

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760075

研究課題名 (和文) 層状組織鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす材料組織レベルの微視的残留応力の影響の解明

研究課題名 (英文) Effect of microscopic residual stress on the characteristics on fatigue crack propagation of lamellar-microstructure steel

研究代表者

三上 欣希 (MIKAMI YOSHIKI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40397758

研究成果の概要 (和文)：

層状組織鋼に存在する微視的残留応力の数値解析手法を構築し、微視的残留応力分布を明らかにした。その結果、フェライト相に引張、マルテンサイト相に圧縮の微視的残留応力が存在し、疲労き裂進展経路が迂回、屈曲することを微視的残留応力の観点から説明することができた。さらに、微視的残留応力が存在するもとのき裂進展解析手法も構築し、き裂進展解析を行った。その結果、マルテンサイト相に存在する圧縮の残留応力によってき裂進展速度が低下することを示した。

研究成果の概要 (英文)：

A numerical simulation method to calculate microscopic residual stress distribution in lamellar microstructure steel was developed. The calculated microscopic residual stress was compressive in martensite phase and tensile in ferrite phase. Fatigue crack propagation path observed in experiments is reasonable in terms of the simulated results. Crack propagation analysis method under microscopic residual stress state was also developed. It was shown that the crack propagation rate decreases when compressive residual stress exists in martensitic phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：層状組織鋼、疲労き裂進展特性、微視的残留応力、マイクロ組織、相変態、変態膨張、強度不均質、数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

鉄鋼材料の疲労強度は鋼構造物の安全性を確保し、長寿命化を達成するために重要な

特性である。従来の知見では、疲労強度は、材料の強度レベルによってほぼ支配され、マイクロ組織の影響はほとんどないとされてき

た.ところが、近年、鋼材マイクロ組織の制御による疲労強度の向上に関する報告がなされている。図1に示すように、フェライト相とマルテンサイト相が層状に分布したマイクロ組織を有する層状組織鋼では、層状組織に直交する方向に初期き裂を導入して疲労試験を行ったところ、図2に示すように疲労き裂の迂回や分岐を生じて、見かけの疲労き裂進展速度が低下し、疲労寿命が向上するとされている。一方、圧延方向、すなわち、層状組織に平行な方向に1%の引張予ひずみを付与した場合についても同様にして疲労試験を行ったところ、疲労き裂の迂回や分岐は生じないことが示された。

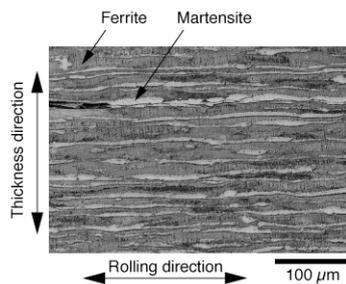


図1 層状組織鋼のマイクロ組織

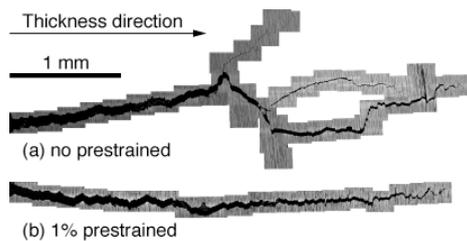


図2 層状組織鋼における疲労き裂進展経路

これらの試験結果より、層状組織鋼における疲労き裂進展特性の支配因子を考えると、大きく次の二点が指摘されている。まず、第一に、強度レベルの異なるフェライト相とマルテンサイト相が層状に分布していることにより、相対的に硬質なマルテンサイト相が、き裂の直進を妨げ、迂回や屈曲をもたらすと考えられる。硬質な第二相が疲労き裂進展特性に及ぼす影響については、強度比や分散形態に注目した検討がこれまでも報告されている。第二に、フェライト相とマルテンサイト相の層状組織の形成過程を考えると、鋼材製造時の冷却・圧延プロセスにおいて、両相の相変態温度が異なることにより、材料組織レベルで微視的な残留応力が発生しており、これが疲労き裂進展特性に影響を及ぼしていると考えられる。これまでに、このような材料組織レベルの微視的残留応力に注目して鋼材の疲労き裂進展特性を検討した例はほとんどない。

