

鋼の微視組織情報に基づく疲労寿命予測モデルの構築

研究代表者 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻
准教授 柴沼 一樹

1. 緒言

疲労損傷は、最も重要な基盤材料である鉄鋼材料において最も頻発する損傷形態である。このため、疲労損傷という物理現象に対する理解を深め、適切に制御可能な理論体系を構築することは極めて重要な工学的課題である。

以上の背景により、鉄鋼材料をはじめとした疲労損傷に関してはこれまで数多の研究がなされてきた。特に、疲労損傷による材料の寿命を決定づける因子については、その詳細を把握するために精力的な研究がなされてきた。これまでの研究により、(1) 結晶粒径や第二相分布などの「微視組織」、(2) 降伏・引張強度などの「静的機械特性」、(3) 応力振幅や応力比、切り欠き効果などの「外力条件」は、材料の疲労寿命の支配因子として広く認識されているに至っている。しかし、これらの疲労損傷を支配する因子と疲労寿命を定量的に結びつけるための理論やモデルの確立にはいまだ至っていないのが現状である。

従来では、疲労損傷による構造体寿命は、亀裂発生寿命 N_i と亀裂成長寿命 N_p の和 ($N_i + N_p$) として記述できると考えられてきた。これに対し、研究者らは本研究の予備検討として、フェライト・パーライト鋼の平滑材を使用した疲労試験に対する亀裂発生挙動の詳細観察を実施し、破断寿命が 10 万サイクル以上、1000 万サイクル以下の、所謂「高サイクル疲労」による損傷では、全寿命におけるわずか 1% 以下で亀裂の「発生」が確認できることを明確にした (Fig. 1 および文献[1]参照)。すなわち、疲労寿命に占める上記 N_i の寄与はほとんどなく、 N_p のみを考えることで実用上十分な精度で構造体疲労寿命を評価できる可能性が示唆された。

本研究では、上記の予備検討による知見を基に、最も基本的な材料組織であるフェライト・パーライト鋼を対象として、(1) 結晶粒径や第二相分布などの「微視組織」、(2) 降伏・引張強度などの「静的機械特性」、(3) 応力振幅や応力比・切り欠き効果などの「外力条件」、という事前に取得可能な情報のみに基づき疲労損傷の微視的機構から巨視的応答までを再現することで、事後の調整パラメータを一切使用することなく疲労寿命の定量的な予測を可能とするマルチスケールの統合化モデルを構築することを目的とする。

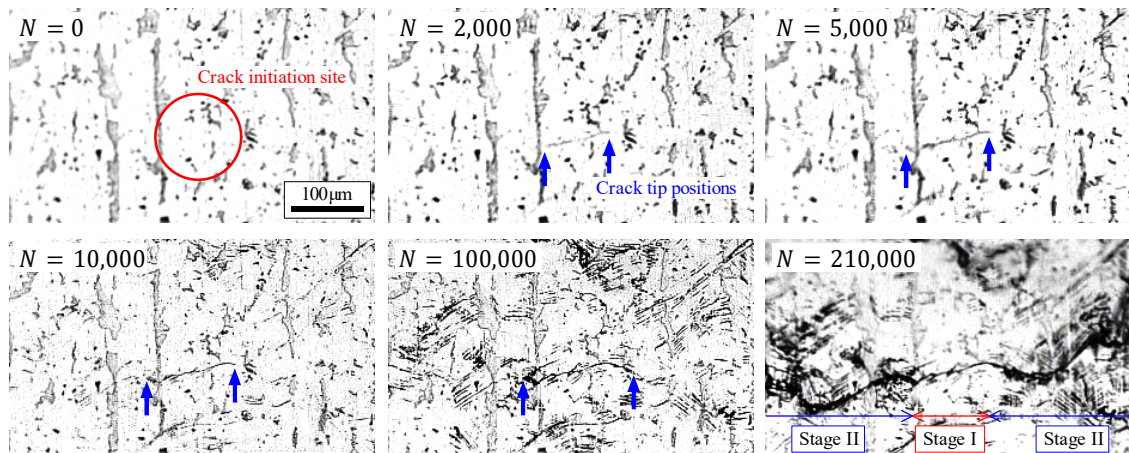


Fig. 1 亀裂発生と成長挙動に関する詳細観察結果（全寿命 $N_f = 218,987$ cycles に対してわずか1%以下の $N = 2,000$ cycles 時点ですでに亀裂発生が確認できる）[1]

2. 微小亀裂領域における亀裂開閉口挙動の定量化

疲労損傷における亀裂の進展には亀裂の開閉口挙動が大きく影響することが広く知られている。亀裂が結晶粒数個分に相当するような損傷初期の「微小亀裂」の状態にある際には、亀裂の閉口の影響が相対的に小さいことが知られているものの、その定量的な取り扱いの方法は未確立であった。そこで本研究では、統合化モデルの開発に先立ち、平滑材を用いた疲労試験を対象として、亀裂の発生・成長挙動の詳細計測と画像相関法（DIC）を組み合わせることで、微小亀裂状態における亀裂の開閉口挙動の定量化を試みた。

Fig. 2 に使用した供試鋼と試験片形状を示す。試験片表面の観察範囲を限定するために、亀裂の発生サイトとなりうる高ひずみ領域が軸方向に対して1 mm 以下の範囲に限定されるように有限要素解析を援用した設計を行った。

