

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760568

研究課題名(和文) 脆性き裂伝播抵抗予測のためのミクロスケールき裂伝播現象のモデル化

研究課題名(英文) Modeling of microscopic crack formation to predict crack propagation resistance

研究代表者

柴沼 一樹 (Shibanuma, Kazuki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30611826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：脆性破壊は突発的に発生し、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。本研究では、ミクロスケールでの脆性き裂伝播による破壊形態を詳細に把握するための系統的な実験・計測を行い、その微視的メカニズムを考慮して、へき開亀裂伝播を定量的に評価可能なモデルの構築を行った。まず、脆性破壊において形成されるへき開破面単位の温度依存性を明らかにし、形成形態を幾何学的に再現可能な数値モデルを構築した。また、亀裂の分岐現象に対して力学と材料組織学の知見を統合した数値モデルを構築した。実験との比較検証を行い、本モデルを用いることで分岐亀裂の発生可能性定量的に予測可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The prevention of brittle fracture is one of the most important considerations for structural integrity of steel structures because of the sudden and uncontrolled nature of such failures. In this study, we conducted systematic experiments and measurements to understand microscopic mechanism of brittle crack propagation. We then developed numerical models to quantitatively evaluate the crack propagation. First, we clarified temperature dependence of formulation of cleavage facets. In addition, we developed a numerical model to simulate geometries cleavage facets in a grain. Second, we developed numerical model of crack branching by unifying the knowledges of mechanics and metallography. Results of validation showed probability of crack branching initiation can be predicted by using the proposed model.

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：構造・機能材料

キーワード：脆性破壊 へき開破壊 鉄鋼材料 数値モデル 亀裂伝播抵抗 破面単位 亀裂分岐

1. 研究開始当初の背景

脆性破壊は突発的に発生し、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。これを防ぐためには、亀裂発生を防止するとともに、亀裂伝播を制御することが重要である。脆性亀裂伝播の制御に関しては、40年以上前から種々の研究が実施されてきたが、その多くは連続体力学に基づくマクロスケールの破壊力学をベースとするものであるため、これらの研究における亀裂伝播停止特性の評価はあくまで実験により得られた材料特性値として経験式で評価されるものである。したがって、脆性亀裂伝播防止に対する構造物の信頼性を評価するための設計基準は経験的・統計的な評価に基づくものであるのが現状である。

さらに、高強度鋼では、異方性(集合組織)の発生や、靱性評価試験における特異破面の形成など、従来の一般鋼では見られなかった現象が報告されている。このため、上記のような未だ経験したことのない高負荷条件下で使用される高強度材料に対しては、従来の評価方法で構造物の信頼性が十分に確保されているか大きな懸念が指摘されている。以上の問題を解決するためには、従来の一般鋼と高強度鋼の脆性亀裂伝播停止特性を統一かつ定量的に予測するための理論を構築する必要がある。

従来からマイクロ組織と脆性破壊には密接な相関があることが知られている。しかし、それらの関係はあくまで統計的・経験的な取り扱いにとどまっており、特に材料の亀裂伝播特性をマイクロ組織情報から定量的に評価するための理論的研究は遅れている。すなわち、マイクロ組織と脆性亀裂伝播特性の関係を解明するためには、ミクロスケールでの脆性亀裂の伝播挙動を理解することが必要である。

2. 研究の目的

構造物の信頼性に関わる重要な課題であるにも関わらず、脆性き裂伝播を定量的に予測するための理論的研究は遅れている。そこで、本研究では鉄鋼材料におけるミクロスケールでの脆性き裂伝播による破壊形態を詳細に把握するための実験・計測を行い、さらに多結晶体における脆性き裂伝播の微視的メカニズムを解明することで、脆性き裂伝播現象を定量的に評価することが可能なモデルの構築を行う。具体的には、(a)へき開破面単位の形成、(b)亀裂分岐の発生、を対象として、それぞれの現象を再現可能なモデルを構築することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(a) へき開破面単位の形成

まず、小型試験片を用いて試験温度を系統的に変化させた脆性亀裂伝播試験を実施する。得られた脆性破面に対して走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた3次元観察を実施し、