## 2. 研究の目的

本研究では、フェライト相とマルテンサイト相が層状に分布した層状組織鋼を対象として、その疲労き裂進展特性に及ぼす材料組織レベルの微視的残留応力の影響を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 層状組織鋼に生じる微視的残留応力分布の数値シミュレーション

層状組織のマイクロ組織を考慮して図3に示す数値解析モデルを作成した。この層状組織モデルのフェライトおよびマルテンサイトのそれぞれに、図4(a)に示す変態膨張特性および図4(b)に示す強度特性の温度依存性を与えた。なお、これらの材料特性は、EPMA（電子線マイクロアナライザ）により測定した化学組成分布を考慮して引張試験結果などから決定したものである。この数値解析モデルを完全オーステナイト領域である900℃から0℃まで一様に冷却すると、フェライトとマルテンサイトとで、変態膨張温度および強度特性の温度依存性が異なることにより、層状組織の形成にともなって発生する微視的な残留応力分布を数値解析により求めることができる。

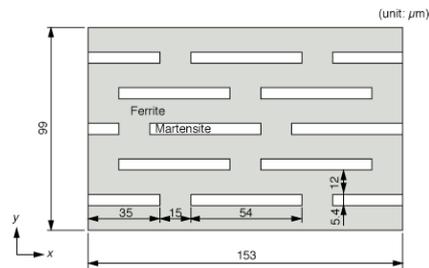


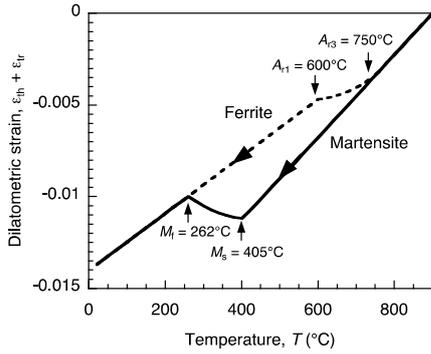
図3 微視的残留応力の数値解析モデル

### (2) 引張予ひずみによる微視的残留応力分布変化の数値解析

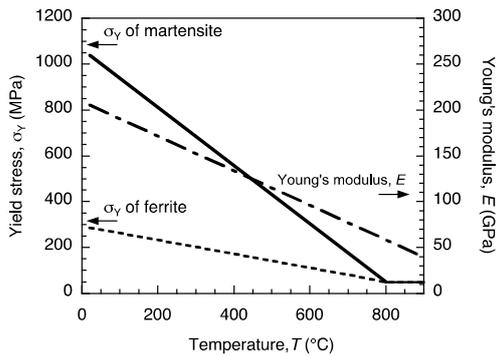
さらに数値解析モデルに引張予ひずみを付与することにより、残留応力分布がどのように変化するかについて数値解析を行った。数値解析モデル端部の節点に対して、全体のひずみが1%になるまで強制引張変位を加えた後、変位を解放した。

### (3) マイクロインデンテーション法による微視的残留応力の計測の試み

層状組織鋼は、図1に示すようなマイクロ組織を有し、マルテンサイト層厚さは10 μm以下程度である。このような微小領域での残留応力を測定するために、マイクロインデンテーション法について検討した。本手法は、押し込み位置の応力状態によって材料の荷重-押し込み深さ曲線が変化することを利用して、微小領域の応力状態を推定するものである。



(a) 変態膨張特性



(b) 強度特性の温度依存性

図4 数値解析に用いた材料特性

(4) 微視的残留応力場におけるき裂進展挙動の数値シミュレーション

方法(1)で得られた層状組織鋼における微視的残留応力場を初期状態として、き裂進展解析を行い、き裂進展に及ぼす微視的残留応力場の影響を検討した。

き裂進展特性の評価に用いた数値解析モデルを、図5に示す。フェライトを母相とし、ひとつのマルテンサイト相が存在するものを考えた。フェライト組織中に点 $\alpha$ に先端を有する初期き裂が存在し、数値解析モデルの左端を固定し、右端に変位を与えることにより、次第にき裂が進展し、マルテンサイト組織に到達・進入する。この数値解析モデルを用いて、以下の検討を行った。

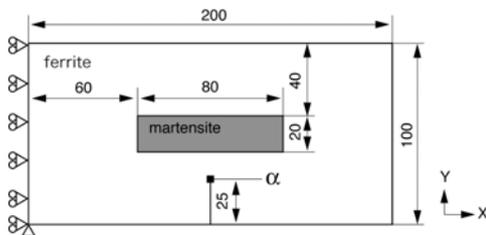


図5 き裂進展の数値解析モデル。

①き裂進展特性に及ぼす強度特性の影響の検討

マルテンサイト相の硬質第二相としてのき裂進展特性に及ぼす影響を明らかにする

ため、相変態誘起型残留応力を考慮せずに、マルテンサイト相の強度レベルのみを変化させた。

②き裂進展特性に及ぼす相変態誘起型残留応力の影響の検討

マルテンサイト相の生成による相変態誘起型残留応力がき裂進展特性に及ぼす影響を明らかにするため、マルテンサイト相の強度レベルはフェライト相と同じであると仮定して、相変態誘起型残留応力の大きさのみを変化させた。

4. 研究成果

(1) 層状組織鋼に生じる微視的残留応力分布の数値解析結果

微視的残留応力分布の数値解析結果を図6に示す。図6は図3に示した数値解析モデル内のフェライトおよびマルテンサイトにおける、疲労き裂進展経路に対して直角方向(x方向)の応力 $\sigma_x$ の板厚方向応力(y方向)分布である。

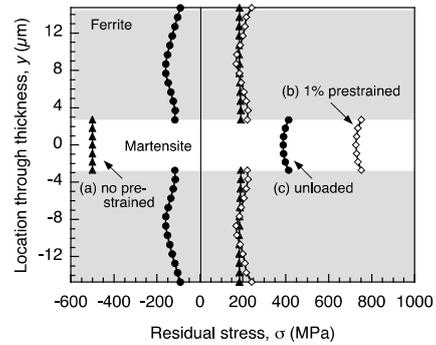


図6 微視的残留応力分布の数値解析結果。

まず、図6(a) no prestrainedは、相変態による層状組織の形成にともなって発生した微視的な残留応力分布である。マルテンサイト内が圧縮、フェライト内が引張の残留応力分布となっている。これに1%の引張予ひずみを加えた状態が図6(b) 1% prestrainedであり、フェライトおよびマルテンサイトの両方の領域で引張応力となっている。ただし、図6(a)の微視的残留応力分布が全体的に増加するのではなく、マルテンサイト内の応力が大幅に引張側に变化している。これは、フェライトがマルテンサイトよりも先に降伏して、その後、応力が増加しないからである。1%の予ひずみを加えた引張強制変位を除去すると、微視的応力分布は図6(c) unloadedへと変化する。このときは、図6(b)の応力分布がそのまま平行移動するように圧縮側に变化していることが分かる。その結果、マルテンサイト内では引張、フェライト内では圧縮の残留応力分布となっており、引張予ひずみを付与する前の、図6(a)の分布とは反転している。

(2) 微視的残留応力分布と疲労試験結果の関係に関する考察

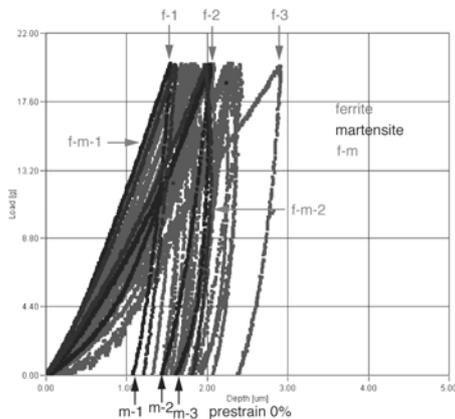
以上のように、微視的残留応力分布の数値解析により、マルテンサイト内の残留応力は引張予ひずみの付与によって、圧縮残留応力から引張残留応力へと変化することを明らかにした。疲労き裂との関係について考えると、マルテンサイト内が圧縮残留応力場の場合には、マルテンサイトを貫通して進展することが困難である。一方、引張予ひずみを加えてマルテンサイト内が引張残留応力場となった場合には、マルテンサイトを貫通して進展しやすくなるものと考えられる。このように、微視的残留応力分布の数値解析結果は、疲労試験結果とよい対応を示すことが確認できた。

(3) マイクロインデンテーション法による微視的応力状態の把握

マイクロインデンテーション試験後に確認した圧痕のうち、マルテンサイト組織およびフェライト組織内に存在するものの代表例をそれぞれ図7(a)および(b)に示す。また、マイクロインデンテーション試験によって得られた荷重-押し込み深さ曲線を、図7(c)に示す。なお、図7(c)では、圧痕がマルテンサイト組織内に存在する場合の試験結果を黒い実線で示し、フェライト組織内に存在する場合を灰色の実線で示している。これより、マルテンサイト組織における荷重-押し込み深さ曲線が圧縮残留応力を示唆する方向に存在することが分かる。すなわち、圧縮残留応力場により、同一荷重での押し込み深さが小さくなる傾向にある。



(a) マルテンサイト (b) フェライト



(c) 荷重-押し込み深さ曲線

図7 マイクロインデンテーション試験結果。

本研究では、微視的残留応力の定量的評価には至らなかったものの、応力状態によって荷重-押し込み深さ曲線が変化することを確認することができ、新たな残留応力測定手法としての可能性を見出すことができた。

(4) 微視的残留応力場におけるき裂進展挙動の明確化

き裂進展解析を行い、き裂進展特性に及ぼすフェライト・マルテンサイト層状組織の影響を強度特性および微視的残留応力の観点から検討した。

① き裂進展特性に及ぼす強度特性の影響

まず、微視的残留応力を考慮せず、初期は無応力の状態でマルテンサイト相の強度レベルのみを変化させたときの、き裂進展解析結果を図8に示す。図8の横軸は、図5に示した数値解析モデルの端部に境界条件として付与した変位量であり、縦軸は初期位置 $a$ からのき裂進展量である。また、M/Fはフェライト相とマルテンサイト相の強度レベルの比であり、M/F = 1.0の場合が、強度的にはフェライト単相に相当する条件であり、M/F = 2.9の場合が、本鋼材において測定したフェライト相およびマルテンサイト相の硬さ比と対応する条件である。これより、マルテンサイト相の強度が変化しても、フェライト相内ではき裂進展速度はほとんど変化しないことがわかる。一方、マルテンサイト相内では、マルテンサイト相の強度によりき裂進展速度が変化しており、マルテンサイト相の強度が高い(M/Fが大きい)ほどき裂進展速度が低下していることがわかる。

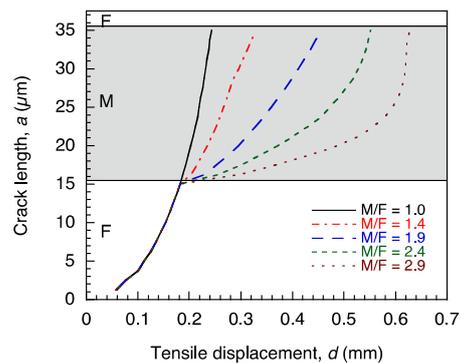


図8 き裂進展特性に及ぼす強度特性の影響の解析結果。

② き裂進展特性に及ぼす微視的残留応力の影響

続いて、マルテンサイト相の強度レベルはフェライト相と同じ(M/F = 1.0)であると仮定して、微視的残留応力のみが存在し、その大きさを変化させた場合のき裂進展解析結果を図9に示す。図9におけるRS-0は微

視的残留応力が存在しない場合であり、図 8 の M/F = 1.0 と同一の条件である。また、RS-2 は、研究成果(1) で得られた微視的残留応力に基づいて、マルテンサイト相内が -450 MPa 程度、フェライト相内が 150 MPa 程度の残留応力となる条件である。RS-0 から RS-4 に向かって、マルテンサイト相内の圧縮応力が増加、フェライト相内の引張応力が増加することになる。

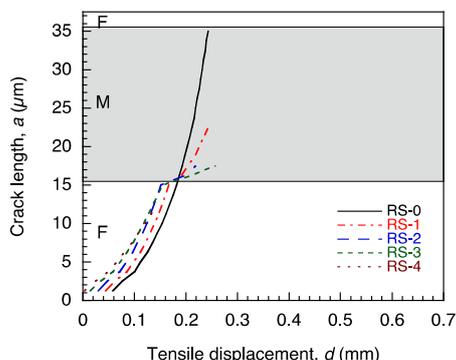


図 9 き裂進展特性に及ぼす相変態誘起型残留応力分布

図 9 より、マルテンサイト相内では、圧縮残留応力が存在することにより、き裂進展速度が低下しているが、その一方で、フェライト相内に生成する引張応力によって、フェライト相内のき裂進展速度はかえって上昇していることがわかる。相変態誘起型残留応力は、マルテンサイト相とフェライト相の厚さや長さによって変化するため、相変態誘起型残留応力の観点から、適切な層状組織形態を提案することができると考えられる。

### ③ き裂進展特性に及ぼす強度特性および微視的残留応力の影響

研究成果①および②をふまえて、フェライト相とマルテンサイト相の強度特性および微視的残留応力の両者を考慮した条件における、き裂進展解析結果を図 10 に示す。強度特性は M/F = 2.9 に相当するものであり、実材料における強度特性分布の下で、相変態誘起型残留応力分布が変化すること考慮した条件である。

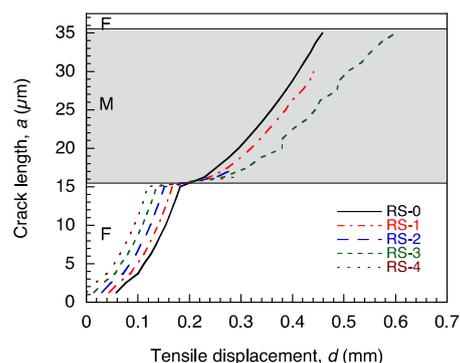


図 10 き裂進展特性に及ぼす強度特性および相変態誘起型残留応力分布の影響の解析結果

図 9 に比べてフェライト相内のき裂進展速度がやや変化しているのは、マルテンサイト相の強度が高いことを考慮したことにより、フェライト相内に生じる引張応力が大きくなったためである。図 10 より、マルテンサイト相内が圧縮残留応力となることにより、マルテンサイト相内のき裂進展速度は低下する傾向にあることがわかる。ただし、その低下の度合いは、マルテンサイト相の強度が低い方が顕著であり、マルテンサイト相の強度が高くなると、微視的残留応力の影響は小さくなる傾向にあるといえる。

以上のことから、層状組織鋼におけるマルテンサイト相を、微視的残留応力の生成源および硬質第二相として利用する場合には、適切な強度比と、必要な微視的残留応力を生成させるための組織形態があることがわかった。

本研究課題において構築した微視的残留応力の評価手法および微視的残留応力場におけるき裂進展解析手法を活用することで、疲労き裂進展特性向上に有効な組織形態を提案することが可能になる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① Y. Mikami, A. Inao, M. Mochizuki and M. Toyoda: Numerical simulation of transformation-induced microscopic residual stress in ferrite-martensite lamellar steel, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 165, No. 1, 012080 (2009). (査読あり)

〔学会発表〕(計 3 件)

① 稲生明弘, 三上欣希, 島貫広志, 望月正人: 予ひずみ付与によるフェライト・マルテンサイト層状組織鋼の微視的残留応力・ひず

み状態の計測，溶接構造シンポジウム 2009  
講演論文集，溶接学会 溶接構造研究委員会，  
pp. 425-428，大阪（2009年11月17・18日）。

② Y. Mikami, A. Inao, M. Mochiuki, K. Nakashima and H. Shimanuki: Transformation-Induced Microscopic Residual Stress in Ferrite-martensite Lamellar Steels and Its Influence on Fatigue Crack Propagation Paths, 19th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2009), ISOPE2009-TPC-550, Osaka, Japan (2009 June 21-26).

③ 稲生明弘，三上欣希，島貫広志，望月正人：フェライト・マルテンサイト層状組織鋼における微視的残留応力・ひずみ状態の実験的推定手法に関する検討，平成21年度溶接学会秋季全国大会，徳島（2009年9月9-11日）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三上 欣希 (MIKAMI YOSHIKI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40397758