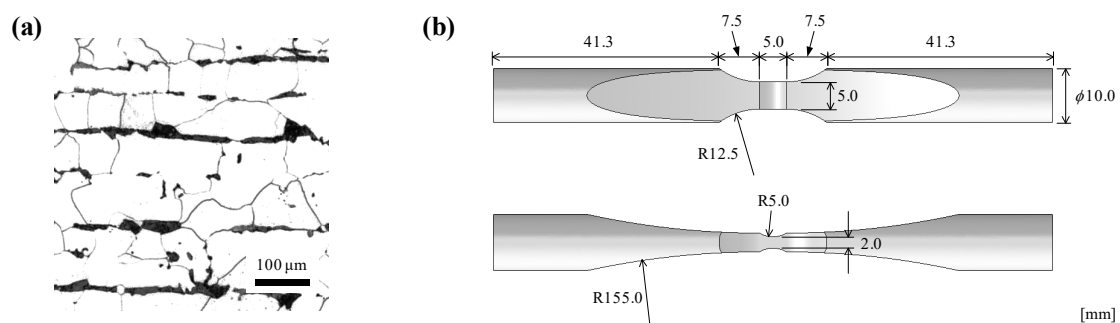


Fig. 2 亀裂開閉口挙動観察に使用した供試鋼と試験片形状、
(a) 供試鋼の光学顕微鏡写真、(b) 試験片形状

本計測は NIMS で開発された、(a)疲労試験機、(b)CCD カメラ、(c)3 軸ステージ、(d)制御コントローラ、によって構成される広域亀裂計測システム[2]を利用して行った。Fig. 3(a)に計測システムの外観を示す。2000～5000 サイクルごとに 1 サイクルに対して 40 回の撮影を亀裂発生の可能性のある全領域領域（幅 5 mm×高さ 1.5 mm）に対して実施した。亀裂の開閉口挙動は Fig. 3(b)に示すように計測システムより取得した画像において、亀裂先端後方 10 μm の位置における亀裂上下面から 5 μm の位置の相対変位も用いて評価した。

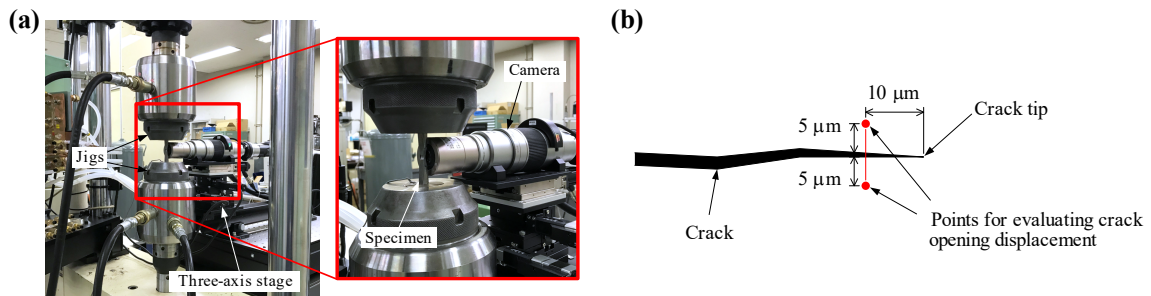


Fig. 3 (a) 全自動計測システムの外観、(b) 亀裂開口変位の評価方法

Fig. 4(a)に DIC によって得られた亀裂発生部近傍のひずみ分布の一例を示す。元の画像では明瞭ではなかった亀裂開口・閉口時の際など亀裂の開閉口挙動の詳細が、DIC によるひずみ分布の可視化によって明確となった。各計測サイクルに対し、得られた画像データを基に Fig. 3(b)に示した条件のもとで亀裂開口変位の推移を計算し、それと公称応力との関係によって得られるヒステリシスループを取得し、除荷弾性法に基づき亀裂開口応力を算出した。各計測サイクルにおける亀裂長さと亀裂開口応力の関係を Fig. 4(c)に示す。この結果より、亀裂発生時は開口応力が最低応力と一致、すなわち亀裂閉口は生じないことが定量的に示された。また、亀裂の開口応力は亀裂の進展に伴って上昇し、最終的に十分に長い亀裂に対する開口応力の経験式[3]とよく合致する傾向が確認された。以上の結果に基づき、微小亀裂状態の亀裂の開閉口挙動を記述するために亀裂開口応力を次式で定量化した。

$$\sigma_{\text{op}} = -(\sigma_{\text{nom}} + \sigma_{\text{op}}^{\infty}) \exp(-0.028b) + \sigma_{\text{op}}^{\infty} \quad (1)$$

