

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01354

研究課題名（和文）革新的構造/材料アレスト設計を可能とする破壊力学モデル開発

研究課題名（英文）Development of fracture mechanics model for innovative structural-material crack arrest design

研究代表者

栗飯原 周二（AIHARA, SHUJI）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・名誉教授

研究者番号：10373599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,990,000 円

研究成果の概要（和文）：海上物流量の増大に伴い、1万個を超えるコンテナを輸送する大型船舶が建造されるようになったが、船体の安全性を確保するための脆性き裂伝播を抑制する技術が未完成である。本研究はこれを解決するもので、1000m/sを超える速度で高速伝播する脆性き裂の挙動を実験と数値シミュレーションによって解明することを試みた。従来の破壊力学では説明ができなかった1m以上の長大き裂におけるき裂伝播/停止挙動を説明することが可能となった。さらに、船体用鋼材のアレスト特性を向上させるためには脆性き裂伝播のミクロ挙動を解明することが重要であり、結晶粒レベルのき裂伝播解析を行い、アレスト挙動とミクロ組織の関係を明確化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の世界的な経済規模拡大に伴い、海上物流量が飛躍的に増大し、1万個を超えるコンテナを輸送できる超大型コンテナ船が建造されるようになった。これら船舶においては脆性破壊を防止することが極めて重要であるが、高速で伝播する脆性き裂の挙動には未解明な点が多く、大型コンテナ船の脆性き裂アレスト設計やアレスト性能に優れた船体用鋼材の開発を合理的に行うことが困難であった。本研究成果はこれらの要求に直接的に適用できるものであり、本研究者らはアレスト靱性の評価試験方法のISO規格策定や船体アレスト設計の策定にも関与してきた。本研究はこれらの社会貢献に直接的に役立つものである。

研究成果の概要（英文）：Recent steep increase in marine transportation has necessitated large scale ship structure which can carry more than 10,000 containers. Prevention of brittle crack propagation in these structure is very important, but basic mechanisms of the brittle crack propagation and arrest behaviors were not clarified. In the present study, experiment and numerical simulations for fast propagating crack were conducted. As a result, it has been made possible to describe crack propagation and arrest behaviors of a long crack, more than 1 meter. Furthermore, steel grain-size level analyses were carried out. As a result, microstructure effect on crack propagation was quantitatively clarified.

研究分野：破壊力学、鉄鋼材料学

キーワード：破壊力学 脆性破壊 信頼性設計 有限要素法 き裂伝播 鉄鋼材料 微視力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、市場の国際化に伴い海上物流量は増加の一途をたどり、コンテナ船の大型化が急速に進行している。これらの船体構造では、これまで経験のない 100mm の極厚鋼板が使用されるが、鋼板の板厚増加は脆性破壊による大規模損傷の可能性が危惧されている。特に、脆性破壊による大規模損傷を未然に防ぐためには、万が一破壊が発生しても、その後の亀裂の「伝播」を制御し、大規模損傷に至る前に安全に「停止」させる二段階の安全設計を行うことが極めて重要となる。

このような社会的背景を受けて、最近、日本海事協会と日本溶接協会は、これまで議論が不十分であった船体構造用鋼板の脆性亀裂を停止させる性能（アレスト靱性）に関して、(1)設計要件の明確化、および、(2)評価試験方法の確立、のための研究委員会を段階的に発足させ、申請者はそれらの副委員長および委員長を担った。本委員会では実験と有限要素解析により荷重や試験片寸法などによる影響を系統的に調査し、世界初の「必要アレスト靱性に関する設計指針」と「アレスト靱性の汎用的な試験評価方法の基盤」を確立した。一方で、上記の成果はあくまで限られた実験にのみ基づいたものであり、アレスト靱性の本質の意味を含め、脆性破壊の「伝播・停止」は力学現象として多くの点で理論的に未解明であった。

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では脆性破壊の伝播・停止現象を対象として、マイクロスケールおよびミクロスケールの両面からそのメカニズムを解明し、鋼板の合理的なアレスト設計基準の構築に資するための理論的基盤を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 有限要素法による系統的な解析により、高速伝播する亀裂の局所応力に与える諸因子の影響を検証する。さらにその結果に基づき局所限界破壊応力評価を基礎とした高精度亀裂・伝播・停止モデルの開発を行い、大型試験結果との比較によりその妥当性を検証する。
- (2) 拡張有限要素法を用いた結晶粒スケール劈開亀裂伝播モデルの開発を行う。さらに、局所限界破壊応力理論に基づく小型試験結果の解析および開発モデルによるエネルギー散逸の評価により、材料を特徴づける最も基本的な因子である結晶粒径が劈開亀裂伝播抵抗に与える影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 鋼材の脆性亀裂伝播停止挙動の解明に向けた基礎的検討として、局所応力評価手法を用いた有限要素解析を活用したパラメトリックスタディを行うことで、鋼材における高速伝播亀裂先端近傍応力場を記述するパラメータを検討した。本検討は Fig. 1 に示すような二次元平面ひずみ要素を用いた Generation 型有限要素解析によって実施した。

