フェライト-マルテンサイト二相組織鋼のき裂発生に及ぼす 微視的不均質形態の影響に関する解析的検討[†]

望月正人* 小原 勝** 島貫広志***
萩原行人*** 豊田政男*

Analytical Study on Effects of Microscopic Heterogeneity on Crack Generation in Ferrite/Martensite Dual-Phase Steels

by

Masahito MOCHIZUKI*, Masaru KOHARA**, Hiroshi SHIMANUKI***,
Yukito HAGIWARA*** and Masao TOYODA*

Numerical analysis is conducted in order to study the effects of microscopic heterogeneous morphology on crack generation in ferrite/martensite dual-phase steels. The macro-model of three-point bending specimen and the micro-model of heterogeneous phases are connected with a boundary condition in the analysis. Stress distribution near fatigue precrack tip in the three-point bending specimen is calculated by the macro-model, and the stress-ratio of the triaxiality is used for the boundary condition of the micro-model. Microscopic unit cell is modeled by considering the strength heterogeneity between ferrite and martensite phases in a ferrite/martensite dual-phase steel. The relation between the characteristics of stress distribution and the heterogeneous morphology are clarified from the numerical analysis, and the location of crack generation is investigated. The heterogeneous morphology in the micro-model and CTOD in the macro-model are related by using the both results of the analytical models. The effects of the heterogeneous morphology on crack generation are discussed.

Key words: Microscopic heterogeneity, Crack generation, Ferrite/martensite steel, Dual-phase steel, Elastic-plastic stress analysis, Macro-micro coupled analysis, Material design

1 緒 言

材料の加工硬化特性の制御方法の一つとして二相組織を利用する方法があるが、二相組織をもつ材料の破壊特性は材料の微視的不均質形態に影響を受ける。このような二相組織材料の最終的な破壊特性に影響を及ぼす不均質形態に関する因子については従来から実験的な検討が行われ、二相の体積率や分布形態などが大きく影響を及ぼすことが指摘されている。^{1)~10)}

一方、微視的不均質を有する材料の巨視的な特性と微視的な因子の関係を実験的アプローチだけでなく数値解析によって検討することは、材料設計にとってより有益な情報を与えるものである。すなわち、二相組織であることに起因する微視的な強度不均質によって生じる応力・ひずみ分布などの力学的特性の違いが材料の破壊特性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、従来から微視的不均質因子に注目し、種々の解析モデルを用いて応力・ひずみ分布が機械的性質や最終的な破壊特性に及ぼす影響に関する検討がなされている。^{11)~26)}

二相鋼の破壊に及ぼす微視的不均質形態の影響について考える場合、最終的な破壊特性のみならず、破壊の芽となるき裂の発生およびその後の伝ばについて検討しておくことが重要となってくる。そこで本研究では、まず、軟質相としてフェライト、硬質相としてマルテンサイトからなるフェライト-マルテンサイト二相組織鋼を用いて、微視的不均質形態がき裂の発生および伝ばに及ぼす影響を明確化することを試みた。すなわち、前報²⁷⁾において、不均質形態を変化させるために熱処理条件をわざとに変化させ、それぞれの相の材質はほぼ等しいまま異なる体積率を有する二種類の二相組織鋼を作製し、三点曲げ試験により疲労予き裂先端近傍に発生したき裂を観察することによって、微視的不均質形態とき裂の発生および伝ば挙動との関係について考察した。その結果、二相材料の破壊特性を制御するには、材料の微視的不均質形態とき裂発生位置との関係を把握すること、き裂発生に及ぼす応力・ひずみ分布などの力学的要因を明確化することが重要であるとの方向性が示唆された。そこで

[†] 原稿受理 平成14年8月6日 Received Aug. 6, 2002

本報を「微視的不均質をもつ複合組織鋼の材料特性制御 (第2報)」(Control of Material Characteristics in Multiple-Phase Steels with Microscopic Heterogeneity, II)とする。

