

令和 3 年 8 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05337・20K20354

研究課題名（和文）船体脆性き裂伝播停止性能の飛躍的改善をもたらすミクロ組織および構造設計の新視点

研究課題名（英文）A New Perspective on Microstructure and Structural Design for Drastic Improvement of Hull Brittle Crack Propagation Arrest Performance

研究代表者

川畑 友弥（Kawabata, Tomoya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：50746815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 21,520,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二つの逆転の発想ともいうべき手段の実現性を追求するための実験的研究を行った。「き裂分岐促進による高靱化」については、分岐を人工的に誘発させることのできる技術の確立とまではいかなかったが、負荷モードの相違によりその分岐速度は大きく異なることを初めて知見するなど人為的分岐発生対し大いに参考になるデータが得られた。新たな分岐理論モデルも併せて提案した。また「サイドリガメント効果最大化のためのディンプル加工」については、ディンプル加工を行うことにより亀裂伝播抵抗が増加することが実験的に示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船体やエネルギー分野など高い信頼性を要求される大型溶接構造物において脆性破壊事故は絶対に避けなければならない破壊形態である。それらの発生を万が一想定した場合の脆性き裂伝播停止特性が実際に考慮されており、今後も構造物設計の要になる。大型化の著しいコンテナ船最大板厚である90-100mmは最新の圧延技術、TMCPのほぼ限界である。また高強度化についても溶接部疲労の観点から難しい。例えば目標厚を150mmと定めた場合高価なNiなどのレアメタル元素添加に頼らざるを得なくなり現状の延長線上では経済的に実現性が乏しい。これらの状況を打破できる効果的な脆性き裂伝播停止特性付与技術は産業上の大きなニーズである

研究成果の概要（英文）：In this study, experimental research was conducted to pursue the feasibility of two innovative methods. As for the toughening condition by promoting crack branching, although we could not establish the technology to induce the branching artificially, we found the first data that the bifurcation speed is significantly different depending on the loading mode, which is very helpful for the artificial bifurcation generation. In addition, we proposed a new branching theory model. Regarding the dimple processing for maximizing the side ligament effect, it was experimentally shown that the crack propagation resistance increased with dimple processing.

研究分野：破壊力学

キーワード：脆性亀裂伝播 鋼 高靱化 亀裂分岐 表面加工 ディンプル 散逸エネルギー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船体やエネルギー分野など極めて高い信頼性を要求される大型溶接構造物において脆性破壊事故は絶対に避けなければならない破壊形態であるが、それらの発生を万が一想定した場合の脆性き裂伝播停止特性が実際に設計に考慮されており、今後も構造物設計の要になるだろう。船舶分野特に大型コンテナ船分野では、板厚 100mm までの同特性の要求性能が実大試験により明確にされ、国際船級協会にてルール化される予定である。世界の海上輸送の安全性に多いに寄与することが期待される。船の規模と輸送コストは直接にリンクするため、大型化ニーズは今後も高まるだろう。しかし、現状の最大規模(20000 個積み)コンテナ船の最大板厚である 90~100mm は最新の圧延技術, TMCP のほぼ限界である。また高強度化についても溶接部疲労の観点から難しい。目標厚を 150mm と定めた場合高価な Ni などのレアメタル元素添加に頼らざるを得なくなり現状の延長線上では経済的に実現性が乏しい。これらの状況を打破できる効果的な脆性き裂伝播停止特性付与技術は産業上の大きなニーズである

現状なおも不明な点が多く残る鋼材脆性き裂伝播のメカニズムを完全に把握することは当分野研究者の変わらぬ目標である。しかし、その目標にストレートに取り組むだけでは工学技術者としては不足であり、上記産業ニーズに応えるため、これまで獲得した知見の組み合わせを真の意味で突き詰めて行く責務がある。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らの自主的な脆性き裂伝播メカニズム研究によりその糸口が得られつつある、二つの「逆転の発想」ともいべき手段の実現性を追求する。Ⅰ.き裂分岐促進による高靱化(→き裂を入りやすくする部位を故意に設ける) および Ⅱ.サイドリガメント効果最大化のためのディンプル加工(→応力分布を故意に設ける)の二項目である。これらはいずれも現在まで行われている材料の靱性改善のみに頼ったものではなく、構造設計・構造計画と材料設計を組み合わせる提案するものである。

