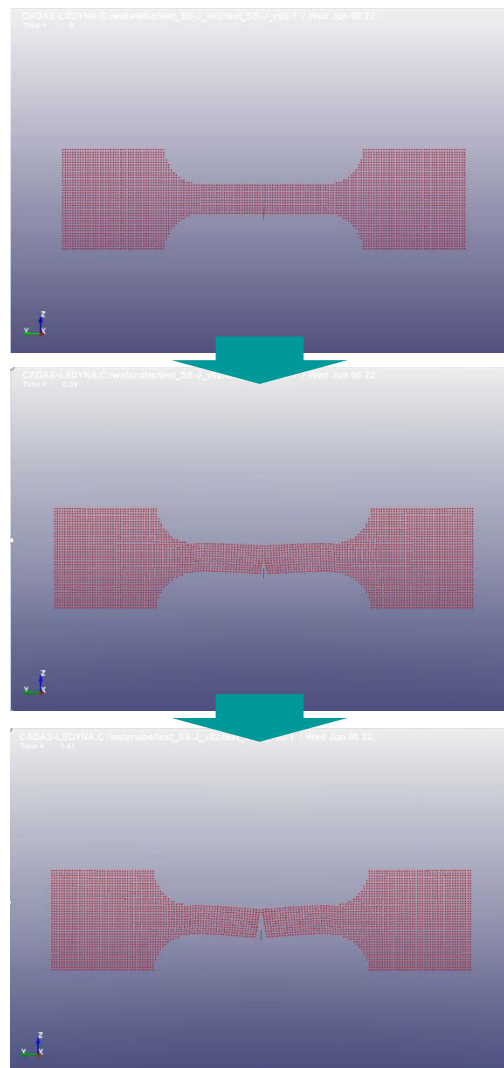


図6. DEM法によるき裂発生シミュレーションの結果の一例

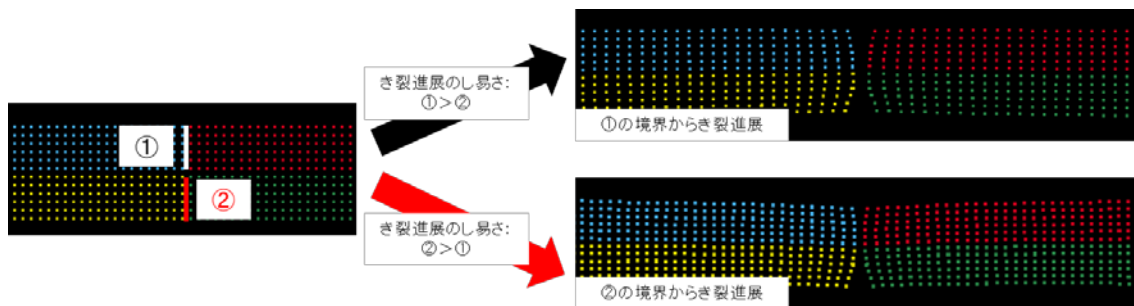


図7. 異なるき裂進展抵抗性を持つ境界を含んだモデルに対するDEM法によるき裂発生シミュレーションの結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊捷太郎, 野上修平, 安堂正巳, 長谷川晃
2. 発表標題 マイクロ引張試験片を用いた鉄鋼材料の機械特性評価
3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊捷太郎, 野上修平, 安堂正巳, 長谷川晃
2. 発表標題 超微小試験片技術を用いた鉄鋼材料の機械特性評価
3. 学会等名 材料照射研究会「Irradiation 3.0に向けて」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	芹澤 久 (Serizawa Hisashi) (20294134)	大阪大学・接合科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	安堂 正己 (Ando Masami) (30370349)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉材料研究開発部・主幹研究員(定常) (82502)	