また、前報は材料52巻8号932頁に掲載済である。

* 正会員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Sci., Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

** 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Sci., Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

*** 新日本製鐵(株)技術開発本部鉄鋼研究所 〒293-8511 富津市新富, Steel Res. Lab., Nippon Steel Corporation, Shintomi, Futtsu, 293-8511

本報では、微視的不均質をもつフェライトーマルテンサイト二相組織鋼のき裂発生に及ぼす不均質形態の影響を、マクロな CTOD とミクロな不均質形態を数値解析結果から関連づける手法を用いることによって検討することを試みた。具体的には、マクロな三点曲げ試験片モデルから求めたき裂発生時におけるき裂先端近傍の応力状態を模擬させたミクロな 3 次元微視的モデルを用い、大変形有限要素法弾塑性解析結果から第二相の形状、分布形態、体積分率などと応力・ひずみ分布との相関を把握することによって、二相鋼に発生するき裂に対して不均質形態と CTOD の関係から材料設計を行うに当たっての第二相の形状や分布形態などのあり方について検討を行った。

2 解析方法

2・1 三点曲げ試験片モデルと微視的モデル

体積分率の異なるフェライトーマルテンサイト二相組織鋼を用いて、三点曲げ CTOD 試験によってき裂を発生させた結果、疲労予き裂の先端近傍にぜい性的な微小き裂が観察された。また、ほとんどのき裂は体積分率に関わらず疲労予き裂先端近傍のフェライト相内に存在していた。²⁷⁾このような微小き裂の発生に及ぼす微視的不均質形態の影響について検討するために、三点曲げ試験片の疲労予き裂先端近傍における応力状態を境界条件とした微視的モデルの応力解析を行った。すなわち、Fig. 1 に示すように、まず、実際の三点曲げ試験片における疲労予き裂先端近傍での多軸応力状態を大変形弾塑性有限要素解析により求め、得られた微小き裂の発生領域での応力状態を境界条件として二相の不均質形態を考慮した微視的モデルを用いて解析を行った。

2・2 微視的モデルの境界条件

不均質形態を考慮した微視的モデルの解析では、発生したき裂の観察結果を受け、三点曲げ試験片の破壊起点である疲労予き裂先端近傍の応力状態を考慮して行った。すなわち、微小き裂が発生した疲労予き裂先端近傍の多軸応力状態を微視的モデルの境界条件とした。

三点曲げ試験片の疲労予き裂先端近傍の多軸応力状態を把握するために、Fig. 2 に示す 3 次元モデルを用いて解析を行った。試験片形状の対称性を考慮して、1/4 モデルとした。解析に用いた相当応力-相当塑性ひずみ曲

Fig. 2. Configuration of a three-point bending specimen model for macroscopic analysis.

線を Fig. 3 に示す。微視的モデルは系統的な比較検討が行えるモデルとしてフェライト体積分率を 60% と 80% に設定するため、ここでもフェライト体積分率を 60%, 80% とした三点曲げ試験片の解析を行った。なお、応力-ひずみ曲線は、実験結果²⁷⁾から今回の材料では混合則を用いることができることが確認できていたことから、次項に示すフェライト相とマルテンサイト相のそれぞれの応力-ひずみ曲線から体積分率と混合則にしたがって決定した。

疲労予き裂先端近傍での多軸応力状態の数値解析結果を Fig. 4 に示す。き裂進展方向となる x 方向の垂直応力 σ_{xx} に対する各直交方向の垂直応力の比を示している。疲労予き裂先端近傍の要素の各軸方向の垂直応力の平均値をき裂先端近傍における各軸方向の垂直応力とした。ここで、垂直応力の平均値を求める範囲は、実際の実験結果による微小き裂の発生領域を参考にして決定したが、

Fig. 3. Equivalent stress-equivalent plastic strain curves for macroscopic analysis.

Fig. 1. Analytical flow of dual-phase steels with microstructural heterogeneity by using macroscopic and microscopic models.

Fig. 4. Distribution of stress triaxiality near fatigue precrack tip in three-point bending specimen model.

この領域内において応力勾配はそれほど急激ではなく、すでに比較的なだらかな分布となっていたことから、平均値としての垂直応力を用いることは妥当であると考えられる。図からわかるように、フェライト 60% 鋼、フェライト 80% 鋼ともに、予想されるき裂発生時の CTOD 値におけるき裂発生領域での応力比は $\sigma_{xx} : \sigma_{yy} : \sigma_{zz} = 1 : 1.5 : 1$ となる。微視的モデルの解析では、境界条件としてこの応力比を満足するように各軸方向に負荷を与えた。

2・3 不均質を考慮した微視的モデル

実際のフェライト-マルテンサイト二相組織鋼の組織写真の一例を Fig. 5 に示す。今回の実験のために特殊な二相域熱処理を施していること²⁷⁾から、通常の鋼材に比べてかなり大きめの結晶粒径になっていることがわかる。これらの材料による実験結果²⁷⁾から、マルテンサイトに挟まれたフェライト相内もしくは比較的大きなフェライト相内でのき裂の発生が支配的であったことから、実際の寸法を考慮に含みつつ、荷重負荷方向に対するマルテンサイト相の配列方向に注目し、Fig. 6 に示すような基本的な微視的モデルを用いて解析を行った。Fig. 6 (a) は最大負荷方向である y 方向に対し、第二相であるマルテンサイト相がある程度の角度を持ち、対角線上に分布しているモデル (Diagonal model), Fig. 6 (b) は y 方向に対し、第二相のマルテンサイト相が平行に分布しているモデル (Parallel model) である。図中に示した微視的モデルのシリーズは、モデルにおける二相のフェライト体積率を 60% および 80% とすることにより、第二相の形状、負荷方向に対する三次元的な分布形態、体積分率、第二相の最近接距離などの影響を系統的に考慮できるように設定している。また、比較のためにマルテンサイト相が母地となり、独立したフェライトがその中に存在している状態を模擬したモデル (この場合、二相のフェライト体積率は 20% および 40% になる) についても検討を行う。これらの解析モデルを用いることによって、同じ体積分率を持つ鋼材でもき裂発生領域近傍の不均質形態の違いによってき裂の発生特性が異なる結果を示した実験結果を、定性的に説明することが可能になると考えられる。

微視的モデルの境界条件を Fig. 7 に示す。前項で示した応力比を満足するように、各軸方向に垂直応力を与えた。また、モデルの連続性を保つために、各境界面が平

Fig. 5. Example of microstructures of a dual-phase steel.

(a) Diagonal type of matrix

(b) Parallel type of matrix

Fig. 6. Configurations of microscopic models for dual-phase steels.

面を保つような境界条件を与えた。Fig. 8 にフェライト相、マルテンサイト相に用いた相当応力-相当塑性ひずみ曲線を示す。実験で得られた鋼材中のマイクロ組織の硬さとマクロな機械的性質から混合則により求めている。

3 き裂発生に関する検討

3・1 き裂発生相の検討

まず、き裂がフェライト相に集中して発生していたことを検討するため、四種類の微視的モデルを用いた解析結果を比較する。用いたモデルは Fig. 6 中に示す F60-1-

Fig. 7. Boundary conditions of microscopic model under stress triaxiality near fatigue precrack tip.

Fig. 8. Equivalent stress-equivalent plastic strain curves for microscopic analysis.

Fig. 9. Comparison of maximum principle stress distribution in ferrite and martensite phases.