3. 研究の方法

3-1 き裂分岐による伝播駆動力低下の積極活用

本研究では、まず鋼材の脆性亀裂伝播時の分岐条件を明らかにすることを目指した。しかしながら、鋼材での負荷モードを変化させて実験は困難性が高いため、PMMA (Kuraray により製造されたアクリル樹脂であるコモグラスを使用)における実験・解析研究を実施した。また分岐に関する理論的・数値解析的考察をおこなった。図 1 に示す形状の異なる 3 種類の試験片(引張試験、曲げ試験、逆進曲げ試験)による破壊試験を行った。試験片形状の違いにより破面粗さの上昇傾向が異なり、破面粗さ上昇の要因を切り分けることに利用できる結果を得ることを期待した。本研究では、供試材としてアクリル樹脂を使用した。樹脂材料を供試材とした試験は、鉄鋼材料による試験と比較して成功率が高く、簡便かつ安価に実施可能であることから、今回のように多くのサンプル数を必要とする比較試験に適している。また、樹脂の中でもアクリルは塑性変形の程度が小さく、理想的な弾性材料に近い変形挙動を示すことが期待できる。これにより、線形弾性体を仮定した数多くの理論的なアプローチを高い精度で適用可能であり、実験結果を扱いやすいという利点がある。試験片の亀裂伝播部に貼り付けたひずみゲージによって、亀裂先端の特異応力場による局所的引張ひずみの観測を行うことにより亀裂伝播速度を計測した。各試験片形状について、ノッチ先端の鋭さや負荷応力の調節を行うことで、幅広い駆動力および亀裂伝播速度における破面を入手できるような工夫を施した。