系統的な解析検証の結果、以下に挙げる知見が得られた。

- 従来、脆性亀裂伝播現象を考える際に、小規模降伏条件が成立し、応力拡大係数による整理が可能であると考えられていたが、応力拡大係数が等しくても、負荷応力と亀裂長さの組み合わせにより局所応力は異なる。
- 亀裂伝播速度は局所応力を決定する因子の一つであるが、線形弾性体に置けるような、低速ほど局所応力が上昇するという傾向はみられず、塑性域の発達の程度により最大応力速度は決定される。これは、アレスト試験

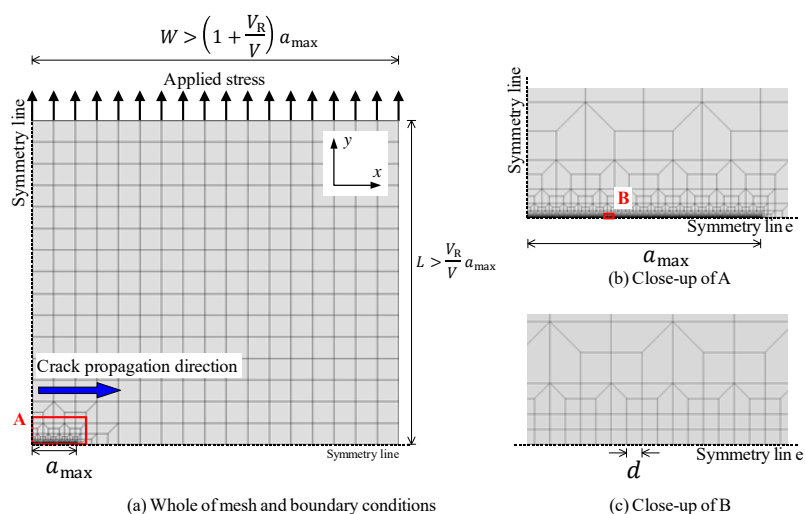


Fig.1 Finite element model for crack propagation analyses

で見られる，亀裂停止時の不連続な速度変化に対応するものであると考えられる．また，局所応力は温度依存性を有する．

- 線形弾性体においては，非定常効果が局所応力に寄与していることが確認できたが，一方でひずみ速度依存性弾塑性体においては塑性ひずみ速度による寄与が大きいことから，局所応力に非定常効果依存性はほとんど見られなかった．

以上の解析から，局所応力は亀裂長さ，負荷応力，伝播速度，温度の関数として記述できることが明らかになった．

上記の系統的な二次元有限要素解析による局所応力決定因子の検討に加え，(a)シアリップ厚さの実験的計測およびその推定式，および，(b)3次元弾塑性有限要素解析による未破断シアリップの閉口応力評価式の構築を行い，それらを統合することで局所破壊応力理論を用いた脆性亀裂伝播・停止挙動評価モデルの開発を行った．本モデルは次に示す2つの式よりなる連立方程式を解くことで計算を行う．なお，未知パラメータは伝播速度 V ，シアリップ厚さ t_{sl} であり，解が存在しなくなった時点で亀裂がアレストしたとみなされる．

$$\sigma_F = f(V, T, \sigma_{app}, a_{eff}) \quad (1)$$

$$t_{sl} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_{app} \sqrt{\pi a} - K_{cl}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2)$$

ここで， $f(V, T, \sigma_{app}, a)$ は，速度 V ，温度 T ，負荷応力 σ_{app} ，有効亀裂長さ a_{eff} のときの局所応力， t_{sl} は未破断シアリップ厚さ， K_{cl} は未破断シアリップによる閉口応力， σ_{YS} は亀裂先端近傍の降伏応力である．このとき，有効亀裂長さは閉口効果を考慮した応力拡大係数を実現する亀裂長さである． $f(V, T, \sigma_{app}, a)$ は解析的には求めることができないため，二次元平面ひずみ有限要素解析に基づいて応答局面を事前に作成している．なお，従来のモデルでは応力拡大係数を局所応力決定因子としているが，著者らが先に実施した解析から，亀裂先端の塑性域が十分発達した場合，負荷応力と亀裂長さを別々のパラメータとして考慮するべきことが分かっている．

本モデルを用いて，実鋼板の温度勾配型アレスト試験から求められたアレニウスプロットの再現を試みた計算結果の一例をFig. 3に示す．この時用いた局所破壊応力は2,030MPaであり，実験的に取得した値(2,070MPa)に良好な一致を示した．この結果より，モデル計算結果と実験結果はよい一致を示している．特に，破線で示した近似曲線同士は非常によく一致しており，モデル計算の妥当性を示している．また，用いた局所破壊応力は実験的に取得した値の標準偏差(100MPa)の範疇に収まっていることから，実験的に取得した値の妥当性が確認された．

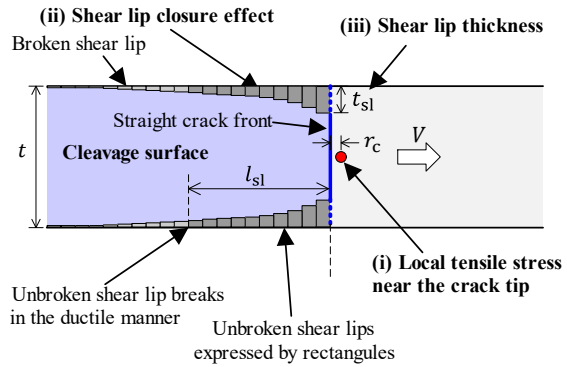


Fig. 2 Concept of a model for simulating brittle crack propagation/arrest

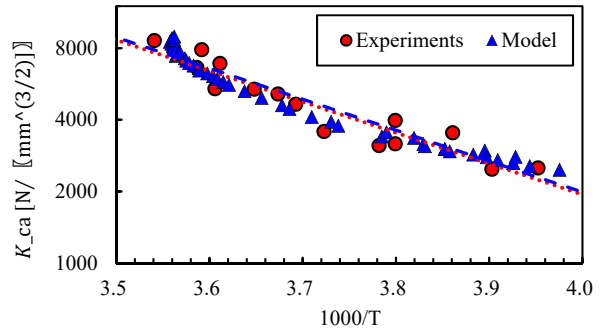


Fig. 3 Experimental and model predicted results of relationship between temperature and brittle crack arrest toughness K_{ca}

(2) 結晶粒径は微視組織を記述する最も基本的な特徴量であるが，これと劈開亀裂伝播抵抗との関係に関して必ずしも系統的な実験による定量的な整理は行われていない．ここでは，化学組成が同一とみなせ，結晶粒径のみが異なる3種類の鋼S1, S2, S3を用いて複数の温度におけるDCB試験による劈開亀裂伝播抵抗の評価を行った．各鋼の微視組織に関する工学顕微鏡写真をFig. 4に示し，DCB試験の模式図をFig. 5に示す．局所限界破壊応力を試験結果として得られた破壊発生時の切り欠き部開口変位と亀裂停止位置を考慮した有限要素解析によって評価し

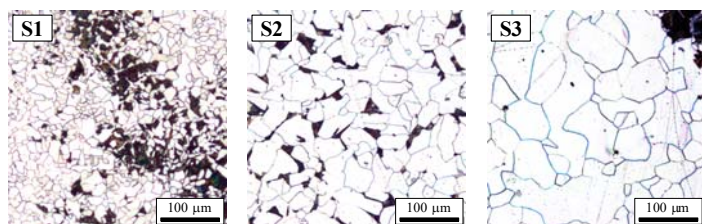


Fig. 4 Optical microphotograph of steels

た. 得られた局所限界破壊応力を Fig. 6 に示す. 結晶粒径の大きい鋼ほど劈開亀裂伝播抵抗が大きいということが実験的に示された.

劈開亀裂伝播による破面は「劈開面」と「ティアリッジ」によって構成されるが, 破面形成に伴うエネルギー吸収は, 大規模な塑性変形を伴うティアリッジの形成が支配因子であると考えられる. 本研究では, このティアリッジ形成に必要なエネルギーを定量化するために, 粗大結晶粒を有する単相材を使用した微小試験を提案した. 具体的には, マイクロスケールの微小な試験片を作成し, 隣接する 2 個の結晶粒内に粒界へ到達する鋭いスリット状の切欠きを FIB で加工することで劈開面を模擬し, 引張試験を実施するものである. 試験片の模式図および試験の一例を Fig. 7(a) および (b) に示す. 加工した切欠き間の距離を変化させることで, ティアリッジ形成に及ぼす劈開破面間距離の影響を定量化した. Fig. 7(c) に荷重-変位曲線より得られたティアリッジ形成エネルギーの結果を示す. この結果より, ティアリッジ形成に伴うエネルギー吸収量は劈開面間距離の 2 乗に比例するという実験式を得た.