1, M60-1-1, F60-1-2, M60-1-2 で、母地となっている材料、第二相の最大負荷方向に対する分布形態が異なる。なお、き裂の発生はぜい性的であったため、ここでは最大主応力 σ_1 を用いて整理した。Fig. 9 に解析結果として、マクロモデルにおけるき裂発生時に相当する最大負荷方向の応力 $\sigma_{yy} = 1300\text{MPa}$ 時の各モデルにおける球体の第二相の中心点を結ぶ線、 x 線上での最大主応力 σ_1 、ならびにそれを各相の降伏応力で除して無次元化した値 σ_1^F/σ_Y^F , σ_1^M/σ_Y^M を示す。母地がフェライト相である F60-1-1, F60-1-2 はマルテンサイト相が母地である M60-1-1, M60-1-2 に比べて各相の応力が高くなっている。これは、等しい負荷応力レベルでは母材がフェライト相のモデルの方が変形量が大きく、ひずみが大きくなったことに起因する応力上昇と考えられる。また、母材がフェライト相でマルテンサイト相の分布が最大負荷方向に対し平行になると、フェライト相の応力はさらに高くなる。ここで、フェライト相のき裂発生について考えると、二相の強度が異なるため、応力値そのものによる比較はできない。そこで、応力を各相の降伏応力で除して無次元化した値で比較すると、どのモデルにおいてもフェライト相内の応力の方がマルテンサイト相の数倍程度の値を示している。すなわち、各相の強度レベルからみた応力

の負担量はフェライト相の方が格段に大きいと言える。今回用いた材料の各相のき裂発生限界値については定量的な比較はできないものの、どのような不均質形態に対しても降伏応力に対する応力分布の比がマルテンサイト相に比べて明らかに大きいフェライト相で微小き裂が優先的に発生したと考えることが妥当であると見なせる。

3・2 不均質形態の影響

3・2・1 影響因子と評価方法 次に、微視的な不均質形態がフェライト-マルテンサイト二相鋼のき裂発生・破壊特性に及ぼす影響を検討する。実際の微小き裂の発生箇所としては、フェライト 30% 鋼では記号 F60 から始まるマイクロモデルで代表されるマルテンサイトに挟まれたフェライト相内が、フェライト 70% 鋼では応力集中の少ない記号 F80 から始まるモデルで代表される単独で大きなフェライト相内が支配的であった。このことから、微視的モデルにおいて第二相に挟まれた最短直線距離上のフェライト相での最大主応力の平均値をパラメータとして、それぞれの巨視的な材料特性をもつ三点曲げ試験片による CTOD との関係と比較することによって、不均質形態がき裂発生に対する抵抗力に及ぼす影響について検討した。

微視的モデルと巨視的な三点曲げ試験片モデルを連結させた評価方法を Fig. 10 に示す。三点曲げ試験片におけるき裂開口応力 σ_{yy} とき裂先端開口変位 d 、最大負荷応力 σ_{yy} と ξ 線上でのマルテンサイト相に挟まれたフェライト相の最大主応力の平均値 $\sigma_1^F(\xi)$ の関係から σ_{yy} を媒介として、き裂開口変位と最大主応力の平均値の関係を導く。すなわち、疲労予き裂先端近傍の全体が高応力域になっている中でも、マルテンサイト相に挟まれたフェライト相では応力がさらに集中して発生していることから、上述のような最大主応力の平均値をき裂発生に対す

る評価指標とした。

き裂開口応力 σ_{yy} - 開口変位 δ の関係はき裂先端近傍の材料特性に支配されるので、Fig. 11 に示すように三点曲げ CTOD 試験片全体のフェライト体積率が 60%、80% である場合の応力-変位関係をマクロモデルの応力-変位関係として用いた。また、最大主応力の平均値は上述のように最も微小き裂が発生しやすいと考えられる位置での支配的な応力として用いた。この二つの値を用いることで、同一開口変位においての応力値が比較でき、き裂発生に及ぼす微視的不均質形態の影響について検討できることになる。

3・2・2 第二相の近接距離の影響 まず、第二相であるマルテンサイト相の最近接距離と CTOD の関係を検討する。比較の一例として、微視的モデルの対角線上に第二相が存在する場合 (Diagonal model) において、同一の CTOD 値に対するマルテンサイト相に挟まれたフェライト相内の最大主応力の平均値の関係を Fig. 12 に示す。マルテンサイト相が距離が接近している方が同一開口変位においてフェライト相内の最大主応力の平均値は高くなる。荷重負荷方向に対して平行にマルテンサイト相が分布するモデル (Parallel model) においても同様の結果が得られた。すなわち、第二相が接近している方が第二相間に応力が集中し、結果としてき裂が発生して破壊が起こりやすくなると考えられる。このことは、前報²⁷⁾

Fig. 10. Evaluating flow of crack generation in dual-phase steels by using macroscopic and microscopic models.

Fig. 11. Relation between crack tip opening displacement and fatigue precrack opening stress in three-point bending specimen.

Fig. 12. Effect of distance between martensite and martensite on crack generation in ferrite phase (Diagonal model).

で示した体積分率の異なる試験片による実験結果とも対応している。すなわち、フェライト体積分率の少ない鋼材の方がマルテンサイト相の近接が必然的に多く見られることになり、マルテンサイト相に挟まれたフェライト相内でき裂が発生しやすくなると考えられる。

3・2・3 第二相の分布形態の影響 次に、最大負荷方向に対する第二相の分布形態について検討する。まず、最大負荷方向に対するマルテンサイト相の分布形態とCTODの関係をフェライト体積分率60%の場合についてFig. 13に示す。最大負荷方向に対して球状のマルテンサイト相が平行に並んでいる場合 (Parallel model) と斜めに並んでいる場合 (Diagonal model) を比較すると、破壊発生位置近傍では最大主応力方向に平行にマルテンサイト相が並んでいる場合の方が同一開口変位において応力値が高くなる。フェライト体積分率を変化させた場合でも同様の結果が得られている。すなわち、最大負荷方向に対し、マルテンサイト相が平行に分布するような分布形態は応力が集中しやすく、斜めに並んでいる場合に比べてき裂が発生して破壊が起こりやすいと考えられる。

次に、マルテンサイト相の形状として、アスペクト比を変化させた場合について検討する。最大負荷方向に対してマルテンサイト相が平行に並んでいる場合 (Parallel model) におけるマルテンサイト相のアスペクト比とCTODの関係をFig. 14に示す。これより、第二相が球形に近いほど応力値が低くなることがわかる。マルテンサイト相が最大負荷方向に対して斜めに並んでいる場合 (Diagonal

model) についても同様の結果になる。すなわち、第二相のアスペクト比を1に近づけるようにすることにより、同一開口変位に対して発生する応力を低減し、き裂の発生を抑制することができる。

これらの結果は前報²⁷⁾の実験による観察結果からは必ずしも定量的に導き出されてはいないが、解析結果が定性的に妥当な方向を与えているとすれば、試験本数を多くして統計的な処理を行うことにより定量的に検証することができると考えられる。さらに、今回の解析結果は、高張力鋼の溶接熱影響部に生成する島状マルテンサイトのじん性向上法として実験的に得られた結論²²⁾とも矛盾しない結果となっている。ただし、すべてのマクロな応力状態と微視的不均質形態の相関について検証したわけではないので、今回の結果を他のケースに直接適用するには十分な注意が必要である。

また、今回のような応力解析手法はフェライトーマルテンサイト二相鋼だけでなく、フェライトーベイナイト二相鋼、二相ステンレス鋼や、局部的硬化部が存在する高強度鋼多層溶接継手の熱影響部など、微視的強度不均質を有する材料の設計に利用できる。すなわち、マクロな試験片モデルとミクロな微視的モデルを関連づけた数値解析手法を用いることによって、微視的不均質の観点から材料の破壊特性向上のために制御すべき因子の影響について有益な情報を与えることができる。

4 結 言

フェライトーマルテンサイト二相組織鋼の不均質形態がき裂発生に及ぼす影響を検討するため、マクロな試験片モデルとミクロな3次元微視的モデルによる有限要素法解析を行い、それらの結果を関連づける手法を用いることによって、マクロなCTODとミクロな不均質形態の関係を考察した。

- (1) 三点曲げ試験片の応力解析により、疲労予き裂近傍のき裂発生位置における応力状態を把握した。
- (2) 巨視的解析による境界条件を入力した微視的モデルによる解析により、不均質形態と応力・ひずみ分布特性との関係を求めることができた。
- (3) フェライト相中に発生するき裂に対し、不均質形態とCTODの関係を検討し、第二相の形状や分布形態などのあり方に関する知見を得た。

参 考 文 献

- 1) たとえば、古川 敬, 日本金属学会会報, **19**, 439 (1980).
- 2) 鈴木秀人, 山田邦博, 清水真佐男, 国尾 武, 日本機械学会論文集, **1-40**, 23 (1974).
- 3) T. Kunio, M. Shimizu, K. Yamada and H. Suzuki, Eng. Fract. Mech., **7**, 411 (1975).
- 4) 鈴木秀人, 国尾 武, 材料, **28**, 478 (1979).
- 5) 富田恵之, 沖 幸男, 岡林邦夫, 鉄と鋼, **64**, 78 (1978).
- 6) N. J. Kim and G. Thomas, Met. Trans. A, **12A**, 483 (1981).
- 7) A. F. Szewczyk and J. Gurland, Met. Trans. A, **13A**, 1821 (1982).
- 8) Y. L. Su and J. Gurland, Mat. Sci. Eng., **95**, 151 (1987).

Fig. 13. Effect of relative position of martensite phase on crack generation in ferrite phase.

Fig. 14. Effect of aspect ratios of martensite phase on crack generation in ferrite phase.

- 9) 雑賀雅之, 清水真佐男, 日本機械学会論文集, A-54, 2034 (1988).
- 10) 南二三吉, 加藤孝憲, 野口泰隆, 寺井大造, 豊田政男, 島貫広志, 日本造船学会論文集, 183, 361 (1998).
- 11) B. Karlsson and B. O. Sundstrom, Mat. Sci. Eng., 16, 61 (1974).
- 12) H. Fischmeister and B. Karlsson, Z. Metallkde., 68, 311 (1977).
- 13) J. Jinoch, S. Ankem and H. Margolin, Mater. Sci. Eng., 34, 203 (1978).
- 14) R. E. Smelser, J. L. Swedlow and J. C. Williams, ASTM STP 651, 200 (1978).
- 15) 浅岡憲三, 日本金属学会誌, 43, 557 (1979).
- 16) Z. H. Li, Y. L. Wang, J. H. Luo and Z. B. Kuang, Proc. 5th Int. Conf. Mech. Beh. Mat., 1, 163 (1987).
- 17) 渡部義之, 西岡 潔, 為広 博, 材料とプロセス, 2, 886 (1989).
- 18) 鹿内伸夫, 香川裕之, 栗原正好, 田川寿俊, 鉄と鋼, 76, 89 (1990).
- 19) 西田真之, 英 崇夫, 藤原晴夫, 材料, 38, 576 (1989).
- 20) F. Havlicek, 徳田 正孝, 日野 省司, 材料, 39, 1526 (1990).
- 21) 南二三吉, 荊 洪陽, 豊田政男, 川端文丸, 天野虔一, 日本造船学会論文集, 171, 427 (1992).
- 22) 川端文丸, 天野虔一, 板倉教次, 南二三吉, 荊 洪陽, 豊田政男, 日本造船学会論文集, 173, 349 (1993).
- 23) 東郷敬一郎, 大塚昭夫, 田川哲哉, 56, 2417 (1990).
- 24) 坂本正雄, 二瓶正俊, 材料, 48, 44 (1999).
- 25) 遠藤 茂, 石川信行, 栗原正好, 鈴木信久, 加藤昭彦, 吉川正樹, 溶接構造シンポジウム'99, 79 (1999).
- 26) 田中繁之, 富田佳宏, 陸 偉, 日本機械学会論文集, A-66, 454 (2000).
- 27) 望月正人, 小原 勝, 島貫広志, 萩原行人, 豊田政男, 材料, 52, 932 (2003).