

鉄鋼材料の微視組織情報に基づく脆性破壊および 疲労損傷に対する性能予測モデルの開発

37-156351 根本義規
指導教員 柴沼一樹 准教授

I. 研究背景・目的

新たな材料開発の契機として、構造材料の代表格ともされる鉄鋼材料に関して、微視組織情報に基づく性能予測が期待されている。特に脆性破壊と疲労損傷は大きな事故を度々引き起こし、材料においてもその性能は非常に重要であるとされる。しかし、基盤材料として広く用いられるフェライト・パーライト鋼に対しても、それらの性能を高い精度で予測できるような理論モデルは未だ存在していない。

本研究では、実用鋼として最も広く用いられるフェライト・パーライト鋼を対象として、従来不可能であった微視組織因子と脆性破壊および疲労損傷に対する材料の性能である靱性および疲労寿命を予測するモデルを開発することを目的とする。脆性破壊と疲労損傷は全く異なる破壊・損傷形態であるが、本研究ではマルチスケールの「モデル統合化」というコンセプトのもとで独立にモデル開発を行う。具体的には、それらのマルチスケールに渡る複雑な現象の支配因子を抽出し、各々を単純化した上で統合化することで全体の力学現象を再現する、合理的かつ新たなモデルを提案する。

II. 脆性破壊靱性予測モデルの開発

1. 微視的機構に基づく破壊条件の定式化

本研究では先行研究^{1),2),3)}に基づき、脆性破壊の発生機構を以下の三段階から成るものと仮定し、Stage-I および Stage-II における、実験と計測に基づく定式化を行った (Fig.1)。

- Stage-I: パーライト内における微視亀裂形成
- Stage-II: 隣接フェライト粒への亀裂伝播
- Stage-III: 伝播した亀裂のフェライト粒界突破

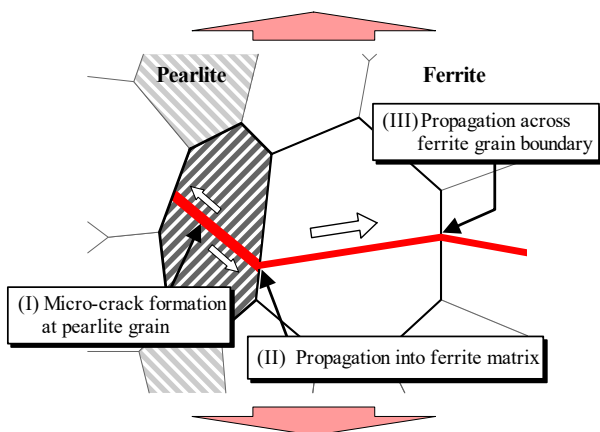


Fig.1 Micro-process of cleavage fracture initiation in ferrite-pearlite steel

Stage-I: パーライト内における微視亀裂形成

パーライト内の微視亀裂を確率的に評価するために、途中除荷引張試験を行って微視亀裂を発生させた。試験片を切り出して SEM による観察をすることで微視亀裂の数を計測し、微視亀裂の形成確率を算出した。算出された微視亀裂形成確率を、有限要素解析より求められた最大せん断応力と相当塑性ひずみを用いた定式化を試み、以下の式(1)に示すような相当塑性ひずみによる定式化が適当であることを確かめた (Fig.2)。これにより従来知られていた Stage-I における定式化よりも、より広範な温度条件下で成り立つ式を得られた。