破面単位の計測を行う。さらに、電子後方散乱回折(EBSD)を用いて破面の鉛直方向断面の結晶方位を計測し、破面の形成形態と結晶方位の関係について詳細に観察する。

構造用鋼の主なフェライトなどの体心立方格子の結晶構造をもつ多結晶体は、{100}面をへき開面として破面を形成する。これを利用して結晶粒内部のへき開面形成を幾何学的に再現するモデル化を構築する。

(b) 亀裂分岐の発生

亀裂の分岐は力学的な因子のみでは説明が困難であることが知られる。そこで、異なる集合組織を有する鉄鋼材料からなる試験片を用いて分岐亀裂発生機構の解明を目的とした破壊試験を実施し、亀裂伝播経路の巨視的・微視的挙動に関して、SEMなどを利用した詳細な計測を実施する。

次に、これらの実験結果に基づき、伝播中の脆性亀裂先端近傍の応力場と材料の集合組織情報から分岐亀裂の発生を予測する数値モデルを構築する。

4. 研究成果

(a) へき開破面単位の形成

まず、フェライト鋼を対象に、単一の結晶粒内のへき開面の形成形態の温度依存性に着目した系統的な実験・計測を行った。

3点曲げ試験片を用いたへき開破壊試験により得られた破面に対してSEM観察による破面単位の計測を行った。その結果、へき開破壊の破面単位は試験温度に依存し、その大きさは低温ほど相対的に細くなる傾向が示された(Fig.1およびFig.2)。

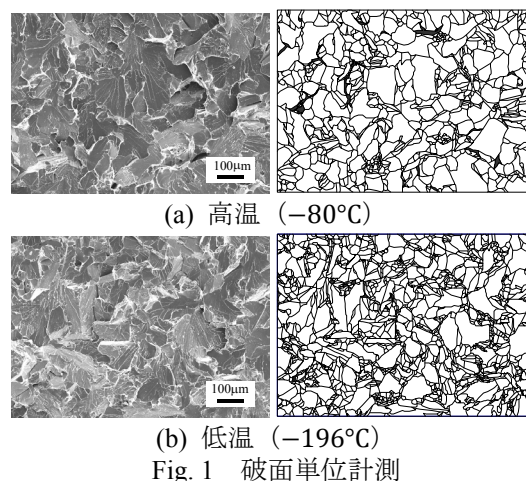


Fig.1 破面単位計測

さらに、へき開破壊における破面単位の形成される形態を詳細に調査するために、破面の鉛直断面を切出し、EBSD法を用いて破面直下の結晶粒の結晶方位を計測し、へき開面の形成と{100}面トレースとの比較を行った。その結果、試験温度が高温の場合では、従来知見の通り、多くの結晶粒が破面単位と1対1で対応していることが示された。一方、試験温度が低温の場合では、多くの結晶粒が複

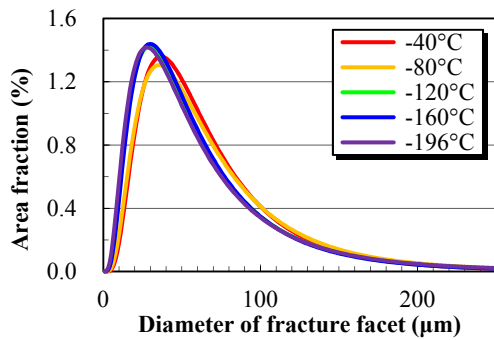
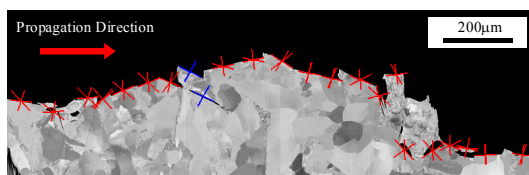
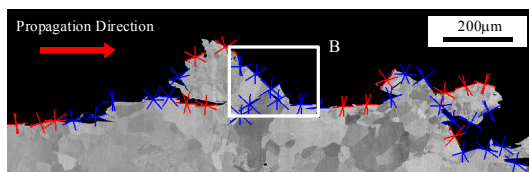