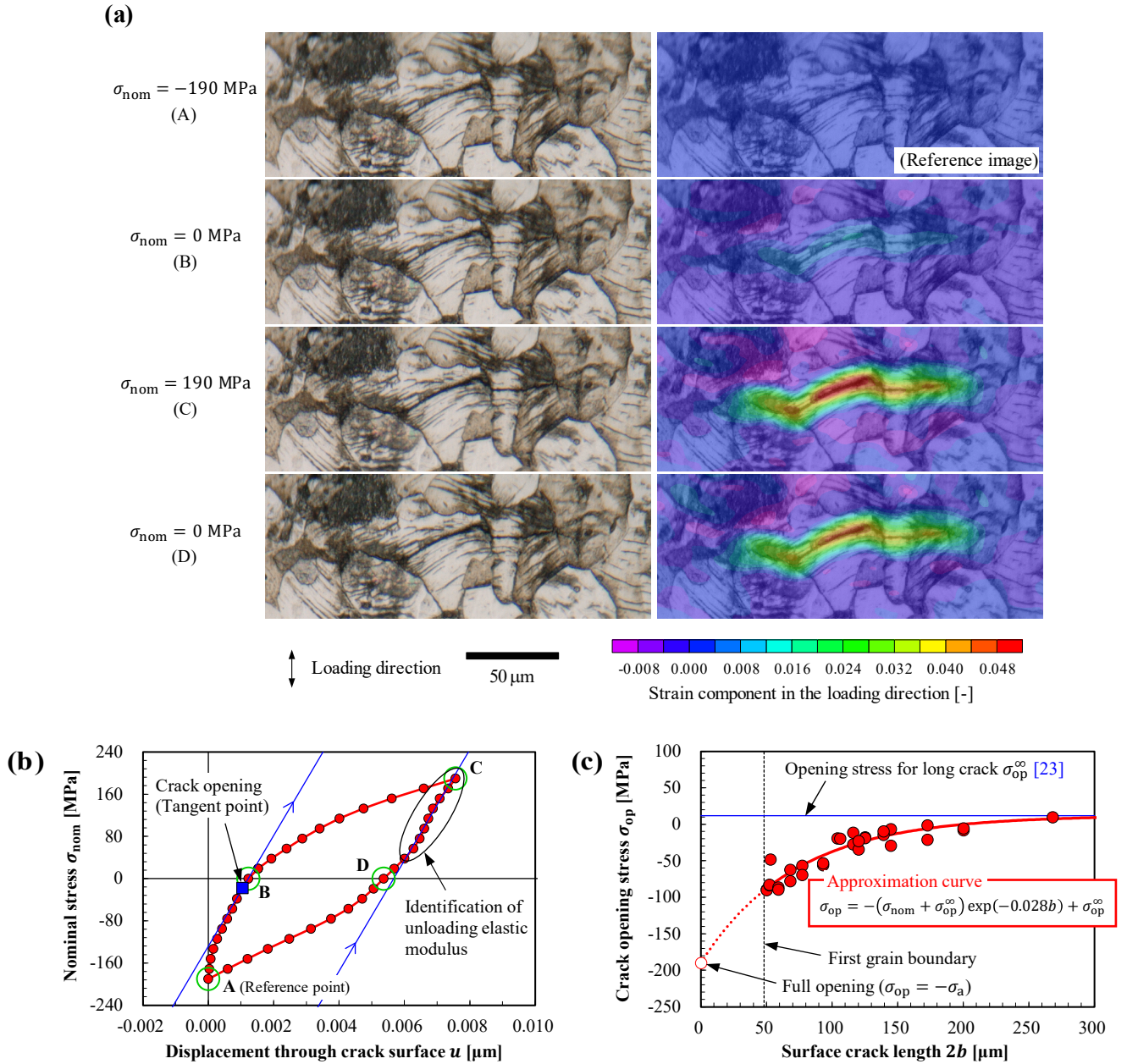


Fig. 4 亀裂開閉挙動計測結果： (a) DIC によって得られたひずみ分布 ($N = 1.40 \times 10^5$ cycles, $2b = 120 \mu\text{m}$), (b) 亀裂開口変位－公称応力関係におけるヒステリシスループ ($N = 1.40 \times 10^5$ cycles, $2b = 120 \mu\text{m}$) , (c) 亀裂開口応力の定量化