$$p = 5.5\varepsilon_q^3 + \varepsilon_q \quad (1)$$

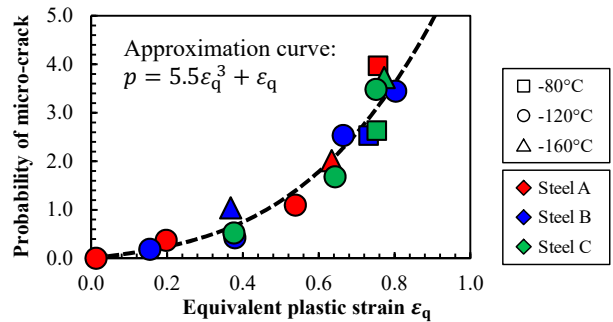


Fig.2 Quantification results of probability of cracking in pearlite structure

Stage-II: 隣接フェライト粒への亀裂伝播

Stage-II の定式化においては、微視亀裂の形状を考慮した Griffith の破壊応力理論に基づく定式化を行った。微視亀裂の形状計測に際しては、シリアルセクションニング法を用いた 3 次元計測を行い、その寸法とフェライト粒径およびパーライトバンド幅の分布との関係性を見出した (Fig.3)。その結果、パーライト内の微視亀裂の形状は楕円形に近似できることがわかり、Stage-II の定式化においては楕円形亀裂を仮定して破壊応力を算出する定式化を行った。その結果、Stage-II における破壊応力は以下の式(2)のようになった。

$$\sigma_{f(3D)} = S(a, b) \sqrt{\frac{\pi E \gamma}{(1 - \nu^2) b}} \quad (2)$$

$$S(a, b) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \sin^2 \psi^2} d\psi \quad (3)$$

ここで求められた破壊応力と、従来考えられていたモデルにおける破壊応力を比較したところ、提案した楕円形亀裂を仮定したモデルにおける破壊応力は、従来の円形亀裂を仮定したモデルよりも低く算出されており、本モデルの方がより妥当であることが分かった (Fig.4)。

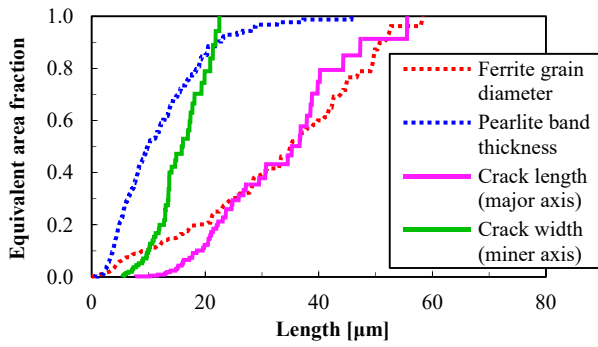


Fig.3 Comparison between distributions of grain and micro-crack sizes

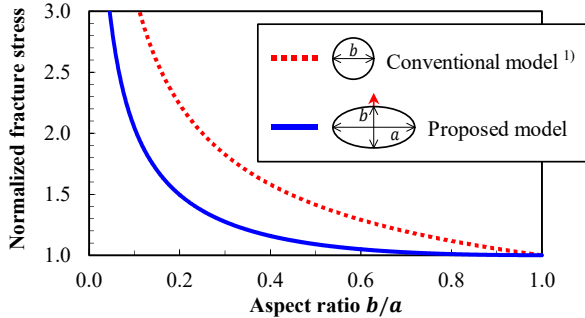


Fig.4 Dependence of fracture stress on aspect ratio of micro-crack

2. 破壊靱性予測モデルの構築

上記の定式化に基づいて、フェライト・パーライト鋼の脆性破壊靱性を予測するモデルを構築した。フェライト・パーライト鋼の微視組織のモデル化においては、フェライト粒を球、パーライト粒を楕円球と仮定し、3次元計測の結果から、パーライト粒は扁平な形の回転楕円体にモデル化することとした。微視組織のモデルを構築するための結晶粒の充填にはモンテカルロ法を用い、乱数を与えて充填する結晶粒の種類や粒径、結晶方位を決定することにより、微視組織のばらつきを再現している。上述の微視組織のモデル、破壊条件の定式化および有限要素解析を組み合わせ、脆性破壊靱性を予測するモデルを開発した。脆性破壊靱性予測モデルの概念図を Fig.5 に示す。