Fig. 2 へき開破面単位の温度依存性

数の破面単位に複雑に分割されることが明らかとなった. (Fig. 3)



(a) 高温 (-80°C)



(b) 低温 (-196°C)

(※: 単一のへき開面, ※: 複数のへき開面)

Fig. 3 へき開破面の{100}面トレース

1 個の結晶粒が複数のへき開面に分割される場合には, (i) 直角に交差する場合, (ii) 平行な段状となる場合, の2通りがあることが判明した. ただし, (ii) へき開面が平行な段状となる場合は, 多くの場合で埋没き裂として存在し, 低温における破面単位数の増加は, (i) へき開面が直角に交差する場合による寄与が大きいことが明らかとなった.

従来, 破面単位は有効結晶粒として取り扱い, 細分化するほど靱性が向上する指標であるとされた. 一方, 本研究で明らかとなった試験温度が低温の場合に破面単位が増加する現象は, これとは本質的に異なり, へき開破壊の粒界突破の限界条件となる局所的なアレスト靱性値が低下した結果であると考えられる.

次に, 破面形成を評価する着目結晶粒とそれに隣接する結晶粒を含む局所領域を定義し, 粒界突破条件として限界破壊応力説に基づく局所アレスト靱性を仮定して, 結晶粒内部のへき開面形成を幾何学的に再現する数値モデルを構築した. 本モデルでは3個の立方体の結晶粒に対し結晶方位を乱数で与え, 破面の形成パターンにより破面単位の評価法を定義した (Fig. 4). また, 限界破壊応力説を仮定した場合, Griffith の条件より限界破

壊応力には温度依存性が存在すると考えることができる (Fig. 5). したがって, 限界破壊応力と直接的に対応し, 粒界突破条件を定義する局所アレスト靱性も温度依存性を有すると考えるのが妥当である.

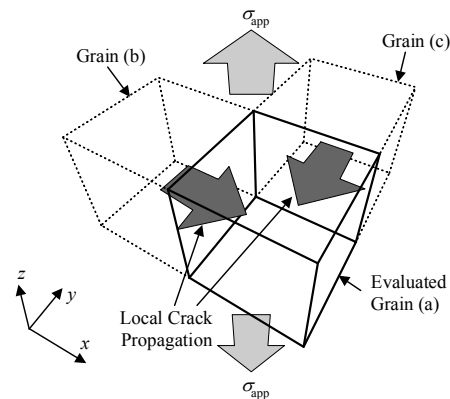


Fig. 4 結晶粒のモデル化

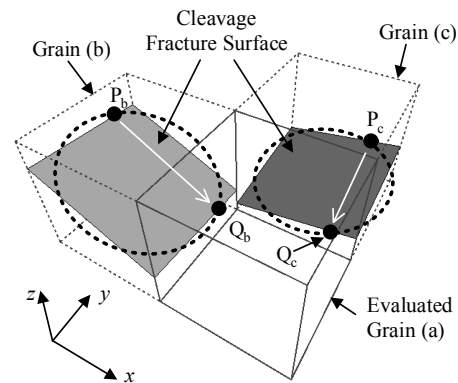


Fig. 5 結晶粒内のへき開面と伝播条件のモデル化

すべての結晶粒に対して同一の代表結晶粒径を仮定した計算の結果, 温度依存性を有する局所アレスト靱性が十分に小さい場合, 約 20%の結晶粒で1個の結晶粒が2個の破面単位に分割された. さらに, 局所アレスト靱性の増加に伴い, 分割の比率が低下し, ある値以上では結晶粒と破面単位が1対1に対応する結果となった.

モデルに実際の結晶粒径の分布を導入することで, 供試鋼の破面形成シミュレーションを実施した. その結果, 破面単位の円相当径の最大値は局所アレスト靱性の影響を受けないものの, 局所アレスト靱性が小さいほど, 結晶粒の内部において複数の破面単位が形成される割合が高くなり, 形成される破面単位はより小さくなる傾向が得られた. 本モデルにおいて局所アレスト靱性を変化させることにより, 実験において試験温度が破面単位に与える影響と同様の傾向を再現することができた (Fig. 6).