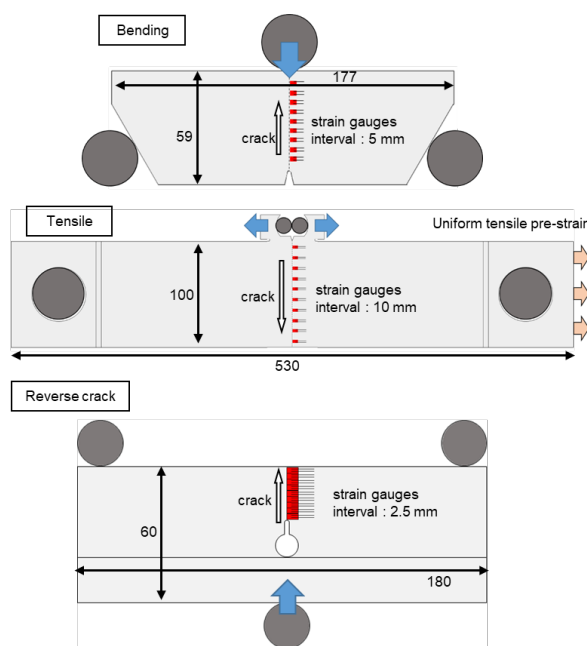


Fig. 1 Configurations of test specimen

3-2 サイドリガメント効果最大化のためのディンプル加工

(1) PMMA による予備調査

前節同様、ディンプル効果の影響を試験が容易な PMMA (コモグラス) を用いて確認した。Fig. 2 に試験片形状を示す。

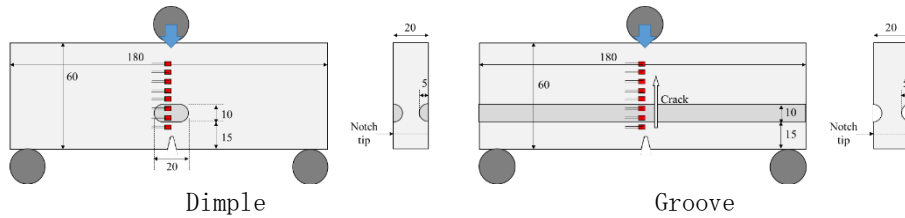


Fig.2 Configuration of dimple and groove specimen

(2) 9%Ni 鋼板による伝播試験

本研究の本目対象材料である 9%Ni 鋼板 (Table1) [板厚 30mm] を用いた脆性亀裂伝播試験を実施した。試験はディンプル材のみならず従来の無加工試験片 (ここでは Flat と呼ぶ) も準備した (Fig. 3)。適切な計測ができるよう ESSO 試験には片面に熱電対を、片面にひずみゲージを計装し試験に供した。なお、ディンプル加工は半径 5mm の半球面となるよう適した工具を用いて加工した。ディンプルの配置は Fig. 4 に示す通りである。

Table 1 Chemical compositions of material used [mass%]

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.05	0.22	0.65	0.003	<0.001	9.07

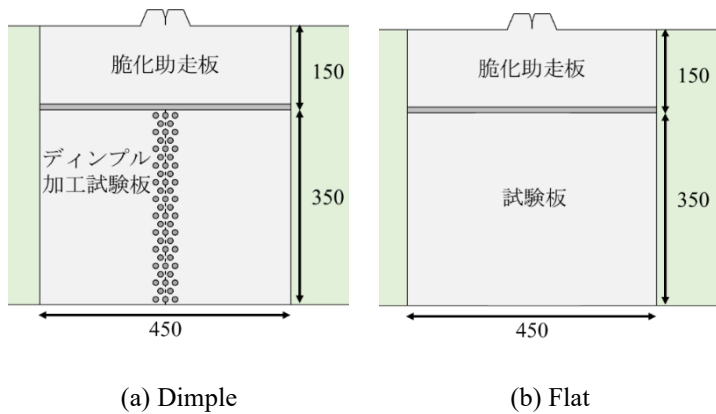


Fig. 3 Configuration of test specimens (unit: [mm])

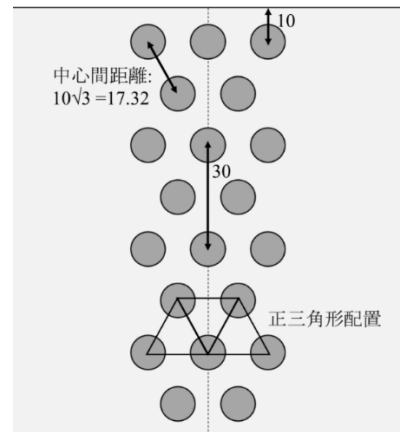


Fig.4 Machining position of "Dimple"

4. 研究成果

4-1 き裂分岐による伝播駆動力低下の積極活用

破面の粗さが極端に上昇すると、亀裂が明確な分岐を起こし、2本の亀裂として伝播する現象が見られる。3種類の試験片形状における亀裂分岐発生時の亀裂伝播速度を測定し、結果を比較した。その結果、Fig. 5 に示すように、引張試験では亀裂伝播速度が 650 m/s、逆進曲げ試験では 830 m/s、曲げ試験では 950 m/s 以上の亀裂伝播速度で亀裂分岐が発生するとわかり、引張試験では、他の試験片形状と比較して低い亀裂伝播速度でも亀裂分岐が観測され、破面粗さが上昇しやすい試験片形状であることが推測される結果となった。

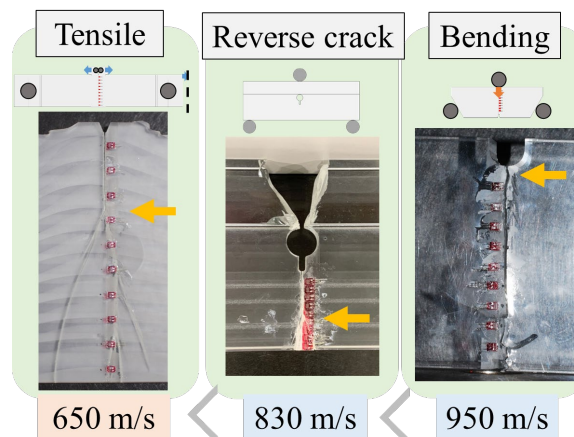


Fig. 5 Crack speed at the crack branching point

実験で得られた破面について、レーザー顕微鏡を用いた破面粗さの測定を行った。亀裂分岐域に限定されない破面全面に対する粗さの定量化手法を確立することが目的である。粗さパラメータが数多く存在し、粗さの評価手法が定まっていない点、粗さの測定値が測定スケールの影響を受ける点を問題点として挙げた上で、これらの問題点を排除する測定方法として、表面積を評価パラメータとし、測定倍率を 20 倍で固定する方法を確立した。粗さの指標として表面積を使用したのは、亀裂伝播のエネルギー理論に基づけば、表面積の増大が靱性改善の主要因であるためである。3種類の形状の試験片それぞれの破面について、板厚中央部で亀裂伝播方向に等間隔に計測を行った。レーザー顕微鏡で測定された破面表面積の一例を Fig. 6 に示している。破面の表面積の測定値の分布は直感的な破面粗さと良く整合しており、表面積による破面粗さの記述は妥当であると判断できる。

表面積の測定結果を、横軸を亀裂伝播速度として試験片形状ごとにプロットしたものを Fig. 7 に示している。破面粗さの上昇傾向は、試験片形状の影響を大きく受けて互いに異なっているということが明確に示された。引張試験では他の2種類の試験片形状と比較して破面粗さが上昇しやすい傾向があり、亀裂伝播速度が 700 m/s 程度に達すると破面粗さは極端に上昇し、亀裂はそれ以上加速しなくなる。また、定量的な破面粗さの測定値が 7 付近に達すると亀裂分岐が発生するという整理が可能になった。

また、これらの亀裂分岐を説明可能な理論を構築した。破面粗さの上昇や亀裂分岐の分岐角を説明する有名な理論に、Yoffe[2]の周方向応力理論がある。周方向応力理論は、亀裂先端の周方向応力が最大の方向に亀裂が進展するという考えである。Yoffe は動的な亀裂先端の応力場に解析的な解を与え、周方向応力分布と亀裂伝播速度の関係を計算した。結果として、亀裂伝播速度が $0.7 c_r$ に達すると、周方向応力が直進方向でない角度で最大になり、その角度が 60 度付近を推移することで、破面粗さ発生限界条件を $0.7 c_r$ の亀裂伝播速度、亀裂の分岐角を約 60 度と見積もった。しかし、実験的には破面粗さ発生限界条件は $0.36 c_r$ 、分岐角は 15~30 度が過去に多く報告されている値であり、Yoffe の周方向応力理論は必ずしも破面粗さの現象を説明するものではなかった。本研究では、材料のひずみ速度依存性により、周方向の限界破壊応力の分布が変化することを考慮して、周方向応力理論の修正を行った。ひずみ速度によるヤング率、ポアソン比、限界破壊応力、塑性域寸法への影響を考慮した限界破壊応力のモデルを作成した。計算結果を Fig. 8 に示す。破面粗さの発生条件として $0.35 c_r$ 、亀裂の分岐角として 30 度付近を示す結果を得た。これは実験結果を精度良く再現するものであり、破面粗さの発生機構を限界破壊応力のひずみ速度依存性により説明できる画期的な理論である。

4-2 サイドリガメント効果最大化のためのディンプル加工

(1) PMMA による予備調査

それぞれの試験片について、これまでと同様の方法で亀裂伝播速度の測定および破面粗さの測定を行った。測定された破面粗さを、横軸をノッチ先端からの距離としてプロットし、分布を図示すると Fig.9 のようになった。破面粗さが板厚変化部の後半部付近からやや上昇しているという現象が顕著に観察された。板厚変化部が破面粗さに対して影響を及ぼしていることを強く支持される結果である。また、Dimple と Groove では Dimple の方がその程度が著しかった。

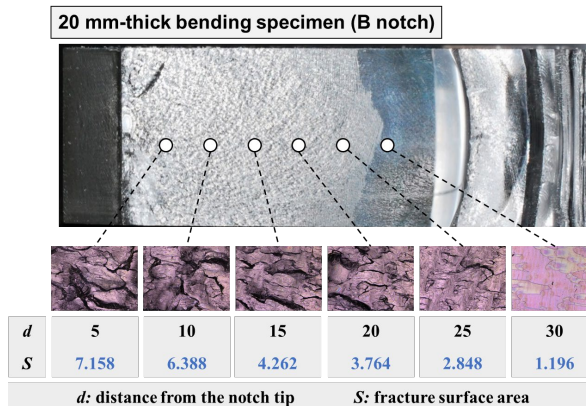


Fig. 6 Example of measured fracture surface roughness

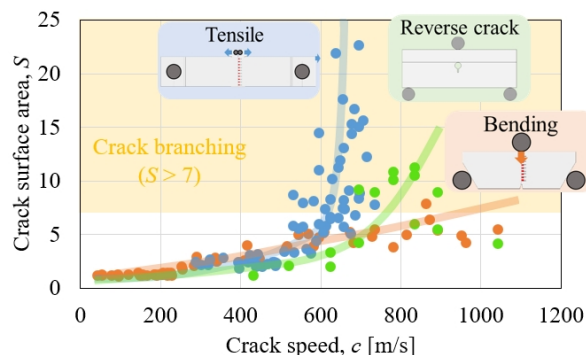


Fig. 7 Fracture surface development under various geometry

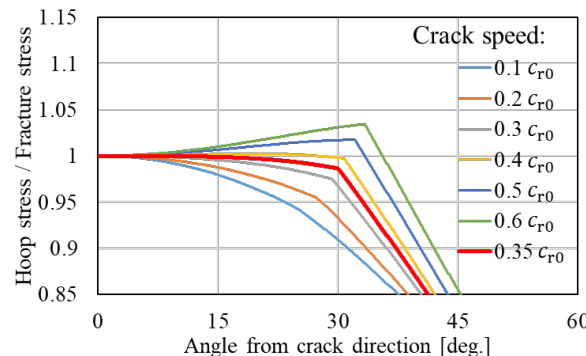


Fig. 8 Hoop stress / Fracture stress distribution

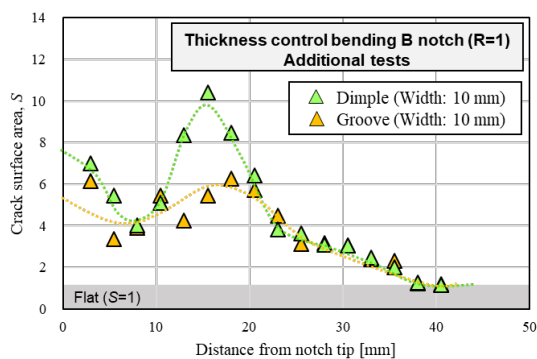


Fig.9 Fracture surface roughness distribution in thickness control bending specimens

亀裂伝播速度と破面粗さの関係を調査すると、以下の Fig. 10 のようになった。前節の板厚変化曲げ試験の本試験では、亀裂伝播速度と破面粗さの関係が一意に定まらず、単一の試験片においても大きな幅をもった測定値が観測され、破面粗さの上昇傾向が一意に定まらないという現象が確認された板厚方向の粗さの分布や亀裂前縁形状の影響などが考えられ興味深い詳しいメカニズムは判っていない。いずれにしてもディンプル加工が亀裂伝播抵抗として作用することが PMMA による予備試験にて支持された。

(2) 9%Ni 鋼板による伝播試験

試験結果を Table 2 に示す。Flat, Dimple ともに Propagate となり、結果のみでは Dimple 材の優位性は認められなかった。Fig.11 に破面外観、突合せ外観 (Dimple のみ) を示す。亀裂伝播速度計測結果を Fig.12 に示す。この図にはピンチャック部に貼り付けた PD ゲージひずみの動的変化についても併せて示してある。いずれの試験も PD ゲージの変化がほとんど見られない時刻内で供試鋼へ突入していることを確認した。亀裂伝播経路上に貼り付けたひずみゲージの応答時刻を Fig.11 に示す破面と併せてみても亀裂が混成溶接部で一度停止した痕跡はなく、脆性亀裂は助走板から供試鋼へと連続伝播していることが判る。これらのことから、試験は Valid に行われたことが判る。

また、両者の亀裂伝播速度を比較すると、助走版伝播中は双方とも殆ど同じ速度 (1020~1150m/s) で伝播していたのに対し、供試鋼中の伝播速度は Dimple : 500m/s、Flat : 1020m/s と Dimple 材は大きく速度低下していることが判る。引張型 ESSO 試験における最低亀裂伝播速度が 450m/s であるとする停止に極めて近い状況であることが推察される。これらの記録からは Dimple 加工付与は停止に至らしめるだけの能力が今回条件では見られなかったものの、伝播抵抗として機能していると言えるだろう。

本研究では、二つの逆転の発想ともいうべき手段の実現性を追求するための実験的研究を行った。「I. き裂分岐促進による高靱化」については、分岐を人工的に誘発させることのできる技術の確立とまではいかなかったが、負荷モードの相違によりその分岐速度は大きくことなることを初めて知見するなど人為的分岐発生対し大いに参考になるデータが得られた。新たな分岐理論モデルも併せて提案した。また「II. サイドリガメント効果最大化のためのディンプル加工」については、ディンプル加工を行うことにより亀裂伝播抵抗が増加することが実験的に示された。

以上

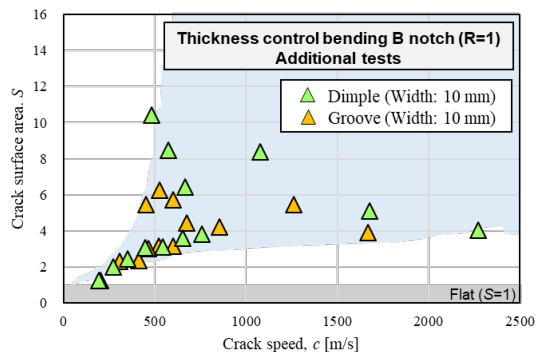


Fig. 10 Relationship between crack speed and fracture surface roughness in thickness control bending specimens

Table 2 Hybrid ESSO test results

Specimen	Stress [MPa]	Temp. [°C]	Result
Dimple	392.8	-196.0	Propagate
Flat	392.3	-195.6	Propagate

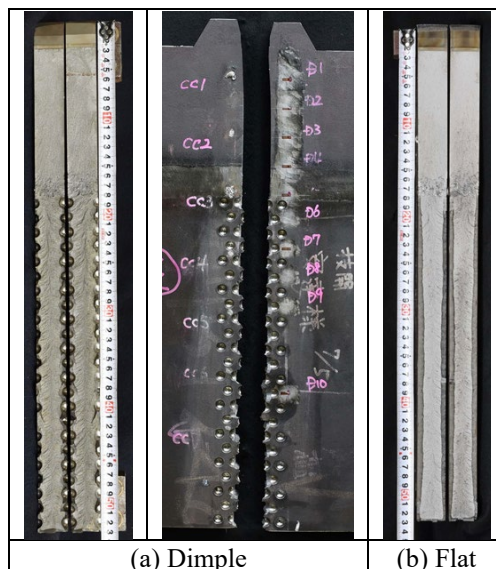


Fig. 11 Appearance of fracture surface and crack path for hybrid ESSO tests

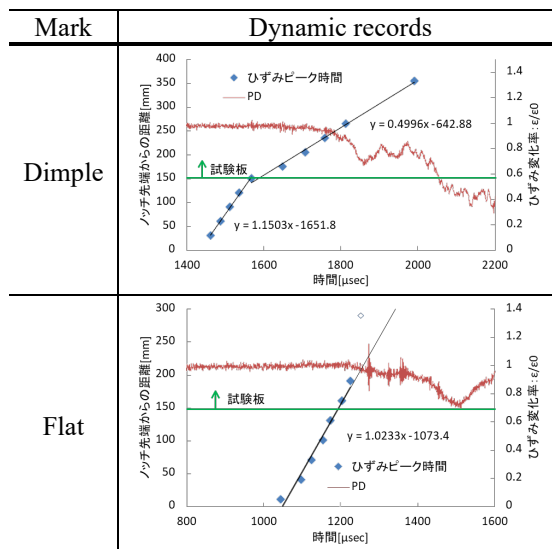


Fig. 12 Dynamic response of strain gauges

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Noritaka Nakamura, Tomoya Kawabata, Yasuhito Takashima, Fuminori Yanagimoto	4. 巻 Volume 108
2. 論文標題 Effect of the stress field on crack branching in brittle material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 102583-102592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2020.102583	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 Noritaka Nakamura, Tomoya Kawabata, Yasuhito Takashima, Yuki Nishizono and Fuminori Yanagimoto	4. 巻 300(3-4)
2. 論文標題 Effect of triaxial stress distribution upon roughness of brittle fracture surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11007-11014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201930011007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomoya Kawabata, Takehiro Inoue, Tetsuya Tagawa, Tsutomu Fukui, Yasuhito Takashima, Kazuki Shibamura and Shuji Aihara	4. 巻 Volume 71, May 2020, 102737
2. 論文標題 Historical review of research on brittle crack propagation arresting technology for large welded steel structures developed in Japan with the development of Kca parameters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Structures	6. 最初と最後の頁 102737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marstruc.2020.102737	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 Taiko Aikawa and Tomoya Kawabata	4. 巻 Volume 21
2. 論文標題 Consideration on the toughness difference depending on the direction of brittle crack propagation in very thick steel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Procedia Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 173-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.prostr.2019.12.099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashima Yasuhito, Kawabata Tomoya, Deguchi Ryosuke, Yamada Suguru, Minami Fumiyoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Increase in micro-cracks beneath cleavage fracture surface in carbon steel ESSO specimens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 365 ~ 372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2019.02.013	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 Kawabata Tomoya, Tonsho Fumiaki, Nishizono Yuki, Nakamura Noritaka, Takashima Yasuhito	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) 10.1016/j.tafmec.2019.01.010	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 Kawabata Tomoya, Nakamura Noritaka, Aihara Shuji	4. 巻 13
2. 論文標題 Brittle crack propagation acceleration in a single crystal of a 3% silicon-Fe alloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frattura ed Integrit? 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.47.32	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 Nishizono Yuki, Kawabata Tomoya, Aihara Shuji, Okawa Teppei	4. 巻 Available online 3 April 2019
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) 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 Nishizono Yuki, Kawabata Tomoya, Aihara Shuji	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) 10.1016/j.prostr.2018.12.334	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Noritaka Nakamura, Tomoya Kawabata, Yasuhito Takashima, Yuki Nishizono and Fuminori Yanagimoto
2. 発表標題 Numerical Investigation of Temperature Rise Near Crack-Tip in Steel Plate During Brittle Crack Propagation
3. 学会等名 International Symposium on Impact Engineering 2019;2nd-5th July, Gmunden Austria (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noritaka Nakamura, Yasuhito TAKASHIMA, Tomoya KAWABATA and Fumiyoshi MINAMI
2. 発表標題 Effect of triaxial stress distribution upon roughness of brittle fracture surface
3. 学会等名 ICMFF12, 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIAXIAL FATIGUE AND FRACTURE, June, 2019, Bordeaux (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村徳孝, 川畑友弥, 高嶋康人, 西園祐希, 柳本史教
2. 発表標題 応力多軸度が脆性破面粗さに与える影響の調査
3. 学会等名 2019年 日本船舶海洋工学会 春季講演会, 2019.6
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taiko Aikawa and Tomoya Kawabata
2. 発表標題 Consideration on the toughness difference depending on the direction of brittle crack propagation in very thick steel
3. 学会等名 1st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials, IWPDF 2019, 22-23 August 2019, Ankara, Turkey (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishizono Yuki, Kawabata Tomoya, Aihara Shuji
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 ECF22, 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	高嶋 康人 (Takashima Yasuhito) (50397692)	大阪大学・接合科学研究所・助教 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------