拡張有限要素法を基礎とした新たな劈開亀裂伝播モデルの開発を行なった. このモ

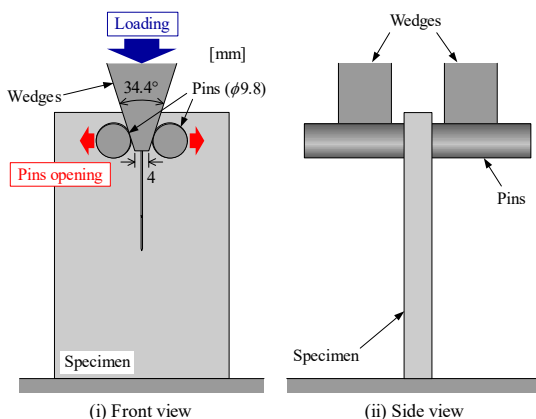


Fig. 5 DCB test specimen

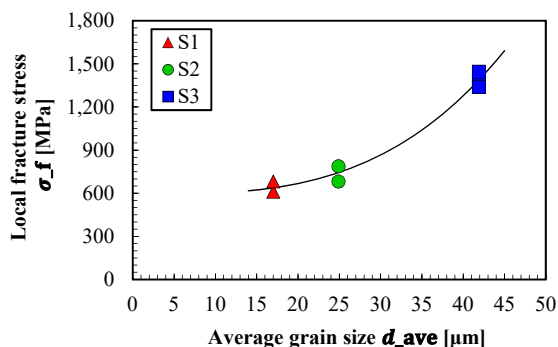


Fig. 6 Dependence of local fracture stress on grain size

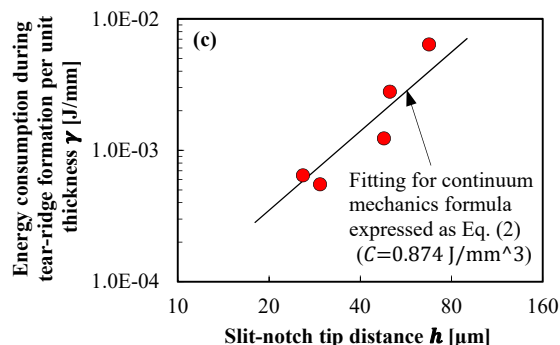
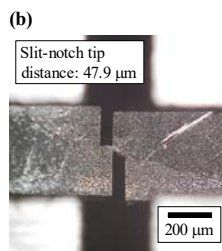
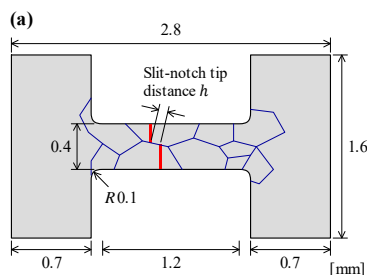


Fig. 7 Small-scale tensile experiments simulating the tear-ridge formation: (a) configuration of specimen, (b) specimen deformation and fracture during the experiment, (c) energy consumption during tear-ridge formation against slit-notch tip distance

デルでは, 有限要素を亀裂および結晶粒と独立に定義することで, 極めて複雑な劈開亀裂伝播に伴う破面形成を高精度かつ容易に再現することを可能とした. さらに, Fig. 8 に示すような形成した劈開面間を補間するティアリッジ形成のモデル化を構築し, 前節で定量化したティアリッジの形成に伴うエネルギー吸収量の実験式を用いて, 単位面積あたりの破面形成エネルギー (有効表面エネルギー) の評価アルゴリズムを構築した.

第 2 節で用いた S1, S2, S3 の結晶粒径分布を入力として, 各鋼種の破面形成エネルギーの評価を行った. 得られた結果を Fig. 9 に示す. この結果より, 第 2 節の実験結果と同様, 結晶粒径の大きい鋼ほど破面形成エネルギー, すなわち劈開亀裂伝播抵抗が大きいという結果が得られた. 本成果は, 劈開亀裂伝播に対する材料開発の基礎として重要な知見を与えるものであり, 材料設計に寄与することが期待される.