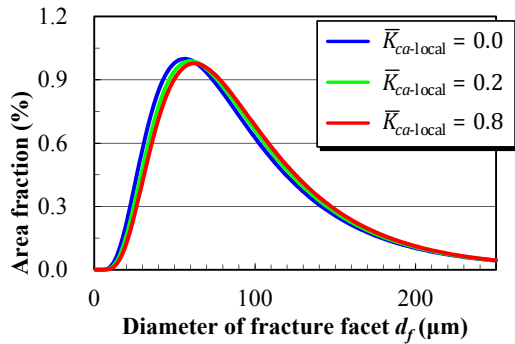
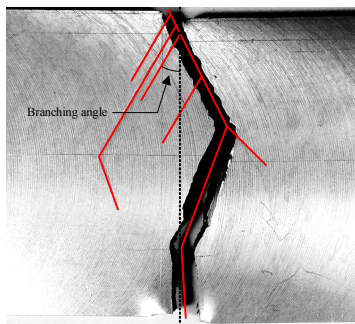


Fig. 6 破面単位における局所アレスト靱性の依存性

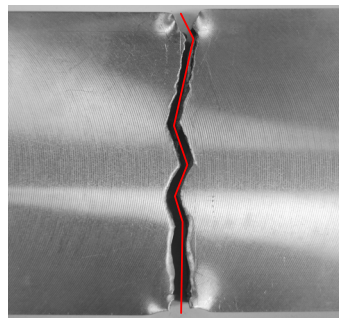
(b) 亀裂分岐の発生

鋼板中を伝播する脆性亀裂の分岐現象に着目し、実験から得られた知見から、分岐亀裂の発生可能性を評価する数値モデルを構築した。

まず、異なる集合組織（結晶の異方性）を有する複数の鋼を用いて分岐亀裂の発生を狙った3点曲げ試験を行い、材料の集合組織、亀裂伝播方向および温度が巨視的な分岐亀裂の発生に影響することを確認した (Fig. 7)。



(a) Steel A (強異方性), 低温 (-196°C)



(b) Steel B (弱異方性), 高温 (-60°C)

Fig. 7 材料の集合組織および温度が分岐亀裂の発生に与える影響

さらに、SEMを用いた詳細な破面観察によって、巨視的な分岐亀裂は結晶粒単位の微小分岐亀裂（結晶粒数個単位の破面の潜り込み）に起因することを明らかとした (Fig. 8)。微小分岐亀裂が主亀裂の伝播方向とは異なる方向に伝播して破面を形成し、材料の表面に達することで、マクロに観察される分岐亀裂となる。

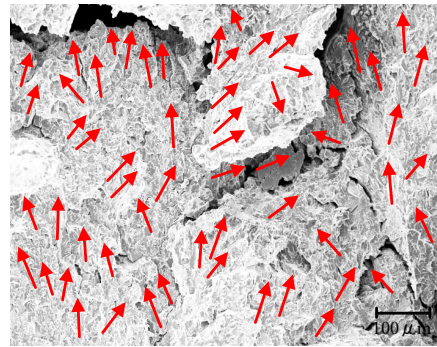


Fig. 8 巨視的亀裂分岐時に観察される破面の潜り込み

上記の知見に基づいた上で、微小分岐亀裂は亀裂先端の結晶粒のへき開面伝播方向が2方向に集中することで形成されると仮定し、分岐亀裂の発生可能性を評価する数値モデルを構築した (Fig. 9)。本モデルは、BCC構造を有する結晶粒において{100}面がへき開面として選択される事実から、亀裂先端に存在する結晶粒のへき開面伝播方向の分布を再現し、伝播中の亀裂の分岐亀裂発生可能性を評価するものである。