3. 統合化モデルの開発

3.1. 統合化モデルの概要

予備検討によって得られた知見に基づき、構造体の疲労寿命を亀裂進展のみで評価することをコンセプトとして、疲労寿命を定量的に予測するためのモデル開発を行った。

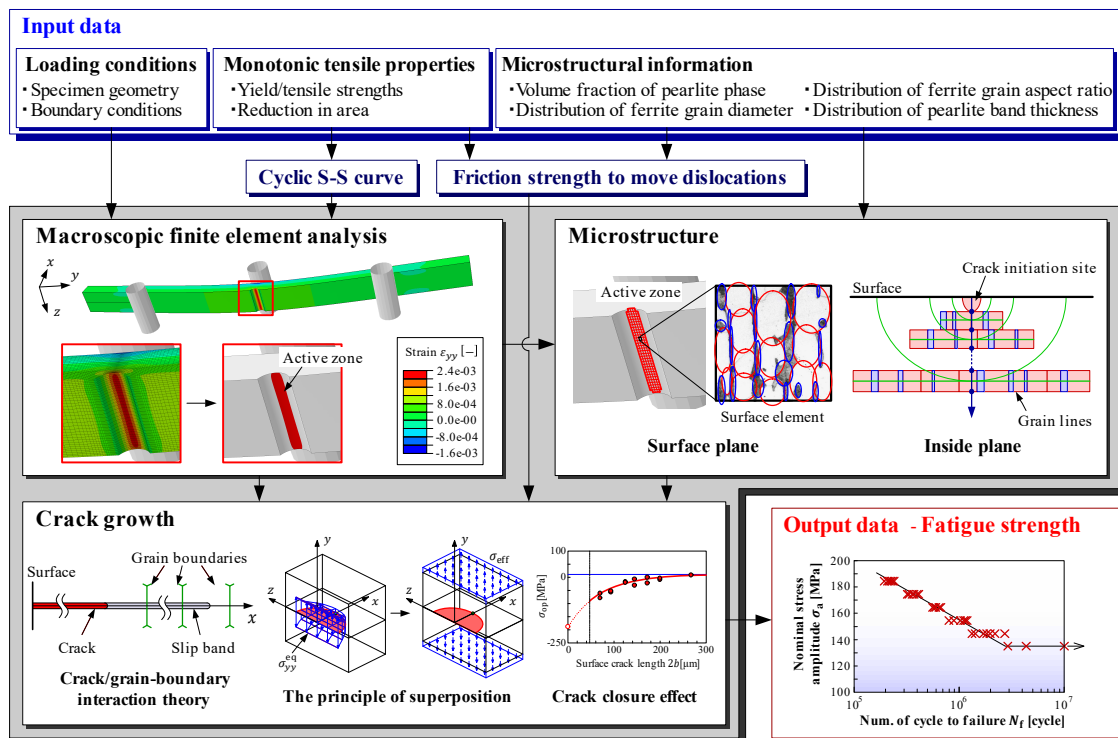


Fig. 5 疲労寿命予測を実現するマルチスケール統合化モデル

具体的には、本モデルは Fig. 5 に示すように有限要素解析・材料組織、亀裂進展を対象としたマルチスケールのサブモデルによって構成された統合化モデルであり、「微視組織」、「静的機械特性」、「外力条件」というミクロ・マクロ双方の因子を入力条件として、疲労寿命および疲労限を得るものである。有限要素解析モデルでは疲労試験全体を模擬し、疲労損傷発生箇所近傍の局所的なひずみの空間分布を取得する。材料組織モデルでは、モンテカルロ法によって亀裂発生箇所に対応する表面と亀裂進展経路に対応する内部のそれぞれに対応した微視組織分布を与える。亀裂進展モデルでは、有限要素解析モデルで得られたひずみ分布および材料組織モデルで得られた微視組織分布を入力として、亀裂と隣接結晶粒の方位差に起因した結晶粒界の相互作用および上記で定量化した亀裂の開閉口挙動に基づく亀裂進展解析を行う。亀裂発生から試験片破断に至るまでの亀裂駆動力の推移を全ての亀裂発生サイトに対して評価し、最短の寿命を与える亀裂進展過程をもってその試験片の疲労寿命を予測する。

以下に各サブモデルについてそれらの概要を示す。

3.2. 有限要素解析モデル

有限要素解析モデルでは、試験片の形状およびその境界条件という「外力条件」と、降伏強度・引張強度および断面減少率という「静的引張特性」を入力として、繰返し荷重下における、亀裂発生の可能性のある領域（アクティブゾーン）のひずみ振幅分布を取得す

ることが目的である。

有限要素解析で使用する構成式は Li et al.によって得られた下記の繰返し応力-ひずみ関係の経験式[4]を使用した。

$$\varepsilon_M^a = \varepsilon_e^a + \varepsilon_p^a = \frac{\sigma_M^a}{E} + \left(\frac{\sigma_M^a}{K'} \right)^{1/m'} \quad (2)$$

ここで、 ε_M^a および σ_M^a は相当ひずみ振幅および相当応力振幅、 E は Young 率である。また、 K' および m' はそれぞれ降伏強度 σ_Y 、引張強度 σ_B および断面減少率 r_A の関数として次式で与えられる。

$$K' = \begin{cases} (2.16 \times 10^{-4})\sigma_B^{2.1} + 738 & (\sigma_B/\sigma_Y \leq 1.2), \\ (3.63 \times 10^{-4})\sigma_B^2 + 0.68\sigma_B + 570 & (1.2 < \sigma_B/\sigma_Y \leq 1.4), \\ 1.21\sigma_B + 555 & (1.4 < \sigma_B/\sigma_Y), \end{cases} \quad (3)$$

$$m' = \frac{\ln K' - \ln \left(0.089(1 + r_A)^{1.35} \sigma_B^{1.35} \left(-\frac{0.002}{\ln(1 - r_A)} \right)^{0.216} + 120 \right)}{\ln 500} \quad (4)$$

アクティブゾーンは相当ひずみ振幅が最大値の 80%以上となる試験片表面として定義した (Fig. 6(b)参照)。

有限要素解析の結果として得られたひずみ振幅テンソルの弾性成分 ε_e^a および組成成分 ε_p^a に基づき、次式で等価応力範囲テンソル $\Delta\sigma_{eq}$ を算出する。

$$\Delta\sigma_{eq} = 2(\mathbf{C}_e : \varepsilon_e^a + \mathbf{C}_p : \varepsilon_p^a) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{C}_e$ および $\mathbf{C}_p$ は Poisson 比をそれぞれ 0.3 および 0.5 と仮定した弾性係数テンソルである。さらに、Masing の仮説[5]を適用してのヒステリシスループを推定し、3.4 節で述べる亀裂進展モデルの入力データとする。

3.3. 微視組織モデル

疲労損傷は本来複雑な 3 次元の現象であるが、構造体において最も頻発する高サイクル疲労では、損傷は表面で発生し、その後、最大主応力にほぼ垂直な面で進展することが知られている。本研究では、これらの特徴を考慮して、表面および内部に対応する 2 段階の 2 次元問題として、複雑な 3 次元問題を合理的にモデル化することを試みた。

本研究で対象とするフェライト・パーライト組織は、フェライトおよびパーライトの二相組織である。それらの組織単位を可能な限り単純化するために、表面では楕円、内部では長方形で近似することとした (Fig. 6(a))。