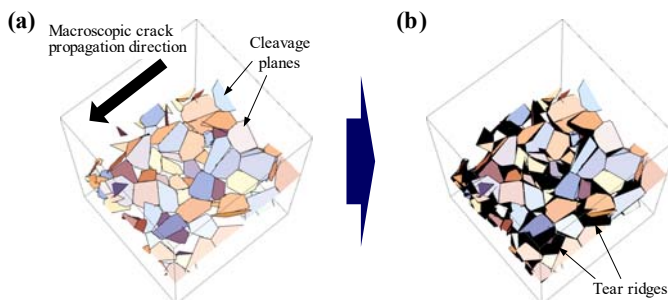


Fig. 8 Tear ridge area in the microscopic cleavage crack propagation model based on XFEM [43]: (a) Cleavage planes and (b) cleavage planes and tear-ridges

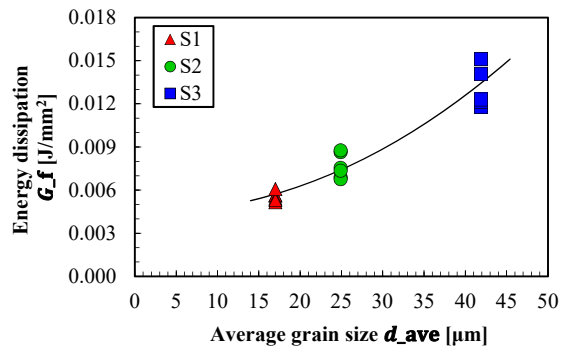


Fig. 9 Dependence of energy dissipation by tear-ridge formation on grain size

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 F. Yanagimoto, K. Shibamura, Y. Nishioka, Y. Shirai, K. Suzuki, T. Matsumoto	4. 巻 144-145
2. 論文標題 Local stress evaluation of rapid crack propagation in finite element analyses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 66-77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 F. Yanagimoto, K. Shibamura, K. Suzuki, T. Matsumoto, S. Aihara	4. 巻 144
2. 論文標題 Local stress in the vicinity of the propagating cleavage crack tip in ferritic steel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 361-373
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Aikawa, S. Aihara, T. Kawabata, F. Yanagimoto, K. Shibamura	4. 巻 13
2. 論文標題 Computer simulation of cleavage fracture surface morphologies in steel plates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 104-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Kawabata, Fumiaki Tonsho, Yuki Nishizono, Noritaka Nakamura, Yasuhito Takashima	4. 巻 100
2. 論文標題 Controlling factors for roughness increases on cleavage fracture surfaces and crack branching in polycrystalline steel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 171-180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Kawabata, Noritaka Nakamura, Shuji Aihara	4. 巻 47
2. 論文標題 Brittle crack propagation acceleration in a single crystal of a 3% silicon-Fe alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frattura ed Integrita Strutturale	6. 最初と最後の頁 416-424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3221/IGF-ESIS.47.3d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Nishizono, Shuji Aihara, Tomoya Kawabata, Teppei Okawa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A simplified method for evaluation of brittle crack arrest toughness of steels in scaled-down bending tests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Nishizono, Shuji Aihara, Tomoya Kawabata, Teppei Okawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of simplified evaluation method of brittle crack arrest toughness on small-scale bending test in steels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 1817-1827
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 K. Kishi, K. Shibamura, F. Yanagimoto, K. Suzuki, T. Matsumoto
2. 発表標題 Development of dynamic mesh superposition method for local tensile stress evaluation
3. 学会等名 The 22nd European Conference on Fracture, Aug. 26-31, 2018, Belgrade, Serbia (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Shibamura, Y. Suzuki, K. Kiriyama, T. Hemmi, H. Shirahata
2. 発表標題 A numerical simulation model of cleavage crack propagation based on 3D XFEM
3. 学会等名 The 22nd European Conference on Fracture, Aug. 26-31, 2018, Belgrade, Serbia (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kiriyama, K. Shibamura, Y. Suzuki, T. Hemmi, K. Suzuki, S. Aihara
2. 発表標題 A numerical simulation model of cleavage crack propagation in steel based on the extended finite element method
3. 学会等名 the 13th World Congress on Computational Mechanics, Jul.22-27, 2018, New York, USA. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Nishizono, Tomoya Kawabata and Shuji Aihara
2. 発表標題 Development of simplified evaluation method of brittle crack arrest toughness on small-scale bending test in steels
3. 学会等名 22nd European Conference on Fracture - ECF22 26-31. August, 2018, Belgrade, Serbia (国際学会)
4. 発表年 2018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	鈴木 克幸 (Suzuki Katsuyuki) (10235939)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	柴沼 一樹 (Shibanuma Kazuki) (30611826)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授 (12601)	
研究 分 担 者	川畑 友弥 (Kawabata Tomoya) (50746815)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授 (12601)	