

フェライト・パーライト鋼のへき開破壊靱性予測モデルの構築

Development of Numerical Model to Predict Cleavage Fracture Toughness of Ferrite-Pearlite Steels

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 37-126339 平出 隆志
指導教員 栗飯原 周二 教授

キーワード：へき開破壊，破壊靱性，鉄鋼材料，数値モデル，シミュレーション

1. 序論

鉄鋼材料は最も広く用いられる構造材料の一つである。近年，使用環境の過酷化によって，降伏応力に代表される強度レベルと共に，材料の破壊発生抵抗である「靱性」を向上させる重要性が高まっている。特に，材料のへき開破壊は突発的に発生し，その後脆性破壊による不安定的なき裂伝播を生じることから，確実に防止する必要がある。このため，材料のへき開靱性を精度よく推定・評価することは，材料の開発や使用において極めて重要な課題である。

靱性は結晶粒や脆化相寸法の微細化により向上することが知られているが，それはあくまで経験的な知見によるものであり[1]，マイクロ組織が靱性に及ぼす影響を解明する確固たる理論は存在しない。これは，へき開破壊はマイクロ組織内の最も弱い要素が破壊を左右する最弱支配型の現象であり，大きなばらつきを生じることが主な要因であると考えられる。

これに対し，柴沼らはフェライト・セメンタイト鋼を対象として微視的な破壊機構に基づき，へき開破壊の靱性を予測可能なモデルを提案した[2]。このモデルにより，マイクロ組織と破壊靱性値の関係を定量的に予測可能であることが示された。しかし，このモデルは，対象が単純なマイクロ組織有する鋼のみに限定されており，実用鋼を含め，より複雑なマイクロ組織を有する鋼に対しての適用が大きな課題であった。

そこで，本研究は構造用鋼として広く用いるフ

ェライト・パーライト鋼を対象として，そのへき開破壊靱性の定量的な予測およびマイクロ組織と破壊靱性値の関係を評価することが可能な，へき開靱性予測モデルの構築を行うことを目的とする。

2. 従来研究

フェライト・セメンタイト鋼を対象とした従来のモデルでは，へき開破壊を，**Fig.1**に示すように (I) セメンタイト割れによるき裂核生成，(II) セメンタイト割れのフェライト粒への伝播によるへき開き裂形成，(III) へき開き裂のフェライト結晶粒境界突破，の3段階微視的な破壊機構に分割し，全てが満足された場合に巨視的なへき開破壊が発生すると仮定している。

また，フェライト・パーライト鋼のへき開破壊におけるき裂発生機構は Miller and Smith[3]によって提案されている。模式図を **Fig.2**に示す。負荷過程においてパーライト内部のフェライトですべりが発生することで生じた応力集中によりパーライト内のセメンタイトが割れ，複数の割れがフェライトのせん断を促進し，パーライトを横断するように合体して形成されると提案されている。

本研究では，この先行研究も踏まえ，フェライト・パーライト鋼のへき開破壊機構をモデル化し，各破壊機構に条件式を決定する。

3. へき開破壊における微視的機構の観察

へき開破壊に発生直前の微視的な挙動をより詳細に観察するために，2つの切欠きを有する試験片を作製し，3点曲げ試験を実施した。供試鋼には市販の JIS SM490A 鋼を用いた。破壊が発生しなかつ

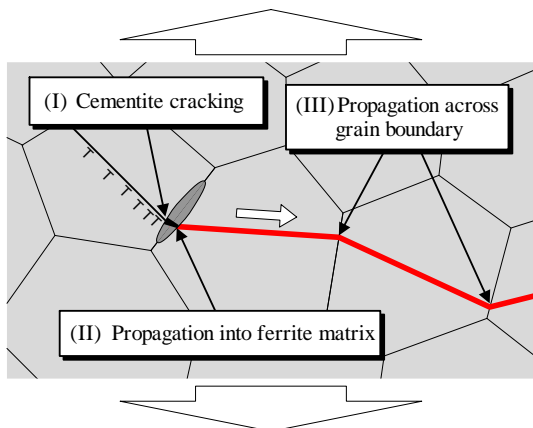


Fig.1 Process of cleavage fracture initiation in ferrite - cementite steel

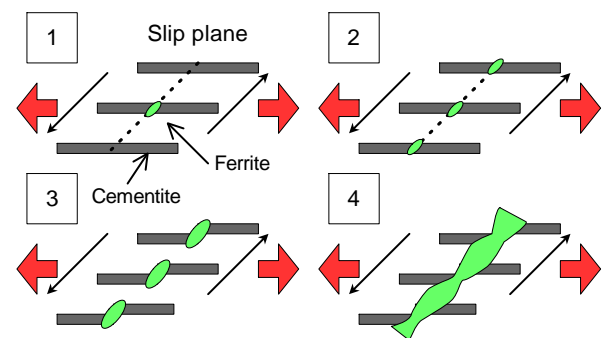


Fig.2 Shear cracking process inside pearlite

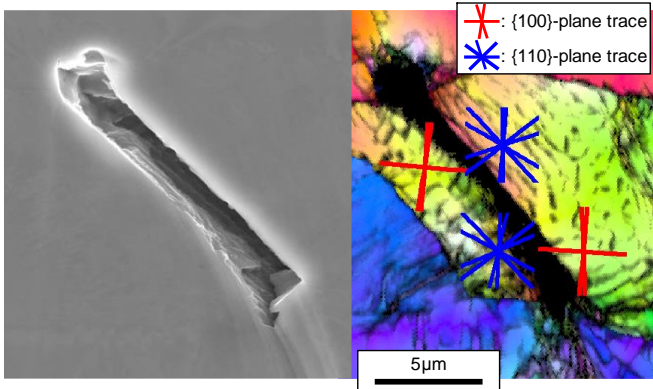


Fig.3 Paerlite crack and trace

た切欠き底近傍を SEM 等で観察した。観察の結果、切欠き底近傍のパーライト内部に数 $\mu\sim$ 十数 μm 程度の Fig.3 左に示すようなき裂および数 nm の欠陥が確認された。

また、EBSD によってき裂周辺のパーライト内部フェライトの結晶方位を測定し、トレース解析を行った。フェライトのへき開面として{100}面、すべり面として{110}面についてそれぞれトレース解析を行った結果、き裂は Fig.3 右に示されているようにすべり面に沿って進展していることが明らかとなった。さらに、き裂表面の凹凸形状より、き裂はパーライト内のフェライトがすべるにより成長し、パーライト横断するき裂を形成することが確認された。これらパーライトき裂は隣接するフェライト粒との界面で停止していたが、巨視的なへき開破壊に至るにはパーライトき裂がフェライト粒に伝播する過程が必要であると考えられる。以上の考察より、フェライト・パーライト鋼のへき開破壊直前には、以下の4段階の微視的機構が存在すると仮定した。模式図を Fig.4 に示す。

Stage-I:パーライト内セメンタイトの割れ

Stage-II:パーライト内でパーライトき裂形成

Stage-III:パーライトき裂のフェライト粒への伝播

Stage-IV:伝播したき裂のフェライト粒界突破

4段階の微視的な破壊機構が全て満足された場合に巨視的なへき開破壊が発生すると仮定した。

4. パーライトき裂発生確率の定量化

パーライトき裂の形成に及ぼす因子の影響を定量化するために、マイクロ組織を系統的に変化させた供試鋼を作製し、円周切欠き付き丸棒引張試験片を用いて途中徐荷試験を実施した。供試鋼は炭素量および熱処理条件を変えることで、フェライトおよびパーライトの寸法を系統的に変化させた3鋼種とした。

徐荷試験後の試験片に光学顕微鏡観察を実施して、観察領域における全パーライト数およびき裂が存在するパーライトの数を計測した。これを弾塑性 FEM 解析によって得られた相当塑性ひずみに対する、き裂が発生するパーライト個数の割合

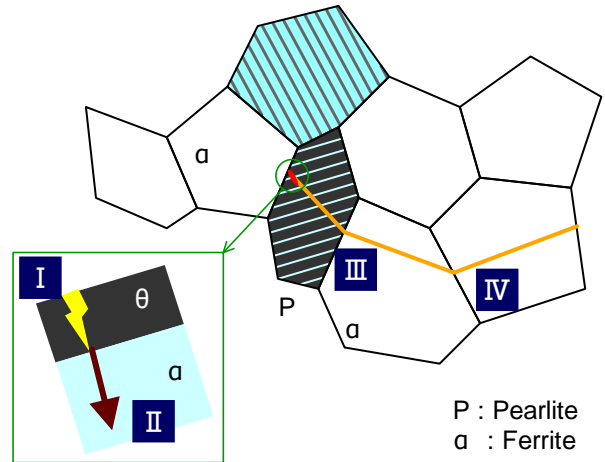


Fig.4 Process of cleavage fracture initiation in ferrite - pearlite steel

として整理した。その結果を Fig.5 に示す。

この結果に基づいて、次式に示すようなパーライトき裂の発生確率 P_p を近似によって定義した。

$$P_p = 1 - \exp(-C\varepsilon_p^2) \quad [1]$$

ここで ε_p は相当塑性ひずみ、 C はフィッティング・パラメータであり、本研究では $C=0.168$ である。

5. へき開破壊靱性予測モデルの構築

5.1 破壊条件の定式化

Stage-I および II ではパーライト内のき裂発生確率を上記の式[1]で定義する。

Stage-III では、パーライトき裂がフェライト粒に伝播する過程の限界条件を、局所破壊応力 $\sigma_{FP\alpha}$ を用いて次式によって定義する。