表面のモデルでは、まず有限要素解析モデルで定義したアクティブゾーンを最大結晶粒径以上のサイズの面積要素によって細分化する。フェライト結晶粒およびパーライトバンド幅の分布に基づき、各面積要素を埋めるまでモンテカルロ法による結晶粒およびパーライトコロニーの割当てを実行する (Fig. 6(b))。この面積要素の内部では結晶粒の配置は考

慮せず、全ての結晶粒に対して等しい応力・ひずみが作用しているものと仮定する。面積要素に割り当てられた全ての結晶粒は亀裂の発生サイトとして考え、亀裂の進展解析を実行する。

内部のモデルでは、次節に示す亀裂進展モデルに対応したモデル化を行う。具体的にはひずみ振幅分布と亀裂発生サイトとなる結晶粒の形状より、亀裂前縁形状の推移を仮定し、その亀裂前縁に沿ってモンテカルロ法による結晶粒の割当てを実行する (Fig. 6(c))。

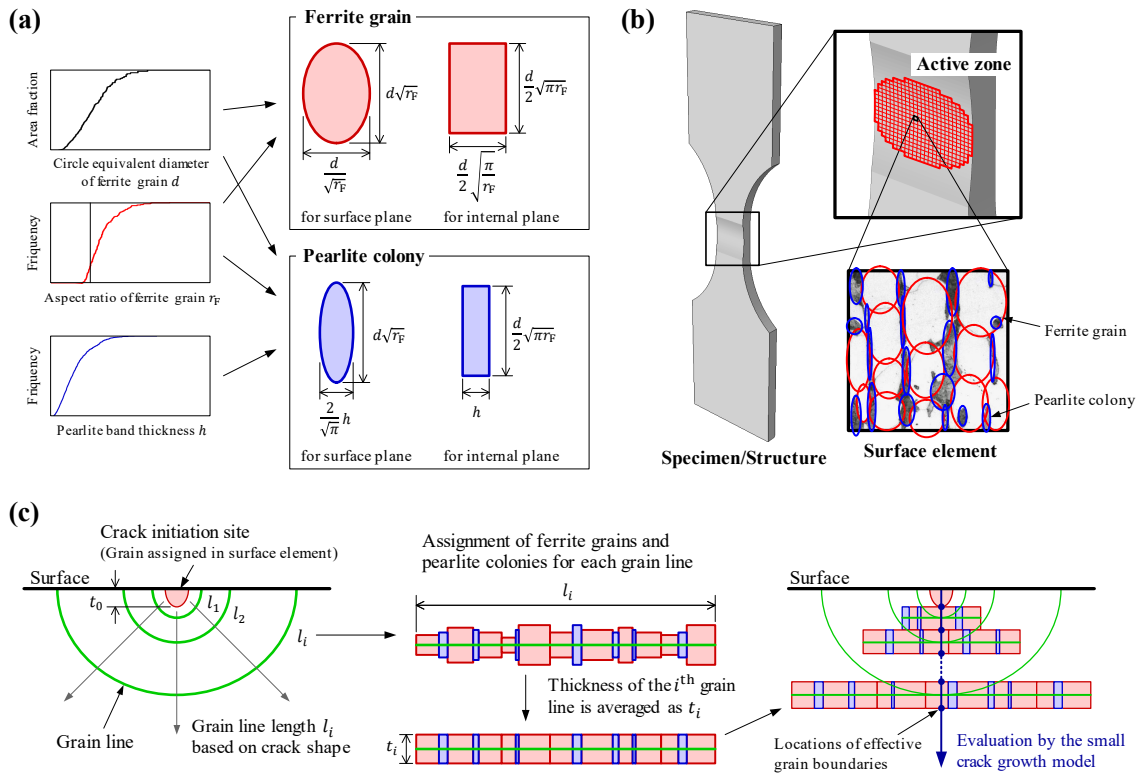


Fig. 6 微視組織モデル：(a) フェライト結晶粒およびパーライトコロニーの形状、(b) 表面モデル、(c) 内部モデル

3.4. 亀裂進展モデル

本研究では、序論に述べたように疲労寿命における亀裂発生寿命は考慮せず、亀裂進展に費やされる载荷回数のみとして疲労寿命を評価する。これには微視組織による結晶学的な作用を考慮した亀裂の進展挙動の再現が必要となる。そこで本研究では、Tanaka et al. によって弾塑性状態の亀裂先端近傍場を記述する Dugdale モデルと連続分布転位論を組み合わせることで提案された「亀裂と結晶粒界の相互作用理論」(Fig. 7(a)) [6]を基礎と