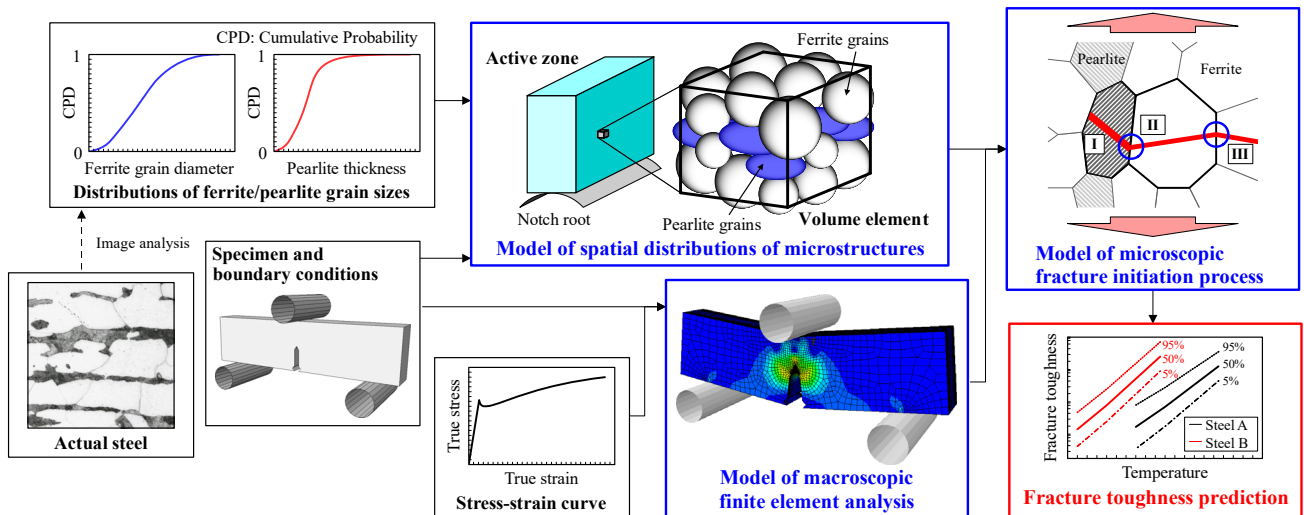


Fig.5 Outline of fracture toughness prediction model

3. 破壊靱性試験の再現解析

開発したモデルの妥当性を検証するため、切り欠き付き 3 点曲げ試験を実施し、モデルによる解析結果との比較を行った。試験は異なる微視組織を有する 5 つの鋼種を用いて行った。試験では脆性破壊靱性指標値である限界準 CTOD の値を計測し、破断後の試験片の破面観察により、破壊発起点の位置を測定した。実験結果は従来知られているような脆性破壊靱性値や破壊発起点の温度依存性や、結晶粒径の大きさに対する傾向、炭素量に対する傾向を示した。

上記の破壊靱性試験を対象に、モデルによる再現解析を行った。破壊靱性値の予測値と実験結果を比較したところ、すべての鋼種において非常に高精度での予測が達成された (Fig.6)。また温度依存性や微視組織の影響など、経験的に知られていた傾向が本モデルによっても示されていることが確認できた。破壊発起点の位置についても、温度依存性による傾向を確認することができた。したがって本モデルは、脆性破壊の微視的な発生機構において支配的な因子を十分に考慮し、脆性破壊靱性値を高精度に予測可能なモデルを開発したと考えられる。

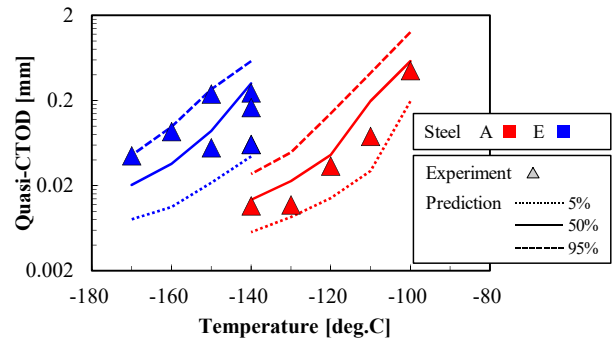


Fig.6 Comparison between experimental and prediction results of fracture toughness

