

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05561

研究課題名(和文)脆性破壊の伝播・停止現象の力学モデル確立と長大亀裂問題の解明

研究課題名(英文) Development of a model for simulating brittle crack propagation and arrest behavior and clarification of the long crack problem

研究代表者

柴沼 一樹 (Shibanuma, Kazuki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：30611826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、(1)鋼板における脆性破壊の伝播・停止挙動の支配因子と考えられる、局所限界破壊応力およびサイドリガメントの亀裂閉口効果を考慮した破壊力学モデル開発を行い、(2)開発したモデルを用いて複数の大型破壊試験で得られた実験の再現し、両者の結果を比較することで開発モデルの妥当性検証を実施した。さらに、(3)開発したモデルを用いて系統的な計算を実行することで、実構造物のアレスト設計に必要な材料特性値の推定を行った。最後に、(4)本研究で開発したモデルの最も重要な破壊のクライテリオンである局所限界破壊応力説について、実験と有限要素解析を用いた妥当性検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、40年以上未解決である長大亀裂問題を解明しただけでなく、構造基盤材料の「アレスト靱性」に本質的意味を与える挑戦的な試みであった。また、本研究の成果は、海上輸送構造物の安全性確保に直接的に貢献する基盤技術でもある。したがって本研究の成果は学術的・社会的価値を両立した工学研究であるといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we obtained four achievements as follows. (1) We developed a fracture mechanics model for simulating brittle crack propagation and arrest behavior in a steel plate based on the local fracture stress criterion and the crack closure effect by side ligaments. (2) Validation of the proposed model was performed by comparing with several experiments of several large-scale fracture tests. (3) We estimated the material property necessary for the arrest design of the actual structures by systematic calculations using the proposed model. (4) The validity of the local fracture stress criterion was validated using experiments and finite element analysis.

研究分野：破壊力学

キーワード：脆性破壊 亀裂伝播 アレスト 長大亀裂問題

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、市場の国際化に伴い国際海上物流量は増加の一途をたどり、今後も長期的な高い成長率が見込まれている。これに対応し、コンテナ船の大型化が急速に進行し、その積載量が15,000TEU（TEU：積載量の20ftコンテナ換算値）を超えるような超大型船も建造されるようになった。これらの船体構造では、これまで経験のない100mmに迫る極厚鋼板が使用されるが、鋼板の板厚増加は脆性破壊の可能性をより高めることが危惧されている。脆性破壊は、溶接部等を起点として突発的に発生した後、不安定な亀裂の伝播によって構造全体を破断し、甚大な被害を与える可能性があるため確実に防止する必要がある。この脆性破壊による大規模損傷を未然に防ぐためには、破壊の発生起点となる溶接欠陥や疲労損傷は完全に除去することは事実上不可能であるため、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重要となる。

以上の背景を受けて、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鋼板の脆性破壊による亀裂伝播を停止させる性能（アレスト靱性）を評価する試験方法を確立するための研究委員会を発足させ、本研究代表者も参画して中心的な役割を担った。本委員会では実験と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、世界初の汎用的な鋼板のアレスト靱性評価方法の基盤を確立した。

上記のような一連の研究成果により、アレスト靱性を船体構造の設計要件とする枠組みは整備されつつある。その一方で、アレスト靱性の本質の意味を含め、脆性破壊の「伝播・停止」は力学現象として理論的に未解明な点が多いのが現状である。特に、線形破壊力学に基づき評価したアレスト靱性に関して、一般的な標準試験と実船模擬大型試験で求めた結果に大きな乖離が生じることが知られている。この両者の差の物理的根拠は40年以上もの間未解決であり、長大亀裂問題と呼ばれている。これを解明しない限りは、船体構造の破壊安全性を確実に保証する方法を見いだせないのが現状である。したがって、脆性破壊の「伝播・停止」現象を解明し、確固たる理論を確立することは喫緊の課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、40年以上未解決である長大亀裂問題の物理的根拠を明らかにするために、鋼板における脆性亀裂の伝播・停止挙動を定量的に再現可能な新しい力学モデルを確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、(1)鋼板における脆性破壊の伝播・停止挙動の支配因子と考えられる、局所限界破壊応力およびサイドリガメントの亀裂閉口効果を考慮した破壊力学モデル開発を行い、(2)開発したモデルを用いて複数の大型破壊試験で得られた実験の再現し、両者の結果を比較することで開発モデルの妥当性検証を実施した。さらに、(3)開発したモデルを用いて系統的な計算を実行することで、実構造物のアレスト設計に必要な材料特性値の推定を行った。最後に、(4)本研究で開発したモデルの最も重要な破壊のクライテリオンである局所限界破壊応力説について、実験と有限要素解析を用いた妥当性検証を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 鋼板の脆性亀裂伝播・停止挙動を再現する破壊力学モデルの開発（主な発表論文等 - 雑誌論文[1]）

局所破壊条件に基づく鋼板における脆性亀裂の伝播・停止挙動を再現するための定式化（モデル）を提案した。亀裂の挙動は、(a)破壊条件、(b)ひずみ硬化、(c)降伏点、および(d)動的応力拡大係数、に関する支配方程式を連立して解くことで実現される。本モデルによる再現計算は単純でかつ高い計算効率を有し、任意パラメータも存在しない。亀裂の停止（アレスト）は連立方程式を満足する解がなくなった時点、もしくは、板表面部のサイドリガメントが発達し板厚全体を覆った時点として評価される。

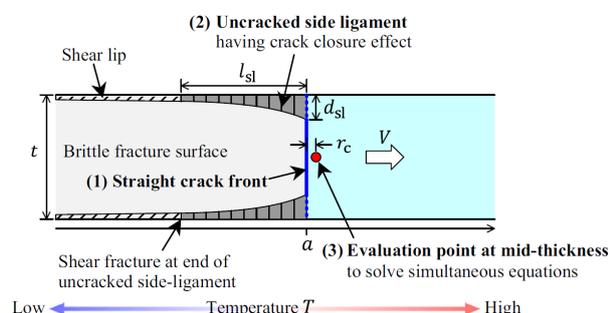


Fig. 1 脆性亀裂伝播・停止挙動のモデル化

#### (2) 大規模破壊試験との比較による開発モデルの妥当性検証（主な発表論文等 - 雑誌論文[2]）

温度勾配型アレスト試験および混成型アレスト試験の実験との比較により、提案モデルの妥当性検証を実施した。その結果、提案したモデルは、(1)温度勾配型試験で得られた高負荷応力下における経験式（アレニウスプロット）からの乖離、および(2)混成型試験における長大亀裂の停止挙動に関する遷移領域、に関する実験結果を再現することに成功した。これらの結果は、長い間未解明であった「長大亀裂問題」の解決を示唆するものである。

(3) 極厚鋼板のアレスト設計要件の推定 (主な発表論文等 - 雑誌論文 [3])

上記の開発モデルによる体系的な計算を実行し、鋼板の脆性亀裂アレスト設計に関する考察を行った。本モデルによる計算結果として得られるアレスト靱性 $K_{ca}$ の温度依存性曲線は左に凸な形状となり、この極大値として Essential Crack Arrest Temperature (ECAT) の存在を示唆している。この ECAT に関して様々な影響因子の評価を行い、設計温度における任意の強度・板厚を有する鋼板の必要アレスト靱性の推定式の提案を行った。推定式で予測した必要アレスト靱性は過去の実験で得られた全ての混成型試験の結果を説明可能であることが示された。

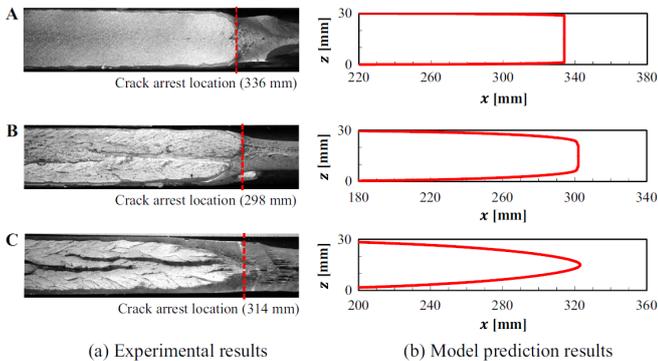


Fig. 2 開発モデルの妥当性検証 (形成破面形態の比較)

(4) 局所限界破壊応力理論の妥当性検証 (主な発表論文等 - 雑誌論文 [4])

本研究の目的は、実験と有限要素解析を組み合わせることで劈開亀裂伝播における高速伝播中の亀裂先端近傍の局所引張応力を評価することである。これまでの研究により、局所応力は劈開亀裂伝播を記述するための最も有力な破壊のクライテリオンであったが、高速伝播中の亀裂先端が一定の応力を維持している実験的証拠は報告されていない。これは、現象における 3 次元効果により亀裂前縁の応力状態を評価することが困難であったためである。本研究では、亀裂伝播中に理想的な 2 次元状態となるようなサイドグループ試験体を設計し、2 種類の鋼板を用いて負荷応力と温度を変化させた体系的な破壊試験を実施した。その結果、それぞれの鋼板に対して試験条件によらず亀裂伝播中の局所応力はほぼ一定となることが示された。本研究の成果は、実験的事実として局所破壊応力は劈開亀裂伝播に対する材料特性値であり、鋼の劈開亀裂伝播・停止を記述する材料特性値として有効であることを強く示唆するものである。

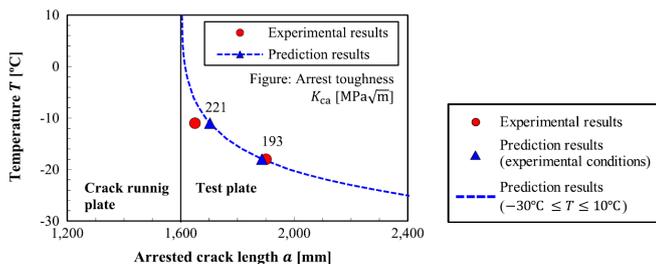


Fig. 3 開発モデルの妥当性検証 (長大亀裂問題の再現)

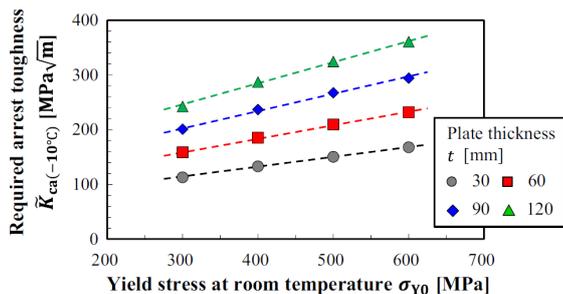


Fig. 4 脆性亀裂停止に必要なアレスト靱性 $K_{ca}$ の推定

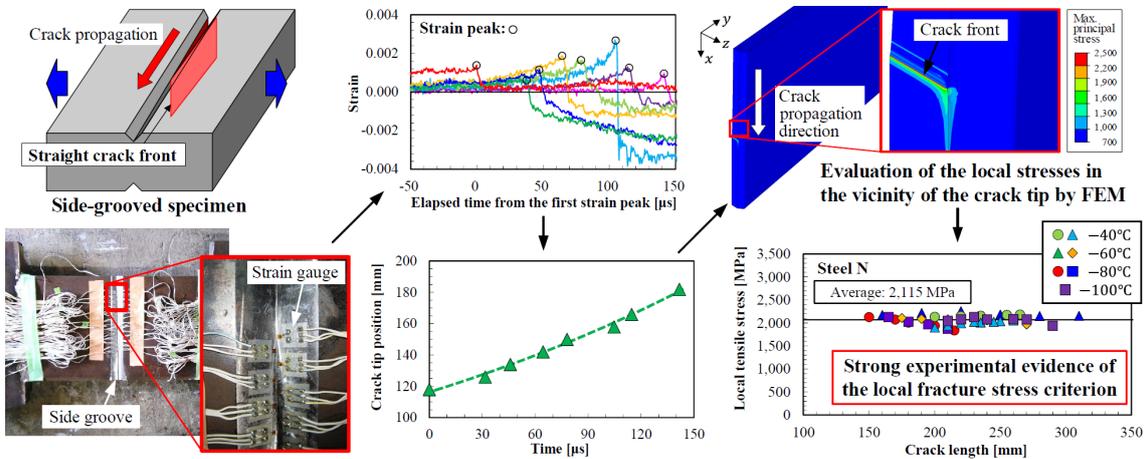


Fig. 5 局所限界破壊応力理論の妥当性検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- [1] K. Shibanuma\*, F. Yanagimoto, T. Namegawa, K. Suzuki, S. Aihara, Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate - Part I: Model formulation, *Engineering Fracture Mechanics* 162 (2016), 324–340.
- [2] K. Shibanuma\*, F. Yanagimoto, T. Namegawa, K. Suzuki, S. Aihara, Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate - Part II: Experiments and model validation, *Engineering Fracture Mechanics* 162 (2016), 341–360.
- [3] K. Shibanuma\*, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate - Part III: Discussion on arrest design, *Engineering Fracture Mechanics* 190 (2018), 104-119.
- [4] F. Yanagimoto\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, T. Matsumoto, S. Aihara, Local stress in the vicinity of the propagating cleavage crack tip in ferritic-pearlitic steel, *Materials & Design* 144 (2018), 361-373.

〔学会発表〕（計 9 件）

- [1] F. Yanagimoto\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, S. Aihara, A numerical model to evaluate brittle crack propagation and arrest behavior in steel plates based on local fracture stress criterion, *ICF14 (14th International Conference on Fracture)*, June 18-24, 2017, Rhodes, Greece.
- [2] F. Yanagimoto\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, S. Aihara, A new model to simulate crack arrest behavior in steel plates used for naval structures, *Techno-Ocean 2016*, Oct.6-8, 2016, Kobe, Japan (Selected Student Poster Award).
- [3] Y. Nishioka\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, Node release technic to evaluate local fracture stress in fast crack propagation, *ECF21 (The 21st European Conference on Fracture)*, Jun.20-24, 2016, Catania, Italy.
- [4] K. Shibanuma\*, F. Yanagimoto, T. Namegawa, K. Suzuki, S. Aihara, Modeling of brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate, *ECF21 (The 21st European Conference on Fracture)*, Jun.20-24, 2016, Catania, Italy.
- [5] F. Yanagimoto\*, K. Shibanuma, T. Kawabata, K. Suzuki, S. Aihara, Measurement of local brittle fracture stress for dynamic crack propagation in steel, *ECF21 (The 21st European Conference on Fracture)*, Jun.20-24, 2016, Catania, Italy.
- [6] 柳本史教\*, 柴沼一樹, 鈴木克幸, 栗飯原周二, フェライト・パーライト鋼の劈開亀裂伝播における局所破壊応力の実験的評価, 日本鉄鋼協会 第 175 回春季講演大会, 2018 年 3 月.
- [7] 柳本史教\*, 柴沼一樹, 白井結哉, 西岡陽, 鈴木克幸, 有限要素法による高速伝播亀裂の局所応力評価, 日本船舶海洋工学会 秋季講演会, 2017 年 11 月.
- [8] 柳本史教\*, 逸見拓弘, 柴沼一樹, 鋼板の脆性亀裂伝播抵抗に関するモデル計算と実験計測, 日本鉄鋼協会 172 回秋季講演大会 産発プロジェクト展開鉄鋼研究シンポジウム, 2016 年 9 月.
- [9] 柳本史教\*, 柴沼一樹, 川畑友弥, 鈴木克幸, 栗飯原周二, 動的脆性亀裂伝播中の局所破壊応力評価, 日本鉄鋼協会 第 172 回秋季講演大会, ポスターセッション, 2016 年 9 月.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕  
なし

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織

若手研究（A）のため、研究分担者・研究協力者ともになし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。