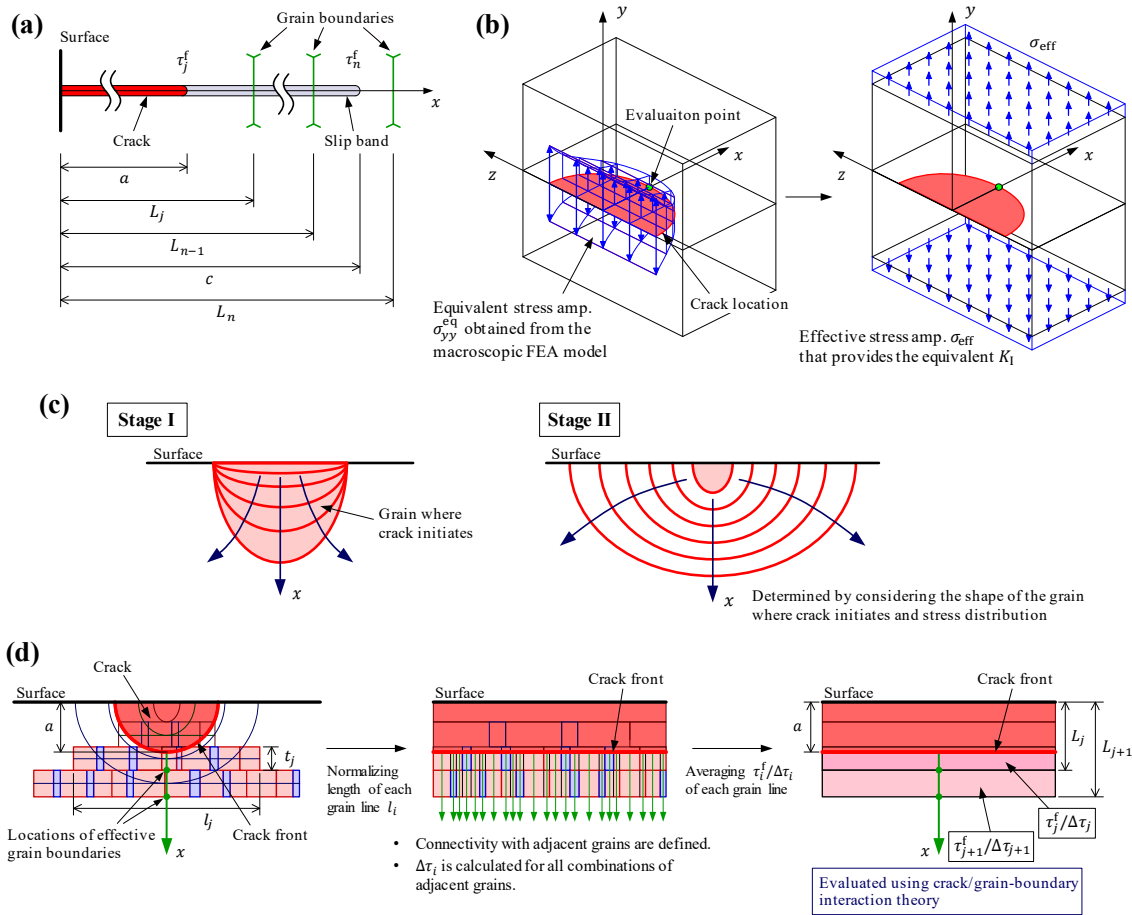


Fig. 7 亀裂進展モデル：(a) 亀裂と結晶粒界の相互作用理論[5]、(b) 有限要素解析で得られる等価応力範囲テンソルの有効な遠方一様応力への変換、(c) 仮定する亀裂形状、(d) 亀裂前方における結晶方位とすべり系およびその分布の1次元問題への縮約

して、定式化に使用される各パラメータに結晶学に基づく具体的な物理的意味を与え、一切の任意パラメータを排除した定式化を立案した。本定式化では、亀裂長さ a 、亀裂前方に生じるすべり帯長さ c 、および表面から i 番目の結晶粒界までの距離 L_i の関係を次式によって記述する。

$$\frac{\pi}{4} - \frac{\tau_j^f}{\Delta \tau_j} \arccos\left(\frac{a}{c}\right) - \sum_{i=j+1}^{\infty} \left(\frac{\tau_i^f}{\Delta \tau_i} - \frac{\tau_{i-1}^f}{\Delta \tau_{i-1}} \right) \arccos\left(\frac{L_{i-1}}{c}\right) = 0 \quad (6)$$

ここで、 τ_i^f および $\Delta \tau_i$ は i 番目の結晶粒における転位の摩擦応力および有効分解せん断応力である。 τ_i^f は単結晶のすべり強度と等価であるため、材料の平均粒径 d_{ave} 、降伏強度 σ_Y 、およびパーライト分率を用いて、Hall-Petch 則と線形分配則を用いて推定することができる。また、 $\Delta \tau_i$ は、有限要素解析によって得られる等価応力範囲テンソル $\Delta \sigma_{eq}$ の空間分布 (Fig. 7(b))、亀裂形状 (Fig. 7(c))、亀裂前方における結晶方位とすべり系およびその分布 (Fig. 7(d))、および、2 節で定量化した亀裂開閉挙動、の影響を考慮して計

算できる。

式(6)を用いることで、亀裂長さ a を0から試験片の厚さまで変化させることにより、亀裂発生から破断に至るまでのすべり帯長さ c の推移を評価する事ができる。さらに、その結果を次式に代入することで、亀裂進展の駆動力である亀裂先端すべり変位範囲 ΔCTSD を評価する事ができる。

$$\Delta\text{CTSD} = \frac{4(1-\nu)}{\pi G} \left[2a\tau_j^f \ln\left(\frac{c}{a}\right) + \Delta\tau_j \sum_{i=j+1}^{\infty} \left(\frac{\tau_i^f}{\Delta\tau_i} - \frac{\tau_{i-1}^f}{\Delta\tau_{i-1}} \right) g[a, c, L_{i-1}] \right], \quad (7)$$

$$g[a, c, L] = L \ln \left| \frac{\sqrt{c^2 - L^2} + \sqrt{c^2 - a^2}}{\sqrt{c^2 - L^2} - \sqrt{c^2 - a^2}} \right| - a \ln \left| \frac{a\sqrt{c^2 - L^2} + L\sqrt{c^2 - a^2}}{a\sqrt{c^2 - L^2} - L\sqrt{c^2 - a^2}} \right|.$$