さらに、開発したモデルを用いて仮想的な材料に対して解析を行うことにより、微視組織が脆性破壊靱性値に与える影響について考察した。その結果、炭素濃度の増加は破壊靱性値の低下を招き、結晶粒径の細粒

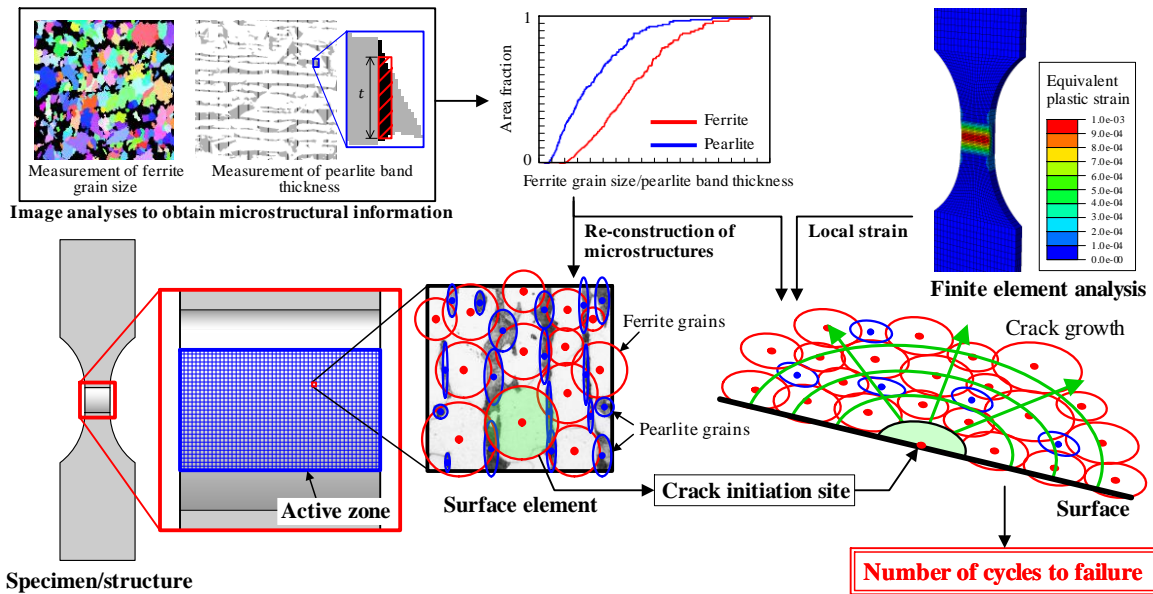


Fig.8 Outline of fatigue life prediction model

化は破壊靱性値を向上させることがわかった。ただし結晶粒径の影響の大きさは、フェライト粒径に比べてパーライトバンド幅は小さいものであった。

III. 疲労寿命予測モデルの開発

1. 疲労強度特性の取得と疲労亀裂進展過程の観察

疲労強度特性の微視組織による影響と疲労亀裂の進展過程について考察を行うため、異なる微視組織を有する5つの鋼種を用いて両振り疲労試験を実施した。疲労試験では疲労寿命および疲労限となる応力の値を計測し、鋼種ごとのS-N曲線を取得した。その結果、従来知られているような、疲労寿命の粒径依存性や炭素量の増加に伴い疲労寿命が向上する傾向を確認することができた。

さらに疲労寿命を取得した試験のうち、5つの条件において疲労亀裂進展過程の観察を行った。ここでは試験片表面を直接的に観察することにより、表面亀裂の亀裂長さを測定し、亀裂長さと载荷回数との関係を計測した。その結果、亀裂長さが短いときにおける载荷回数が疲労寿命に対して高い割合を要することが確認された。また従来知られるとおり、疲労亀裂の進展方向は巨視的には荷重方向と概ね垂直となることが確認された(Fig.7)。



Fig.7 Observation of small crack growth path

2. 疲労寿命予測モデルの構築

疲労亀裂と微視組織を関連付ける亀裂と粒界の相互作用理論⁴⁾を基に、フェライト・パーライト鋼の疲労寿

命を予測するモデルを構築した(Fig.8)。本モデルでは、疲労亀裂の発生する表面の2次元モデルと疲労亀裂が進展する内部の2次元モデルを独立にモデル化して組み合わせることにより、微視組織の3次元空間分布を考慮した。また本モデルでは亀裂と粒界の相互作用理論では考慮されていなかった繰返し応力ひずみ関係を、ひずみ基準の等価応力テンソルを算出し破壊判定に用いることによって本モデルに導入した。

疲労亀裂の発生判定は表面の2次元モデルに充填されたすべてのフェライト結晶粒に対して行い、そこで疲労亀裂が発生すると判定された結晶粒に対して内部の2次元モデルを構築する。内部モデルにおいては、粒の複雑な位置関係を2次元平面に単純化してモデル化を行っている(Fig.9)。

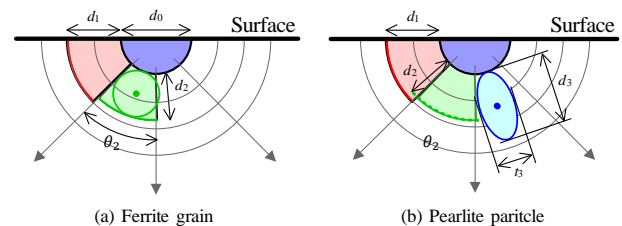


Fig.9 Schematic diagram of assignment of grains

内部の2次元モデルでは亀裂と粒界の相互作用理論を基にした次式に示す定式化を用いた亀裂の進展判定を行い(Fig.10)、亀裂進展に対する粒界効果の影響は、結晶方位差により駆動力が低下することによって定式化を行った。

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\tau_j^f}{\tau_j^a} \arccos\left(\frac{a}{c}\right) - \sum_{i=j+1}^{\infty} \left(\frac{\tau_i^f}{\tau_i^a} - \frac{\tau_{i-1}^f}{\tau_{i-1}^a}\right) \arccos\left(\frac{l_{i-1}}{c}\right) = 0 \quad (4)$$

これらの定式化に基づき仮定した亀裂長さに対して亀裂先端開口変位の値を算出し、その値とParis則から疲労寿命の予測を行った。さらにモデルにおける亀裂

の進展過程において、亀裂が結晶粒界を突破する前後で亀裂形状が変化することを仮定し、はじめの結晶粒内では半楕円形表面亀裂、結晶粒界を突破した後は半楕円形の表面亀裂を仮定して、定式化を行った (Fig.11). また亀裂先端開口変位下限界値を導入することにより、疲労限において亀裂の停留現象が起こることをモデル上に再現した。

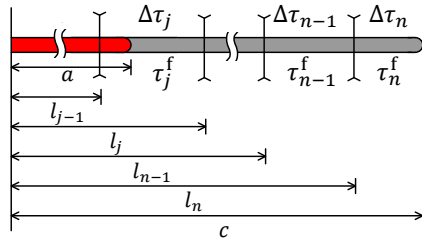


Fig.10 Schematic diagram of the theory of crack and grain boundaries interaction⁴⁾

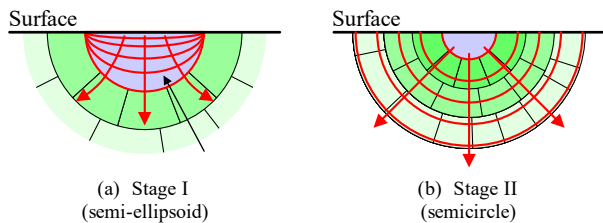


Fig.11 Assumed crack shape

3. 疲労試験の再現解析

開発したモデルの妥当性を検証するため、疲労試験の再現解析を実施し、モデルによる解析結果と実験結果との比較を行った。モデルの解析においては一つの鋼種の実験結果を用いて、Paris 則パラメータおよび亀裂先端開口変位下限界値のあわせ込みを行い、その値を用いて残りの 4 鋼種についての予測を行った。

