

## 論文の内容の要旨

論文題目 ベイナイト鋼におけるへき開脆性破壊発生現象の数値モデル構築

氏 名 川田 樹

### 1. 概要

鋼構造物の大型化に伴う鋼材への強度要求を満たすため、近年ではベイナイト鋼が広く用いられている。しかしながら、ベイナイト鋼におけるへき開脆性破壊発生現象については未だ明らかになっていない点が多い。特に、微視組織と靱性の関係を記述する理論が確立していないことが問題である。したがって、ベイナイト鋼の安全性の評価は破壊靱性試験に頼らざるを得ず、材料開発において靱性要求を満たすために多くの手戻りが発生する。微視組織情報に基づくベイナイト鋼の破壊靱性予測モデルを構築することで、どのような微視組織であれば靱性を担保できるかを事前に推定することができ、材料開発を効率化することができる。そこで本研究では、鉄鋼材料のへき開脆性破壊の破壊確率モデルにおいて従来広く用いられてきたMulti barrierモデルの概念に基づき、ベイナイト鋼におけるへき開脆性破壊の発生現象を再現する数値モデルを構築した。本研究では、ベイナイト鋼におけるへき開脆性破壊の発生過程を以下の3つのStageで記述する。

- |            |                     |
|------------|---------------------|
| Stage I.   | 低炭素ベイナイト内の粗大MA割れ    |
| Stage II.  | MA割れの低炭素ベイナイト内への伝播  |
| Stage III. | 低炭素ベイナイト割れの隣接組織への伝播 |

本研究では数値モデルの構築に先立ち、Stage IIの定式化と、Stage IIIにおいて用いる材料定数である $\gamma_{mm}$ について再検討を行った。

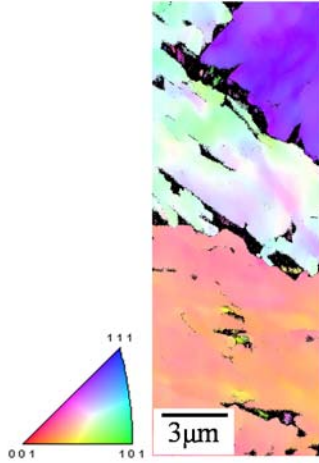


Fig. 1 Estimation of dislocation pile-up in bainite steel by EBSD analysis.

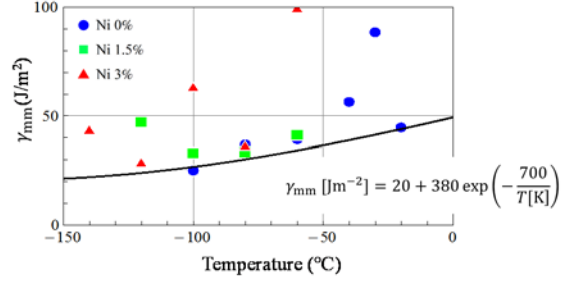


Fig. 2 Temperature dependence of  $\gamma_{mm}$  proposed in the present study.

## 2. Stage IIの定式化

Petch[1]は、フェライト-セメンタイト鋼におけるセメンタイト割れの限界応力について、隣接フェライトに堆積した転位のなだれ込みによる割れの駆動力増加を考慮した定式化を行った。著者は変形後のベイナイト鋼に対するEBSD解析 (Fig.1) によって、ベイナイト組織中のMAにも転位の堆積が生じていることを確認した。したがって、ベイナイト鋼のMA割れの伝播にも転位のなだれ込みが影響すると思われるが、Petchが提案した式はHall-Petch則を前提としており、Hall-Petch則が成立しないベイナイト鋼にこれを適用することはできない。そこで、Petchの式をHall-Petch則を用いない形に修正し、ベイナイト鋼のMA割れの伝播条件に適用可能とした。著者が新たに定式化した式を次式に示す。

$$\sigma_f = \begin{cases} \frac{2E\gamma_{pm}}{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)(1 - \nu^2)(\tau_a - \tau_0)s}, & (t < c_c) \\ \sqrt{\frac{4E\gamma_{pm}}{\pi(1 - \nu^2)t} - \frac{s^2(\tau_a - \tau_0)^2}{2\pi^2 t^2} - \frac{s(\tau_a - \tau_0)}{\sqrt{2}\pi t}}, & (t \geq c_c) \end{cases} \quad (1)$$

$$c_c = \frac{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)(1 - \nu^2)s^2(\tau_a - \tau_0)^2}{2\pi E\gamma_{pm}} \quad (2)$$

ここで、 $E$ はヤング率、 $\nu$ はポアソン比、 $t$ はMA割れ寸法、 $s$ はすべり線長さ、 $\tau_a$ はすべり線に作用するせん断応力、 $\tau_0$ は転位の摩擦応力、 $\gamma_{pm}$ は有効表面エネルギーである。

上記のパラメーターのうち、 $\gamma_{pm}$ は理論的な推定が困難なパラメーターである。そこ

で、著者はすべり線長さに相当するMA間距離の異なる2種類のベイナイト鋼を用いた破壊靱性試験結果から構築した尤度関数を最大化することで、 $\gamma_{pm}$ を推定した。推定の結果、 $\gamma_{pm} = 35\text{J/m}^2$ という値が得られた。

### 3. $\gamma_{mm}$ の実験的評価

従来の破壊確率モデルでは、Stage IIIの限界破壊応力の算出に次式に示すGriffith-Irwin-Orowanの条件[2]を用いている。

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_{mm}}{2(1-\nu^2)a}} \quad (3)$$

ここで、 $a$ は亀裂の半径である。しかし、有効表面エネルギー $\gamma_{mm}$ は弾塑性変形に伴う様々な影響を含んでおり、理論的な推定は極めて困難であるため、先行研究では実験的な推定が試みられてきた。しかし、計測精度や局所応力の推定に用いた有限要素解析の精度の点から、これらの研究で提案された値は再検討の余地が十分にある。また、Niの添加が鉄鋼材料の靱性を向上させることが従来指摘されてきたが、従来研究ではその原因としてNiの添加による降伏応力の温度・ひずみ速度依存性の低下を挙げており、 $\gamma_{mm}$ の点から考慮された研究はない。そこで、 $\gamma_{mm}$ について材料設計から配慮した精度の高い推定を行うとともに、Ni添加量の異なる材料を用いることでNiが $\gamma_{mm}$ に与える影響を調査した。

本研究では、 $\gamma_{mm}$ を局所破壊応力から推定する際の精度を向上させるため、長時間の球状化処理によってセメンタイトを粗大化し、Stage IIIがボトルネックプロセスとなるように配慮したフェライト-セメンタイト鋼を用いた。推定の結果、Niは $\gamma_{mm}$ に影響を与えないことが示唆され、 $\gamma_{mm}$ はFig. 2に示す温度依存性を有すると結論した。

### 4. 数値モデルの構築と妥当性の検証

2章と3章の研究で得た結果を1章で示したMulti barrierモデルに組み込むことで、ベイナイト鋼を対象とした破壊確率モデルを構築した。また、構築した数値モデルを用いて、4種のベイナイト鋼を用いた破壊靱性試験の再現解析を行い、妥当性の検証を行った。Fig. 3に結果の一例を示す。数値モデルの計算結果と破壊靱性試験によって得られた破壊靱性値分布は、温度依存性の傾向・同一温度内でのばらつきについて良好な一致を示しており、本研究で構築した数値モデルの妥当性が確認された。

また、入力する材料の微視組織情報を変えることでパラメトリックスタディを行い、各微視組織因子が靱性分布に与える影響を調査した。解析では、計測結果に基づき、平均MA間距離 $\bar{s}$ とMAの個数密度 $\rho_{MA}$ が次式に示す関係にあると仮定した。

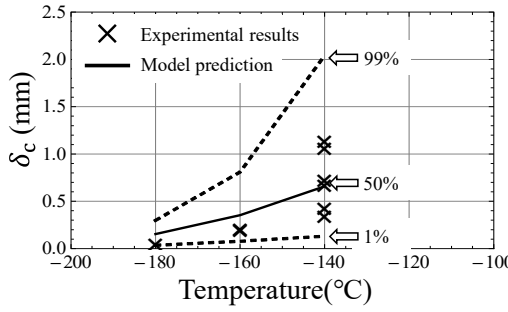


Fig. 3 Comparison of experimental results and model prediction.

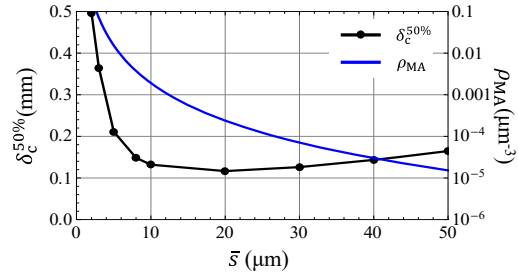


Fig. 4 Transition of fracture toughness accompanying change of  $\bar{s}$ .

$$\rho_{MA} = \frac{3\pi}{4} \left(\frac{\bar{s}}{2}\right)^3 \quad (5)$$

解析の結果をFig. 4に示す.  $\bar{s}$ が小さな場合には $\bar{s}$ の減少に伴って靱性が向上していくが,  $\bar{s}$ が大きな場合にはすべり線長さの増加に伴って靱性が向上していく. したがって, MAを非常に密に分布させるか, 非常に疎に分布させるかのどちらかの手法が, 靱性を向上させるために有用であるということが示唆された.

## 5. 数値モデルの構築と妥当性の検証

本研究の結論を以下に示す.

- ベイナイト鋼におけるMA割れを対象として, 転位堆積による割れの駆動力の増加を考慮した限界破壊応力の定式化を行った.
- Stage IIIの有効表面エネルギー $\gamma_{mm}$ を, 計測に適した供試鋼の導入によって推定した. また, Ni添加量の異なる材料を用いることで,  $\gamma_{mm}$ にNiの影響は認められないことを確認した.
- 以上の研究結果を用いて, ベイナイト鋼のへき開脆性破壊の発生を再現する数値モデルを構築した.
- 構築した数値モデルによって実際のベイナイト鋼の破壊靱性試験の再現解析を行い, 数値モデルの妥当性を確認した.
- 構築した数値モデルによってパラメトリックスタディを行い, 微視組織因子と破壊靱性の関係を定量的に評価した.

## 参考文献

- [1] Petch N. Acta Metallurgica 1986; 34: 1387-1393.  
 [2] Griffith A. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1921; 221 A: 163-198.