この ΔCTSD に基づき、亀裂進展速度 da/dN は次式により書ける。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C\Delta\text{CTSD}^n & (\text{in Stage I } (a \leq L_1)) \\ C(\Delta\text{CTSD}^n - \Delta\text{CTSD}_{\text{th}}^n) & (\text{in Stage II } (a > L_1)). \end{cases} = 0 \quad (8)$$

ここで、 C 、 n 、および $\Delta\text{CTSD}_{\text{th}}$ はそれぞれ定数であるが、材料によらないパラメータであると考えることができる。破断に至るまでの载荷回数は式(8)の逆数を亀裂長さ a に関して0から試験片の厚さまで積分することで評価できる。アクティブゾーンに割り当てられた全ての結晶粒を亀裂発生サイトと仮定して载荷回数を評価し、最も小さい結果をもって試験片の疲労寿命を推定することができる。

4. 開発モデルの妥当性検証

本研究で開発した統合化モデルの一般性を実証するための厳格な妥当性検証を目的として、3種類の材料より製作した3種類の試験片を用いて系統的な疲労試験を実施した。

用いた供試鋼の組織の光学顕微鏡写真をFig. 8に示す。結晶粒径の分布はEBSDによって、パーライトバンド幅の分布は光学顕微鏡写真を2値化処理した後、統計処理することによって、それぞれ取得した。それぞれの供試鋼の引張特性、平均粒径、パーライト分率、および転位の摩擦応力をTable 1に示す。また、用いた試験片の形状と応力比および応力集中係数をFig. 9に示す。

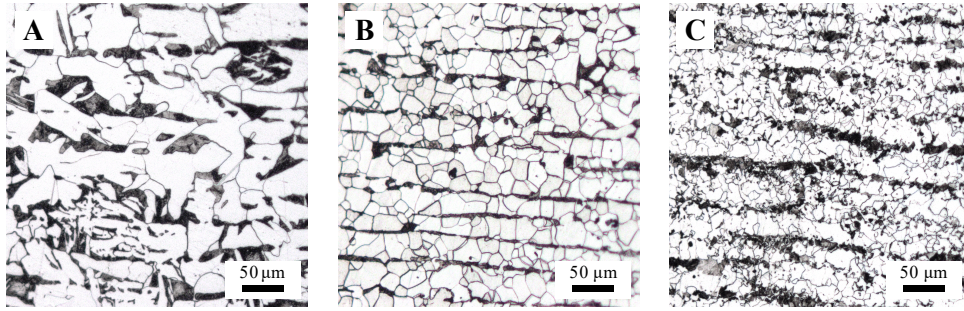


Fig. 8 妥当性検証に用いた供試鋼組織

Table 1 供試鋼の引張特性、平均粒径、パーライト分率、および転位の摩擦応力

Steel	Yield strength σ_Y [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Reduction in area r_A [-]	Ave. grain size d_{ave} [μm]	Volume fraction of pearlite [%]	Friction strength to move dislocations [MPa]	
						Ferrite	Pearlite
						τ_F^f	τ_P^f
A	216	430	0.72	56.6	27	53	74
B	260	395	0.79	24.5	13	53	73
C	368	538	0.78	15.4	21	83	116

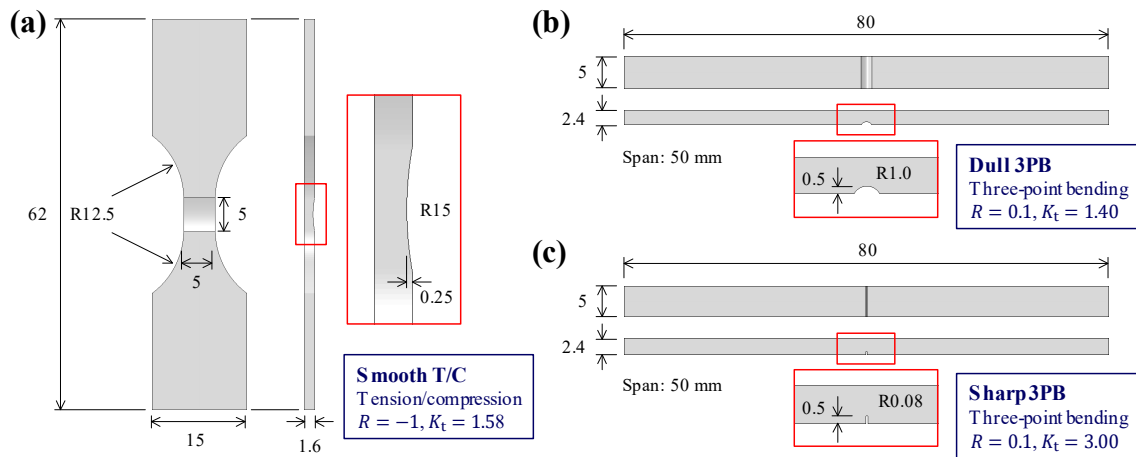


Fig. 9 妥当性検証に用いた試験片の形状、応力比および応力集中係数

以上の条件のもとで実施した実験に対して本研究で提案した統合化モデルによる予測結果との比較を行うにあたり、供試鋼 A の試験片 Smooth T/C の疲労試験結果を用いて式 (8) で用いた定数 C 、 n 、および $\Delta\text{CTSD}_{\text{th}}$ の同定を行った。その結果を Table 2 に示す。

本モデルを用いることで、実験結果の SN 曲線を極めて高精度に再現可能であることが示された (Fig. 10 における供試鋼 A の試験片 Smooth T/C の結果を参照)。ただし、この結果はあくまで従来研究と同様の「合わせこみ」であり、疲労寿命の「予測」ではない。

Table 2 Results of parameters identification

C	n	$\Delta CTSD_{th} [\mu m]$
11.8	2.0	0.145

そこで、Table 2 に示した同定された定数を用いて、供試鋼 A の試験片 Smooth T/C 以外の 8 条件の実験結果に対する「予測」を行った。得られた SN 曲線の比較結果を Fig. 10 に示す。これらの結果より、本研究で開発したモデルは材料定数と呼ばれる任意の調整パラメータを一切用いることなく、全ての条件に対して高精度に SN 曲線を「予測」可能であることが示された。この結果は、開発したモデルで仮定した構造体の全疲労寿命を「亀裂進展のみ」から評価するという独自のアプローチの有効性を強く示唆するものである。

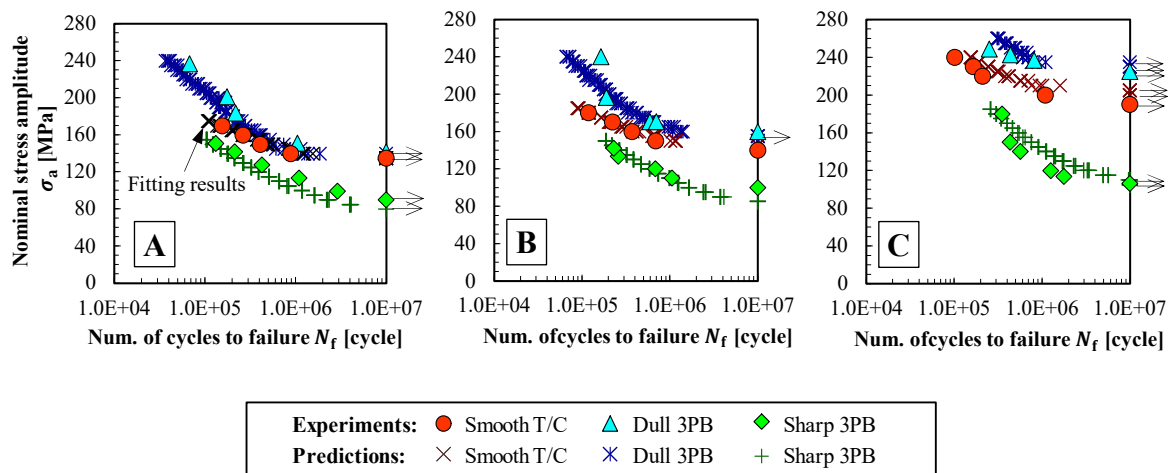


Fig. 10 実験結果との比較による開発した統合化モデルの妥当性検証結果 (SN 曲線による比較)

5. 結論

本研究では、疲労損傷による構造体の寿命を亀裂進展のみで評価することをコンセプトとして、疲労寿命を定量的に予測するために、有限要素解析・材料組織、亀裂進展を対象としたマルチスケールのサブモデルによって構成された統合化モデルの開発を行った。合計 9 種類の疲労試験 (3 種類の供試鋼・3 種類の試験片形状・外力条件) において得られた SN 曲線を対象として、開発した統合化モデルによる予測結果との厳格な比較を行った。その結果、全ての条件に対して高精度な予測が可能であることが示され、開発した統合化

モデルの妥当性が実証された。

今後は、ベイナイトやマルテンサイトなどより複雑な微視組織を有する材料、さらには、実構造物における最重要課題である溶接部への適用性拡大を行う予定である。

謝辞

本研究は、2019 年度公益財団法人 JFE21 世紀財団技術研究助成鉄鋼技術研究により実施されたものです。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- [1] K. Shibamura, K. Ueda, H. Ito, Y. Nemoto, M. Kinefuchi, K. Suzuki, M. Enoki, Model for predicting fatigue life and limit of steels based on micromechanics of small crack growth, Mater. Des. 139 (2018) 269–282.
- [2] H. Nishikawa, Y. Furuya, Development of Microstructurally Small Fatigue Crack Initiation and Growth Evaluation Method Using Automatic In-situ Observation System with Digital Image Correlation Technique, Tetsu-to-Hagane. (2019) 1–2.
- [3] J.C. Newman, A crack opening stress equation for fatigue crack growth, Thought A Rev. Cult. Idea. 24 (1984) 131–135.
- [4] J. Li, Z. Zhang, C. Li, An improved method for estimation of Ramberg-Osgood curves of steels from monotonic tensile properties, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 39 (2016) 412–426.
- [5] G. Masing, Eigenspannungen und verfestigung beim messing, in: Proc. Second Int. Congr. Appl. Mech., Zurich, Switzerland, 1926: pp. 332-335 (in German).
- [6] K. Tanaka, Y. Akiniwa, Y. Nakai, R.P. Wei, Modelling of small fatigue crack growth interacting with grain boundary, Eng. Fract. Mech. 24 (1986) 803–819.