その結果、すべての鋼種において疲労寿命および疲労限の値を良好な精度で予測することができた (Fig.12, Fig.13). 疲労亀裂長さや載荷回数との関係においては、開発したモデルでは初期の亀裂長さの小さい範囲では良好な一致を見せ、亀裂長さが長い範囲では亀裂長さに対して載荷回数を一部過大に評価する結果となった (Fig.14). この主要な原因の一つは本モデルでは考慮していない亀裂の結合現象によるものだと考えられる。

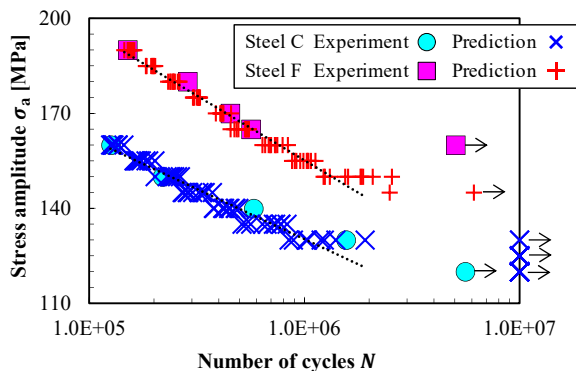


Fig.12 Comparison between experimental and prediction results of SN-curve

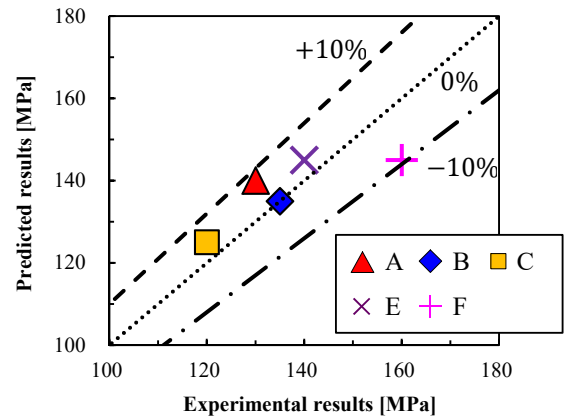


Fig.13 Comparison between experimental and prediction results of fatigue limit

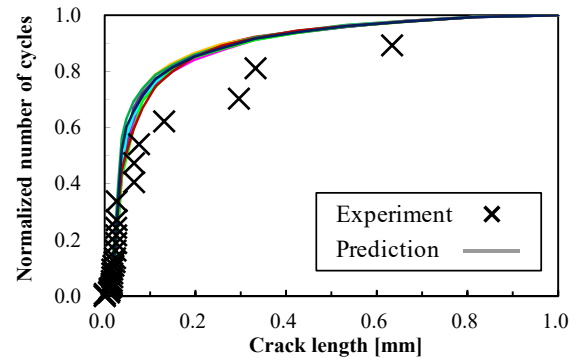


Fig.14 Relationship between crack length and number of cycles

IV. 結論

本研究では、フェライト・パーライト鋼を対象として、脆性破壊靱性値および疲労寿命を、微視組織情報に基づいて、非常に高い精度で予測することができた。本研究で対象としている脆性破壊と疲労損傷は、異なる破壊形態であるが、「モデル統合化」という共通するアプローチによって、複雑な破壊現象の支配的因子を合理的かつ簡易的に捉え、モデル化を行うことができたものと考えられる。

本研究で開発したモデルは、構造材料の破壊・損傷に関する現象解明という学術的価値だけでなく、材料開発の設計指針としても非常に強力なツールとなりうるため、より複雑な材料に対しても本モデルの適用性を拡大することが期待される。

参考文献

- 1) 平出隆志, 柴沼一樹, 栗飯原周二, 鉄と鋼, Vol.101, No.71, pp.384-393, 2015.
- 2) K. Shibamura, S. Aihara, K. Suzuki, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.151, pp.161-180, 2016.
- 3) K. Shibamura, S. Aihara, K. Suzuki, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.151, pp.181-202, 2016.
- 4) K.Tanaka, Y.Akiniwa, Y.Nakai, R.P.Wei, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, No.6, pp.803-819, 1986.