$$\sigma_n \geq \sigma_{FP\alpha} \quad [2]$$

$\sigma_{FP\alpha}$ は直径 L の円形き裂に対する Griffith の条件により以下のように与えた。

$$\sigma_{FP\alpha} = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_{P\alpha}}{(1-\nu^2)L}} \quad [3]$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 $\gamma_{P\alpha}$ はパーライトを横断したき裂がフェライト粒との界面を突破する際の有効表面エネルギーである。一方、式[2]の σ_n は最大主応力を用いることとした。

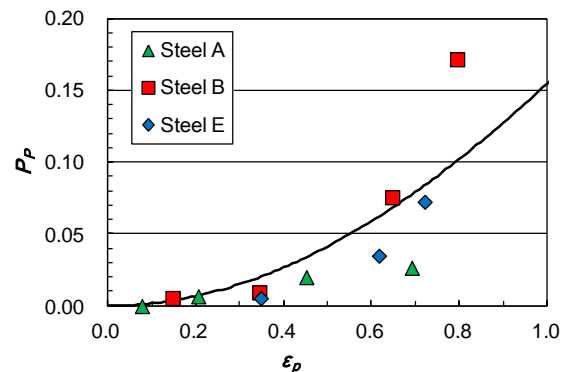


Fig.5 Pearlite cracking probability

Stage-IV では、フェライト粒界をき裂が突破する過程の限界条件は、局所破壊応力 $\sigma_{F\alpha\alpha}$ を用いて次式によって定義する。

$$\sigma_n \geq \sigma_{F\alpha\alpha} \quad [4]$$

$\sigma_{F\alpha\alpha}$ についても直径 D の円形き裂に対する Griffith の条件により以下のように与えた。

$$\sigma_{FP\alpha} = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_{\alpha\alpha}}{(1-\nu^2)D}} \quad [5]$$

ここで、 $\gamma_{\alpha\alpha}$ はフェライト粒を横断したへき開き裂が粒界を突破する際の有効表面エネルギーである。

一方、式[4]の σ_n は{100}面に作用する垂直応力の最大値であり、次式で算出できる。

$$\sigma_n = \max_{m=1,2,3} [(n_m)^T \cdot \sigma \cdot n_m] \quad [6]$$

ここで、 n_m は m 番目($m=1 \sim 3$)の{100}面の法線ベクトルであり、 σ は作用応力テンソルである。

5.2 計算の手順

前述の3つの破壊条件式に基づき、へき開破壊の発生を推定する数値モデルの計算手順を示す。

- へき開破壊が発生する可能性があるアクティブゾーンの定義
- 体積要素によるアクティブゾーンの分割
- 各体積要素におけるフェライト粒およびパーライトコロニーの割り当て(Fig.6)
- マクロスケール弾塑性 FEM 解析による応力テンソル・塑性ひずみ分布および破壊靱性指標の推移の算出
- へき開破壊発生を評価するタイムステップの増分の定義
- 各体積要素における3つの破壊条件式の判定および破壊靱性値の算出

6. 破壊靱性試験の再現解析

切欠き付き3点曲げ試験を用いたへき開破壊試験を対象として、破壊靱性値の試験結果との比較

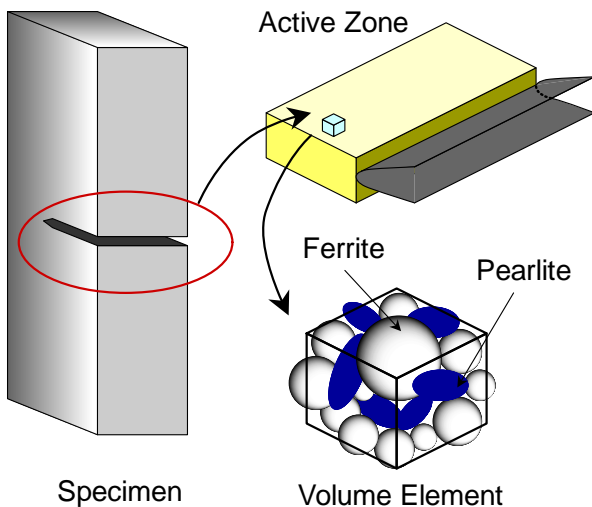


Fig. 6 Schematic image of active zone and volume element

を行い、提案した数値モデルの妥当性を検証する。さらに、数値計算結果を用いてへき開破壊の発生靱性に関する各種因子の評価を行う。

6.1 供試鋼

4章で作製されたフェライト・パーライト鋼を対象とした。Table 1に各供試鋼のフェライト粒径およびパーライト寸法の代表値を示す。

Table 1 Representative values of ferrite grain size and pearlite particle thickness

Steel		A	B	E
Ferrite grain diameter [μm]	Max	88.6	132.8	76.5
	Average	21.3	32.6	15.2
Pearlite particle thickness [μm]	Max	37.5	31.0	28.0
	Average	8.43	9.98	6.76

6.2 試験方法

各供試鋼を Fig.7 に示す切欠き付き3点曲げ試験片に加工し、 $-120^\circ\text{C} \sim -180^\circ\text{C}$ の範囲で試験を実施した。

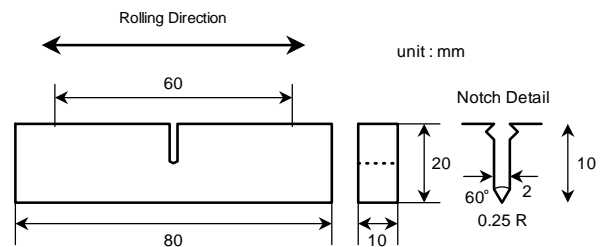


Fig. 6.1 Configuration of 3-point bending specimen

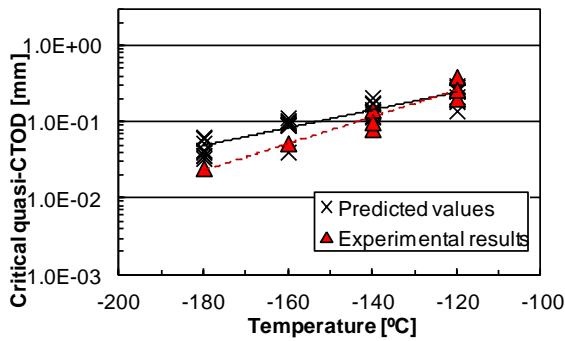
また、破壊靱性指標には次式に示す限界準CTOD値を用いた[4]。

$$\delta_c = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_Y E} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a} \quad [7]$$

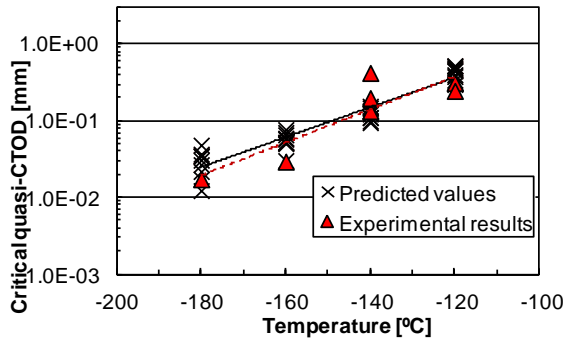
6.3 数値モデルの設定条件

5.2節で示された手順に沿って条件を述べる。

- アクティブゾーンは試験片切欠き底から幅方向1.0mm、軸方向1.0mm、厚さ方向に表面側1.0mmずつ除いた8.0mmの領域とした。
- 体積要素のサイズは1辺が0.05mmの立方体とした。アクティブゾーンにおける全体積要素数は64,000個となる。
- フェライト粒径およびパーライト寸法分布は実測値を観察された寸法の最大値を考慮した分布関数に近似した後、その値を用いた。
- マクロスケール弾塑性 FEM 解析は SIMULIA 製汎用ソフトウェア ABAQUS を用いて実施した。入力する任意温度での真応力-真ひずみ曲線データは、事前に実施した各供試鋼3温度で実施した引張試験の結果を Swift の式を仮定した内挿によって算出した。



(a) Steel A



(b) Steel B

Fig.8 Comparison between experimental results and predicted values of critical quasi-CTOD

- タイムステップは強制変位を 100 等分することとした。
各供試鋼各試験温度で 10 回ずつ計算を試行した。

6.4 数値モデルの妥当性検証

Fig.8 に供試鋼 A および B の限界準 CTOD 値の実験値と本モデルによる予測値を示す。本モデルによって各試験温度の破壊靱性値を精度よく予測可能である。また、試験温度の低下に伴う破壊靱性値の減少や、微細な粒径分布を有する組織の方が靱性が高くなる現象が再現されている。

各鋼種において、Stage-III および Stage-IV においてアレストしたき裂数の計算結果を **Fig.9** に示す。

Stage-III でアレストしたき裂の数は Stage-IV に比べ圧倒的に多い。したがって、この破壊機構におけるボトルネック・プロセスは Stage-III : パーライトき裂のフェライト粒への伝播であると言える。また、パーライト寸法がより小さい材料ほど Stage-III でアレストしたき裂が増加しており、靱性に対するパーライト寸法の影響を示唆している。

7. 結論

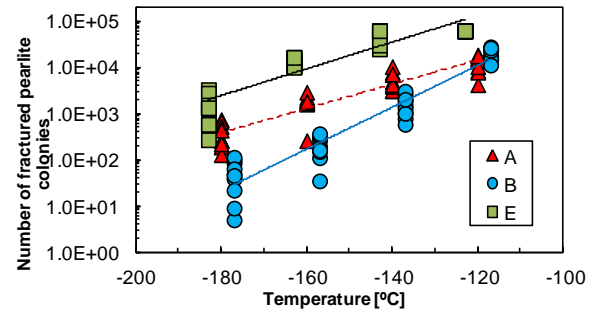
本研究では、実用鋼として広く用いられるフェライト・パーライト鋼のへき開破壊靱性を定量的に予測可能なモデルの構築を行った。

まず、詳細なマイクロき裂観察に基づき、以下の4段階の微視的な破壊機構を仮定した。

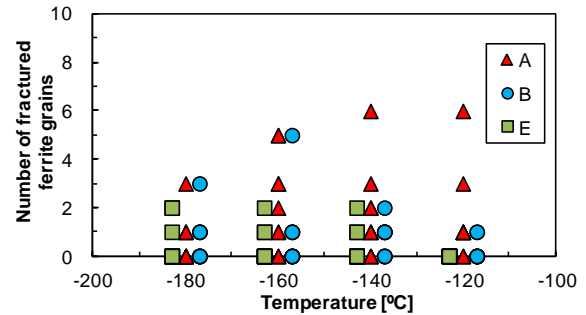
Stage-I: パーライト内セメンタイトの割れ

Stage-II: パーライト内でパーライトき裂形成

Stage-III: パーライトき裂のフェライト粒への伝播



(a) at Stage-III



(b) at Stage-IV

Fig.9 Number of arrested cracks

Stage-IV: 伝播したき裂のフェライト粒境界突破

ここで特に、Stage-I・IIの限界条件として、途中徐荷試験により、塑性ひずみの増加に伴うパーライトき裂の発生確率を定量化した。

モデルでは、破壊が発生する可能性のある領域を体積要素で離散化し、各体積要素においてマクロスケール弾塑性FEM解析から得られたタイムステップ毎に応力-塑性ひずみ状態を与え、破壊判定を行った。

提案したモデルを切欠き付き3点曲げ試験片を用いたへき開破壊試験に適用し、その妥当性検証を行った。破壊靱性値の試験結果とモデルによる予測値の比較の結果、供試鋼に対して各試験温度の破壊靱性を高精度かつ定量的に予測可能であることが示された。本モデルによりマイクロ組織の粒径分布、試験温度が破壊靱性に与える影響を定量的に評価可能であることが示された。

以上の結果より、本研究で提案したフェライト・パーライト鋼のへき開破壊靱性予測モデルは、材料のマイクロ組織と応力-ひずみ曲線のみを用いてへき開破壊靱性を定量的かつ高精度に予測可能であり、その有用性が示された。

参考文献

- [1] W.C.Leslie, (幸田成康 監訳, 熊井浩, 野田龍彦 訳): レスリー鉄鋼材料学, 丸善, 1985.
- [2] 柴沼 一樹, 栗飯原 周二, 松原 基行, 白幡 浩幸, 半田 恒久, フェライト鋼へき開破壊靱性予測モデルの構築, 鉄と鋼, Vol.99, No.1, pp.40-49, 2013.
- [3] L.E. Miller, G.C. Smith, Tensile fracture in carbon steels, J Iron Steel Inst., Vol.208, pp.998-1005, 1970.
- [4] BS 7448: Part 1, Fracture mechanics toughness tests, Part 1, Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials, British Standard Institution, 1991.