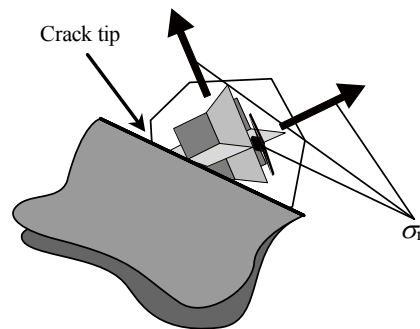


Fig. 9 亀裂分岐を評価するためのミクロスケール脆性亀裂伝播モデル

上記の3点曲げ試験の結果を用いて、本モデルの妥当性を検証したところ、集合組織強度の高い材料については、分岐亀裂の発生可能性を評価することができると確認された (Fig. 10)。

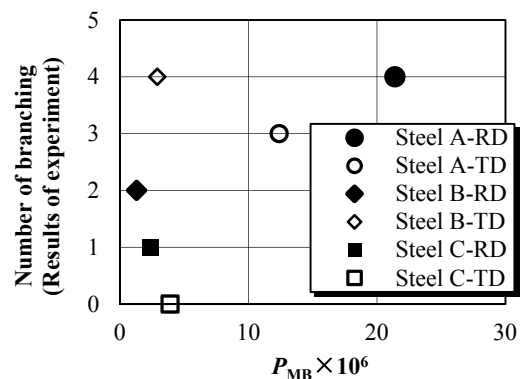


Fig. 10 集合組織強度と亀裂分岐発生数の相関

分岐亀裂の生じやすい結晶方位分布を持つ材料に対しては、結晶粒のへき開面伝播方向分布のヒストグラムの近似関数 $f(\theta)$ が極大値を示す θ を用いることで、発生後の分岐亀裂の伝播方向も予測可能であることが示唆された (Fig. 11).

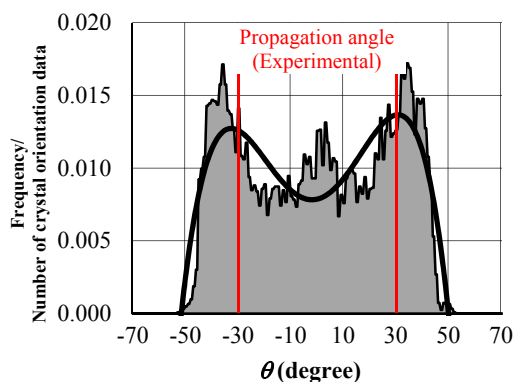


Fig. 11 へき開面伝播方向分布の計算結果と分岐亀裂伝播方向の実験結果との比較

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 3 件)

- ① 川田 樹, 柴沼 一樹, 川畑友弥, 栗飯原周二, 鋼材の脆性亀裂分岐に及ぼす結晶異方性の影響に関する実験と数値解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 2014, accepted, (査読有) .
- ② 柴沼 一樹, 栗飯原 周二, フェライト結晶粒内のへき開面形成シミュレーション, 鉄と鋼, Vol.98, pp.190-196, 2012, (査読有) .
- ③ 柴沼 一樹, 栗飯原 周二, フェライト鋼におけるへき開破面単位の温度依存性, 鉄と鋼, Vol.98, pp.184-189, 2012, (査読有) .

[学会発表] (計 4 件)

- ① 川田 樹, 柴沼 一樹, 栗飯原 周二, 鋼の結晶方位の異方性に着目した脆性亀裂分岐の発生の評価, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2013 年 11 月 21 日, 大阪.
- ② 川田 樹, 柴沼 一樹, 栗飯原 周二, 鋼の脆性亀裂分岐に及ぼす結晶異方性の影響に関する実験と数値解析, 日本鉄鋼協会 第 166 回秋季講演大会, 2013 年 9 月 18 日, 金沢.
- ③ I. Kawata, S. Aihara, T. Kawabata, K. Shibamura, Analysis of effects of steel texture on cleavage crack branching, The 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Jul. 1, 2013, Anchorage, USA.
- ④ 柴沼一樹, 栗飯原周二, フェライト鋼のへき開破面単位の温度依存性とそのモデル化, 日本鉄鋼協会シンポジウム「構

造材料のマイクロ組織と破壊特性」, 2012 年 9 月 17 日, 松山.

[その他]

ホームページ等

<http://www.struct.t.u-tokyo.ac.jp/shibanuma/>

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・講師

研究者番号 : 30611826

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし