

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14410

研究課題名(和文) Model synthesisによる鋼組織情報に基づく脆性亀裂停止性能の定量予測

研究課題名(英文) Quantitative prediction of brittle crack arrest toughness based on microstructural information of steel by model synthesis

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鋼材料の微視的組織と脆性亀裂伝播抵抗の関係性を定量的に予測するために、(a) ミクロスケール劈開亀裂伝播モデル、(b) 有限要素解析モデル、(c) マイクロスケール脆性亀裂伝播モデル、を統合したマルチスケールモデルを構築した。さらに、開発モデルの精度向上を目的として、(i) 材料の亀裂停止性能における粒径依存性を評価するためのDCB試験、および、(ii) 劈開面間距離がティアリッジ形成に伴うエネルギー吸収量に与える影響を評価するための微小試験、という2種類の実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：A multiscale model was developed by the model synthesis approach to integrate (a) a model to simulate microscopic cleavage crack propagation, (2) a model of finite element analysis, and (c) macroscopic brittle crack propagation, as the first attempt to clarify the relationship between microstructures of steel and macroscopic brittle crack arrest toughness. In addition, two kinds of experiments were conducted in order to improve the accuracy of the developed model; (i) DCB tests to evaluate dependence of cleavage crack arrest toughness on grain size, and (ii) micro-scale tests to evaluate an effect of distance between cleavage planes on absorbed energy during tear-ridge forming.

研究分野：工学

キーワード：破壊力学 脆性破壊 アレスト靱性 劈開破壊 マルチスケール

1. 研究開始当初の背景

鋼板の劈開破壊は突発的かつ高速で発生するために構造物に対して致命的な損傷を与える可能性があり、確実に防止しなければならない現象である。劈開破壊に対する巨視的な材料の抵抗に結晶粒径や結晶方位といった微視組織が強く寄与していることは広く知られているが、両者の関係はほとんど解明されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、従来の研究で未解明であった鉄鋼材料の微視的組織と脆性亀裂伝播抵抗の関係性を定量的に予測するために、脆性亀裂伝播による破壊形態の微視的メカニズムを考慮したマイクロスケールモデルと、連続体力学に基づくマクロスケールモデルを連成させるためのモデル統合化 (Model synthesis) に関するアルゴリズムを提案し、それに立脚したマルチスケール統合化モデルを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) まず、モデル統合化によるマルチスケール統合化モデルのフレームワーク構築を行う。具体的には、(a) 結晶粒スケールの微視的なへき開亀裂伝播を模擬するマイクロスケールモデル、(b) 巨視的な鋼板全体の亀裂伝播から亀裂先端ごく近傍の局所応力を取得する有限要素解析モデル、(c) 鋼板の巨視的な脆性亀裂伝播を模擬する統合化モデルとしてのマクロスケールモデルの開発、を段階的に行う。さらに板厚方向に不均質な結晶粒径・方位分布を有する鋼板を用いた脆性亀裂停止試験を実施し、得られた破面形態を対象とした開発モデルの妥当性検証を実施する。

(2) 劈開亀裂伝播の微視的機構および最も基本的な組織単位である粒径が劈開亀裂伝播抵抗に及ぼす影響に関する実験的な検討を実施する。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。そこで、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う。

(3) 劈開亀裂伝播における破面形成エネルギーの支配因子と考えられる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する。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。

4. 研究成果

(1) 開発したマルチスケールモデルの概要を Fig. 1 に示す。(a)のマイクロスケールモデルとして、Aihara and Tanakaが開発した劈開亀裂伝播モデル(①)を採用した。結晶粒径や結晶方位の分布を入力条件として与えることから、各試行の結果に大きなばらつきが生じることとなる。このため、マイクロスケールモデルとの連成における巨視的な有効表面エネルギーおよび破面方向を評価するために、Fig. 2 に示すようなモンテカルロ・シミュレーションを基礎とした計算アルゴリズムを構築した。また、簡単のために、上記の3段階のモデル解析の連成は Fig. 3 に示すような物理量を各ユニットセルに内挿によって割り当てる一方向の弱連成によって行った。本モデルを厚さ方向の微視組織に不均質な分布を有する鋼板のアレスト試験に適用し、実験結果との比較を行うことで、モデルの妥当性検証を行った。その結果、Fig. 4 および Fig. 5 に示すように亀裂停止時のスプリット・ネイルと呼ばれる特異な亀裂前縁形状、シェブロン・パターンの形成状況に関して、解析結果および実験結果の両者は良い一致を示した。

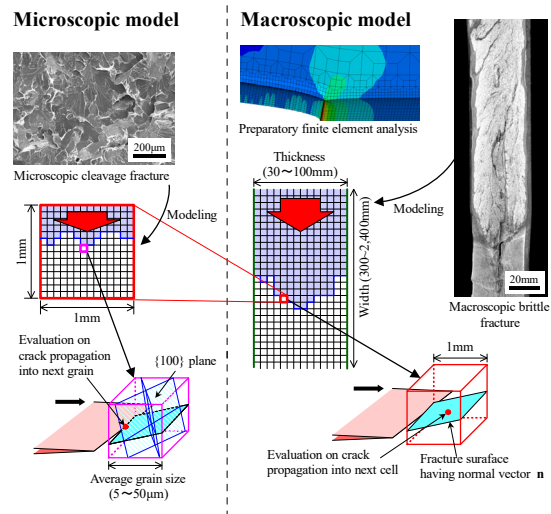


Fig. 1 開発したマルチスケールモデルの概要

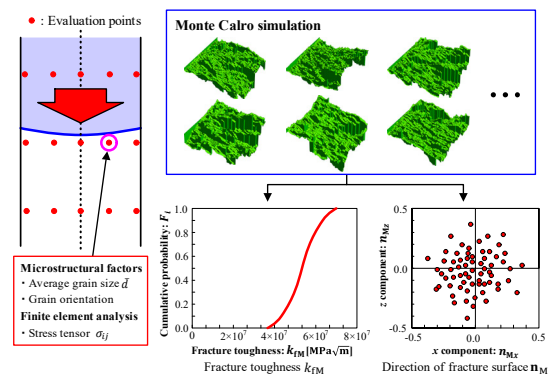


Fig. 2 有効表面エネルギーおよび破面方向を評価するためのモンテカルロ・シミュレーション

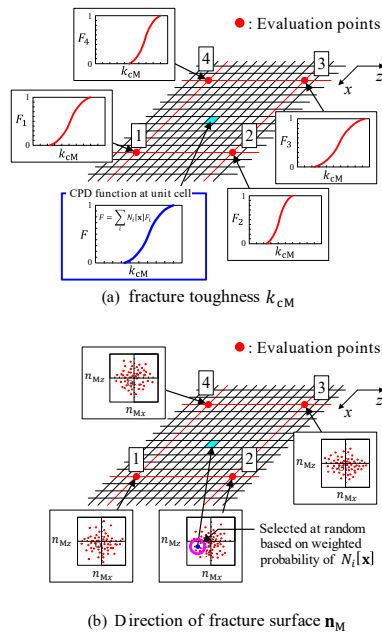


Fig. 3 マルチスケール連成のための物理量内挿

(2) 最も基本的な組織単位である粒径が劈開亀裂伝播抵抗に及ぼす影響に関する実験的な検討を実施するために、化学組成が同一とみなせ、Fig. 4 に示す結晶粒径のみが異なる3種類の鋼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。材料の劈開亀裂伝播抵抗の指標として局所限界破壊応力を採用し、これ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た。その結果、Fig. 5 に示すように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。

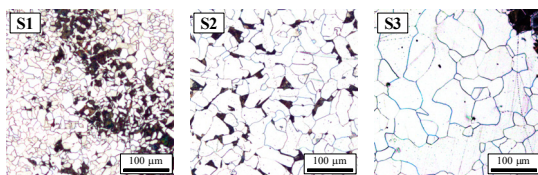


Fig. 4 粒径のみが異なる3鋼種

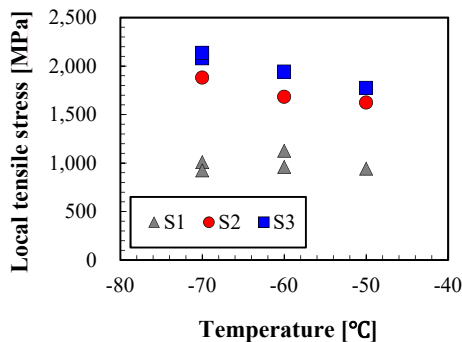
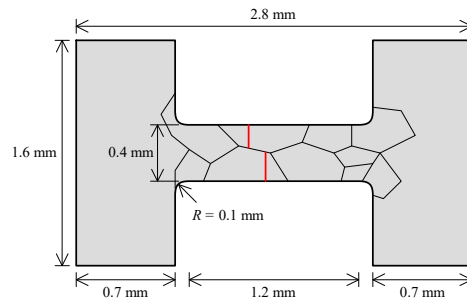
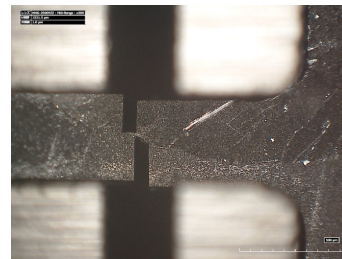


Fig. 5 亀裂停止性能に及ぼす結晶粒径の影響

(3) 劈開亀裂伝播における破面形成エネルギーの支配因子と考えられる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、Fig. 6 に示す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、引張試験を実施した。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。得られた結果をFig. 7 に示す。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。これは連続体力学に基づく近似式と整合するものであり、粒界近傍の微視的な影響は軽微であることを示唆するものである。



(a) Specimen configuration



(b) Test photo

Fig. 6 フェライト単相鋼を用いた微小試験

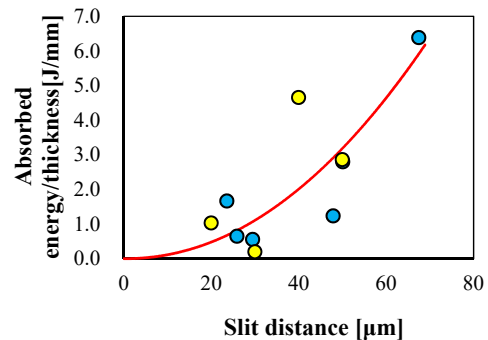


Fig. 7 劈開面間距離がティアリッジ形成エネルギーに及ぼす影響

<引用文献>

- ① S. Aihara, Y. Tanaka, A simulation model for cleavage crack propagation in BCC polycrystalline solids, Acta Materialia, Vol.59, No.11, pp.4641-4652, 2011.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① K. Shibanuma, Y. Yamamoto, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, Multiscale model synthesis to clarify the relationship between microstructures of steel and macroscopic brittle crack arrest behavior - Part I: Model presentation, ISIJ International, 査読有, Vol. 56, No. 2, 2016, 341-349. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2015-449
- ② Y. Yamamoto, K. Shibanuma, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, Multiscale model synthesis to clarify the relationship between microstructures of steel and macroscopic brittle crack arrest behavior - Part II: Application to crack arrest test, ISIJ International, 査読有, Vol. 56, No. 2, 2016, 350-358. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2015-450
- ③ 柴沼 一樹, 山本 悠貴, 柳本 史教, 鈴木 克幸, 栗飯原 周二, 白幡 浩幸, 鋼の微視組織と脆性亀裂停止挙動の関係解明に向けたマルチスケール破壊力学モデル (第1報: モデルの提案), 鉄と鋼, 査読有, Vol. 102, No. 6, 2016, 347-355. DOI: 10.2355/tetsutohagane. TETSU-2015-114
- ④ 山本 悠貴, 柴沼 一樹, 柳本 史教, 鈴木 克幸, 栗飯原 周二, 白幡 浩幸, 鋼の微視組織と脆性亀裂停止挙動の関係解明に向けたマルチスケール破壊力学モデル (第2報: アレスト試験への適用) 鉄と鋼, 査読有, Vol. 102, No. 6, 2016, 356-364. DOI: 10.2355/tetsutohagane. TETSU-2015-115

[学会発表] (計7件)

- ① Y. Yamamoto\*, K. Shibanuma, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, Multiscale modeling to clarify the relationship between microstructures of steel and macroscopic brittle crack propagation/arrest behavior, ECF21 (The 21st European Conference on Fracture), Jun. 20-24, 2016, Catania, Italy.

- ② T. Henmi\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, Experimental and numerical investigation on relationship between grain size and arrest toughness in steels, ECF21 (The 21st European Conference on Fracture) Jun. 20-24, 2016, Catania, Italy.
- ③ 逸見 拓弘\*, 柴沼 一樹, 鈴木 克幸, 栗飯原 周二, 白幡 浩幸, 柳本 史教, 鋼の結晶粒径と亀裂停止特性との関係解明のための実験と数値解析 日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会, CAMP-ISIJ, Vol. 29, p. 775, 2016年9月, 豊中
- ④ 柴沼 一樹, 逸見 拓弘, 柳本 史教\*, 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 シンポジウム, 2016年9月, 豊中
- ⑤ S. Aihara, F. Yanagimoto\*, K. Shibanuma, T. Namegawa, H. Nakai, T. Kawabata, H. Yoshinari, Numerical simulation of brittle crack propagation incorporating toughness and residual stress distribution in welds, TWR & 9WS (10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society), Oct. 11-14, 2016, Tokyo, Japan.
- ⑥ T. Hemmi\*, K. Shibanuma, K. Suzuki, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata, Experimental and numerical investigation on relationship between grain size and arrest toughness in steels, ICF14 (14th International Conference on Fracture), Jun. 18-24, 2017, Rhodes, Greece.
- ⑦ 逸見 拓弘, 柴沼 一樹\*, 結晶粒間き裂連結時のエネルギー吸収機構と粒径の意義, 日本鉄鋼協会 シンポジウム, 2018年3月, 習志野

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴沼 一樹 (SHIBANUMA, Kazuki)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30611826

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし