Cr-Mo-V 鍛鋼の疲労損傷発生に対する統計的解析*

生野 健^{*1}, 後藤 徹^{*2}, 田中 健一^{*3}
植松 幹雄^{*4}, 隅田 武男^{*5}, 小西 隆^{*6}

Statistical Analysis of Fatigue Damage in Cr-Mo-V Steel Forging

Takeshi IKUNO, Toru GOTO, Kenichi TANAKA,
Mikio UEMATSU, Takeo SUMIDA and Takashi KONISHI

In this study, an attempt to analyze the fatigue damage in Cr Mo V rotor steel based on a probability theory or statistical mechanics was made. The following results were obtained: (a) A model of distributed "driving force" with uniform "fracture resistance" is applicable for the analysis of two phenomena, i. e., the fatigue crack initiation and the decrease of half value breadth of X ray diffraction profiles with an increase of fatigue damage in Cr Mo V steel forging. (b) The driving force shows an exponential distribution. The mean value of the distribution appears to be a monotonic function of the nominal strain of fatigue test. (c) It is reasonable to consider that the change of half value breadth of X ray diffraction profiles corresponds to the accumulation of fatigue damage before crack initiation.

Key Words: Fatigue X ray Diffraction, Life Prediction, Probabilistic Method, Statistical Treatment, Reliability

1. 緒言

蒸気タービンロータ材であるCr-Mo-V鍛鋼の疲労損傷評価は、近年の高頻度起動停止運転の増大により、ますます重要となっている。しかし、保守の立場から考えて最も望ましい疲労亀裂発生前の損傷評価法については、未だ十分満足できる状態にない。すなわち、疲労亀裂発生前の非破壊検査法として、硬さやX線回折半価幅の変化で判定する方法¹⁾等が実験的に開発されているが、その理論的根拠は明確でなく、検出精度等も未だ必ずしも十分でない。また、疲労亀裂発生の理論的研究においては、種々の説が出されている²⁾が、それらに基づいて定量的に亀裂発生を予測することは困難であり、X線回折半価幅等の変化と亀裂発生との関係も十分解明できていない。

一方、近年のコンピュータの進歩に伴い、種々の損傷発生をシミュレーションによって解析・評価しようとの試みが行われている。例えば大谷ら^{3)~5)}は、オ

ーステナイト系ステンレス鋼のクリープ疲労による粒界亀裂発生・成長に関して、各粒界ごとに破壊駆動力と破壊抵抗値を考え、それらの値の分布を適切に設定することにより、現実の亀裂発生・成長を模擬することが可能であることを示している。

そこで、本研究では、粒内疲労亀裂の発生とX線回折半価幅の変化に対し、基本的に大谷らのシミュレーションの考え方に沿いつつ、初歩の統計力学的考察を加味した解析を試みる。それによって得られる結果を以前に実施したCr-Mo-V鍛鋼の高温低サイクル疲労試験結果¹⁾と比較し、この解析法の粒内疲労亀裂発生に対する有効性を検討する。

2. X線回折半価幅変化と亀裂発生の解析

2.1 基本的な考え方 ここでは、疲労亀裂の発生やX線回折半価幅の変化を、実用的な精度で定量的に予測する解析法を得ることに重点を置き、それが現実の疲労損傷過程を忠実に再現しているかどうかの問題には、こだわらないこととする。すなわち、疲労損傷の機構は、未だ必ずしも十分に明らかにされていないので、ここでは、その詳細にこだわらず、解析によって得られた結果が実験結果と適合するかどうかで有効性を評価することとする。

* 原稿受付 1995年7月13日。

^{*1} 正員、関西電力(株) (〒661 尼崎市若王寺3-11-20)。^{*2} 正員、三菱重工業(株) (〒676 高砂市荒井町新浜2-1-1)。^{*3} 正員、住友金属テクノロジー(株) (〒660 尼崎市扶桑町1-8)。^{*4} 正員、住友金属工業(株) (〒541 大阪市中央区北浜4-7-28)。^{*5} 関西電力(株)。^{*6} 三菱重工業(株)。

このような方針の下に、粒内疲労亀裂発生現象を解析するため、次のように考える。まず、疲労亀裂の発生は、表層部における、スケール割れや微小な腐食孔ないし介在物等の周辺の、 μm^2 のオーダーの歪み集中領域の内、歪み集中が大きく、結晶方位的にも塑性歪みを生じやすい、最も亀裂が発生しやすい領域で起こると考える。そして、亀裂は、その領域全体に互る形で生ずると仮定する。すなわち、現実の亀裂は、あるいは、もっと微小なものから μm オーダーの長さまで成長するものであるという可能性も否定できないが、ここでは、条件が満たされると同時に μm オーダーの長さの亀裂が発生するとして、解析することとする。

この、最初に亀裂が発生する μm^2 オーダーの領域に対して、大谷らのシミュレーションと同様の解析を行うことを検討する。そのためには、まず、その領域を単位領域に分割し、各単位領域に破壊駆動力と破壊抵抗値を分布させなければならない。まず、これらについて検討する。

2.2 単位領域への分割 最も微細な疲労損傷としては、すべり線の密集したものや転位の集積したものなどが考えられる。したがって、疲労損傷の領域の単位としては、 nm^2 のオーダーの領域を取ることが適当と考えられる。すなわち、前項で考えた、最初に亀裂が発生する μm^2 オーダーの領域を、百万のオーダーの個数の nm^2 オーダーの領域に分割して考えることにより、解析を行うこととする。

2.3 破壊駆動力 ここでは、最も微細な疲労損傷は、転位の集積によって単位領域が損傷したものであると考える。したがって、破壊駆動力を、転位の集積の分布状態に等しく取ることとする。しかしながら、実際の転位集積の分布がどのようなものであるかは不明である。そこでここでは、便宜上、著者らが以前に行なったクリープキャビティ発生⁶⁾の考察と同様に、統計的に、次のように考えることとする。

nm^2 オーダーの単位領域の個数を M とし、転位の集積度を ε で表すこととする。 M 個の単位領域がそれぞれある値 ε の転位集積を生ずるという現象を、図1に示すような、 $\varepsilon = 0 \sim +\infty$ の半直線上に M 個の粒子

Fig.1 Model for distribution analysis of dislocation.

を投げ入れるモデルに置き換えて考える。半直線の原点 O から ε だけ離れた微小線分 $d\varepsilon$ に、1 個の粒子が入る確率 p_ε は、一般には ε の値によって異なり、次式で表されると考えられる。

$$p_\varepsilon = f(\varepsilon) d\varepsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき、それぞれ ε の位置にある各微小線分の中にそれぞれ m_ε 個の粒子が入る確率 $P\{m_\varepsilon\}$ は、次式で表される。

$$P\{m_\varepsilon\} = M! \times \prod_{\varepsilon} \frac{p_\varepsilon^{m_\varepsilon}}{m_\varepsilon!} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、下記の拘束条件がある。

$$\sum_{\varepsilon} m_\varepsilon = M \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sum_{\varepsilon} (\varepsilon \times m_\varepsilon) / M = \varepsilon_\mu \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに ε_μ は、考察の対象としている μm^2 のオーダーの領域の、平均的な転位集積度である。

求めるものは、(3)(4)式の拘束の下に(2)式の確率を最大にする m_ε の分布であるが、Lagrangeの未定係数法やStirlingの式を使って計算する⁶⁾⁷⁾と結果は、

$$m_\varepsilon \approx f(\varepsilon) \times \exp(-a - b \times \varepsilon) d\varepsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここに a 、 b はLagrangeの未定係数で、具体的な値は、(5)式を(3)(4)式に代入し、 Σ を $\int$ で置き換え積分を実行して、両式を連立することにより求める。そのためには、 $f(\varepsilon)$ を具体的に決めなければならないが、ここでは、取り扱いの簡単な

$$f(\varepsilon) \equiv c \quad c: \text{定数} \quad \dots\dots\dots (6)$$

について計算すると、(5)式は、

$$m_\varepsilon = M \times \frac{1}{\varepsilon_\mu} \times \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\mu}\right) d\varepsilon \quad \dots\dots\dots (7)$$

という指数分布になる。

このような、初歩的な統計力学的考察により、ここでは、 nm^2 オーダーの単位領域にかかる破壊駆動力の分布は、(7)式の指数分布になると仮定する。

2.4 破壊抵抗値 転位の集積による損傷に関する破壊抵抗値は、 μm^2 オーダーの領域内で、あまり大きく変化しないと考えられる。厳密には一定値で近似することには無理があるかもしれないが、ここでは、取り扱いの簡単な場合を考察することとして、破壊抵抗値は、全単位領域において等しい値であると仮定する。

2.5 疲労亀裂発生の検討 破壊抵抗値を E_f で表して、 E_f を超える破壊駆動力の作用した単位領域が損傷するとし、一旦、損傷した領域は二度と回復しないと考えて、損傷した領域がつながることにより亀裂が発生すると考える。ただしここでは、取り扱いを簡単にするため、次のように仮定する。まず、破壊駆動

力は、疲労の歪み繰返しごとに更新されるとし、以前の破壊駆動力の効果が残存して累積されることはないとする。また、破壊駆動力の分布の形は常に(7)式の指数分布であり、繰返し回数によって変化しないとする。そうして、損傷領域がつながる過程についても、詳細な条件は考えず、単に、損傷領域の密度がパーコレーションの浸透閾値⁹⁾に達したとき、 μm^2 オーダーの領域全体に互る損傷領域のつながりを生じて亀裂が発生すると考える。

このように考えるなら、疲労の歪み繰返し一回当たり、健全な領域から損傷領域へ変わるものの割合を r とすると、

$$r = \exp(-E_f / \varepsilon_\mu) \dots\dots\dots (8)$$

と表せる。したがって、歪み繰返しを n 回行なったときの損傷領域の密度 D_{fn} は、

$$D_{fn} = \sum_{i=1}^n r \times (1-r)^{i-1} \\ = 1 - \{1 - \exp(-E_f / \varepsilon_\mu)\}^n \dots\dots\dots (9)$$

である。疲労亀裂の発生は、 D_{fn} が浸透閾値 C_f に達したときに起こるとすると、亀裂が発生する繰返し数を N_c で表すとき、

$$\{1 - \exp(-E_f / \varepsilon_\mu)\}^{N_c} = 1 - C_f$$

すなわち、

$$N_c \times \ln \{1 - \exp(-E_f / \varepsilon_\mu)\} = K \dots\dots\dots (10) \\ K = \ln(1 - C_f)$$

となる。

2.6 実用化のための修正 前項で導いた(9)式ならびに(10)式は、材質や疲労条件によって決まる定数 E_f 、 K のほかに、 ε_μ 、すなわち最初に疲労亀裂が発生する μm^2 のオーダーの領域における転位集積度の平均値という、簡単には数値が決められないものを含んでいるので、このままでは実用にならない。低サイクル疲労試験で制御されるのは、通常、マクロな公称歪み幅 $\Delta\varepsilon_e$ であるので、 ε_μ を歪み量で表すことを考える。

しかしながら、転位の集積度と歪み量との関係は、厳密に考えるなら、複雑で、簡単には求まりそうにない。そこでここでは、とりあえず、 ε_μ を最初に疲労亀裂が発生する μm^2 のオーダーの領域における歪み幅の平均値に置き換え、また E_f は単位領域が損傷するか否かの歪み幅の臨界値であると考えて、(9)(10)式を解釈することとする。こうすれば、 ε_μ の値は、介在物等の状況の観察結果に基づいて有限要素法等で歪み集中を計算することにより、具体的に求めることが可能となる。

2.7 X線回折半価幅変化の検討 Cr-Mo-V

鋼の疲労でX線回折半価幅が減少するのは、製作時の鍛造で導入された多くの転位等の格子乱れの再配列が起り、より安定な状態に落ち着くことによると考えられる⁹⁾。これを上述の、単位領域ごとの疲労損傷の考え方で取り扱うため、便宜上、次のように考える。

まず、亀裂発生の解析と同様に、単位領域に(7)式の指数分布で表される駆動力がかかり、その値が抵抗値 E_x を超える単位領域で、転位の再配列が起こると仮定する。ここに E_x の値は、 E_f と異なっても良いこととする。さらに、転位が再配列する前の格子乱れの程度は全単位領域で一定値 A_f で、それが再配列することにより一定値 B_f に減ずるという近似が可能だと仮定する。

このように考えれば、 n 回歪み繰返しを行なったときの平均の格子乱れの程度を R_n で表すとき、

$$R_n = A_f \times (1 - D_{xn}) + B_f \times D_{xn} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに、 D_{xn} は転位が再配列した領域の密度であって、(9)式と同様に考えれば、

$$D_{xn} = 1 - \{1 - \exp(-E_x / \Delta\varepsilon_e)\}^n \dots\dots\dots (12)$$

と表せることが分かる。(9)式で ε_μ としたところを(12)式では $\Delta\varepsilon_e$ に置き換えているのは、X線回折半価幅は、平均的な mm^2 オーダーの領域で測定されるので、歪み集中はほとんど無いと考えられるためである。

3. 実験結果との比較

3.1 Cr-Mo-V 鋼の疲労試験結果

以前に実施したCr-Mo-V鋼の高温低サイクル疲労試験の結果¹⁾を図2に示す。これは、疲労の進展に伴うX線回折半価幅変化と亀裂発生点とを実験的に調べたものである。ただし、表面の酸化スケール除

Fig.2 Changes in half-value breadth of X-ray diffraction profiles and crack initiation life for constant strain cycling.

去等の測定上の問題のため、観察された亀裂の最小長さは 0.1~1.0 mm 程度であって、必ずしも微小亀裂発生点を捕らえていないことに注意する必要がある。

3.2 X線回折半価幅変化の比較

X線回折半価幅の値 H_w は、格子乱れ R_n の関数であると考えられる。しかし、その関数形が不明であるので、ここでは、便宜的に、双曲線の一部で近似することとする。すなわち、

$$H_w = a' / R_n + b' \quad \dots\dots\dots (13)$$

とし、これに(11)(12)式を代入して整理した

$$H_w = \frac{k_2}{\{1 - \exp(-E_s / \Delta \epsilon_i)\}^n + k_1} + k_3 \quad \dots\dots\dots (14)$$

が、実験結果に最も良く適合するように、定数 E_s 、 k_1 、 k_2 、 k_3 の最適値を最小二乗法で求める。その結果は

$$H_w = \frac{-0.8885}{\{1 - \exp(-0.05162 / \Delta \epsilon_i)\}^n - 1.917} + 0.8429 \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。図3は、(15)式が直線になるように横軸を調整して示したものである。実線が(15)式で、その上下の破線は $\pm 2\sigma$ の範囲を示す。ばらつきも大きい、異なる $\Delta \epsilon_i$ の実験結果が比較的良く整理できているのが分かる。

Fig. 3 Comparison of the change calculated by eq. (15) and test results in half-value breadth of X-ray diffraction profiles.

3.3 歪み集中の算出 実験での疲労亀裂発生回数との適合性を見るためには、(9) 式の ϵ_u の値を具体的に決めなければならない。ここでは、試験片表面の観察等に基づき、介在物等の大きさを最大 $20 \mu\text{m}$ 程度と仮定して、直径 $20 \mu\text{m}$ の円形介在物周辺の歪み集中

を、有限要素法による2次元弾塑性解析により算出した。ただし、円形介在物が、空洞である場合(ケースA)、剛体の介在物で母材と固着している場合(ケースB)、および剛体の介在物が母材から剥がれて接触しているだけで接触面に摩擦が無い場合(ケースC)の3通りについて実施した。計算に使用した要素分割・境界条件等を図4に示す。また、最も歪み集中が大きい要素での歪み幅が ϵ_u であるとし、各 $\Delta \epsilon_i$ に対して算出された ϵ_u の値を、表1にまとめて示す。

Fig. 4 Boundary condition and mesh of FEM for the analysis of strain concentration around an inclusion.

Table 1 Relationship between nominal strain $\Delta \epsilon_i$ and the maximum strain ϵ_u around an inclusion obtained by FEM.

	Inclusion condition	$\Delta \epsilon_i$	ϵ_u
Case-A	Vacancy	0.0020	0.01266
		0.0036	0.03723
		0.0046	0.05869
		0.0052	0.07078
		0.0072	0.11063
		0.0092	0.14442
Case-B	Rigid body adhering to mother metal	0.0020	0.00650
		0.0036	0.01326
		0.0046	0.01631
		0.0052	0.01812
		0.0072	0.02373
		0.0092	0.02917
Case-C	Rigid body contact with mother metal with no friction	0.0020	0.01067
		0.0036	0.03393
		0.0046	0.05103
		0.0052	0.05927
		0.0072	0.09081
		0.0092	0.13112

3.4 疲労亀裂発生回数の検討 表1を見ると、ケースAとケースCの歪み集中が大きく、ケースBは、

かなり小さい。そして、ケース A とケース C の値には大差無い。そこでここでは、ケース C の、剛体介在物が接触している場合の歪み集中の値を用いて、実験結果と比較検討することとする。図 2 の亀裂発生状況と適合するように (10) 式の E_f 、 K の値を定めると、次のようになる。

$$N_c = \frac{-12}{\ln \{1 - \exp(-0.36/\varepsilon_u)\}} \dots\dots\dots (16)$$

(16) 式に、表 1 のケース C の ε_u の値を代入して N_c を求め、それを (15) 式の n に代入することにより、亀裂発生時の H_w の値を算出した。図 5 に一点鎖線で示したのは、このようにして求めた疲労亀裂発生線である。なお、図 5 には、(15) 式も実線で示してある。

Fig. 5 Comparison of crack initiation curve calculated by eq. (15)-(16) and test results.

4. 考 察

4.1 試みた解析法の有効性 上述のように、Cr-Mo-V 鍛鋼の X 線回折半価幅変化と疲労亀裂発生回数に対して、(15)(16) 式のような、実験結果とかなり良く適合する近似式を得ることができた。このことから考えて、ここで試みた解析法は、実用的な目的には、有効と思われる。

また、シミュレーションによる疲労損傷算出法が確立されれば、寿命予測の信頼性等の議論にも役立つ。すなわち、材料特性や疲労条件のわずかな差が寿命をどのくらい変えるのかというような問題を、近年のカオス研究のように、コンピュータでの数値計算で調べられるようになる。そのような数値計算が藤山ら¹⁰⁾によって、超合金という特殊な対象については行われつつあるが、ここに試みた解析法は、一般材料の疲労損傷シミュレーションの基礎となり得るものであり、

その意味でも有効と考える。

さらに、同一のモデルでの解析が有効であるという事実から、X 線回折半価幅変化と疲労損傷蓄積とは本質的に同じ現象であることが考えられる。これは疲労損傷の理論的研究に、一つの手がかりを与えるものかと思う。

ただ、物理的に厳密に考えれば、ここで試みた解析には、多くの不合理が含まれており、このままでは理論的研究等に役立てることは無理である。そこで以下では、ここで試みた解析法の問題点と、今後の改善の可能性について考察する。

4.2 歪み幅を用いることの妥当性について

前述のように、ここでは、転位集積度を、とりあえず全歪み幅に置き換えて解析を進めた。しかし、物理的に考えるなら、これは明らかに不当である。少なくとも弾性歪みと塑性歪みは区別すべきで、転位集積度に対応するのは塑性歪み幅ではないと思われる。しかしながら、塑性歪み幅に置き換えると、図 5 のような実験結果との良好な適合が得にくく、特に X 線回折半価幅の測定値を (14) 式の形で整理することは、ほとんど不可能である。すなわち、弾性歪み分も転位の再配列等に関係しているように思われる。

これについては、次のようなことが考えられる。すなわち、ロータ製作時の鍛造等によっても転位の集積が生ずるが、それが一様ではなく各単位領域ごとにいろいろな値で分布しているとする。また、疲労の塑性歪みにより生じた転位集積も、簡単には消滅せずに蓄積して分布する可能性がある。そのようなところに歪みが加わると、それが平均的には弾性範囲内の歪みであっても、転位の集積度の大きい領域では、転位の再配列や損傷を生ずるのではないか。このように考えれば、弾性歪み分が転位の再配列や損傷発生に関係することも理解できないことはない。

もっとも、そうであれば、実際の破壊駆動力や抵抗値は複雑なものになるはずだが、ここで解析を試みた Cr-Mo-V 鍛鋼の低サイクル疲労に対しては、全歪み幅を平均値とする指数分布に従う破壊駆動力と、一定の破壊抵抗値という、単純なモデルでの置き換えが可能だったのではないと思われる。したがって、他の材料に対して同様の解析を試みる場合、例えば焼鈍材の疲労の初期段階に対しては全歪み幅でなく塑性歪み幅を使うというような、若干の修正が必要になると考えられる。

また、もし、疲労損傷の理論的研究等に役立てることを考えるなら、上記の複雑な現象を解析しなければならないが、それには本格的な統計力学的考察や物性

論、あるいは分子動力学に基づくシミュレーション等の実施まで必要かと思われる。

4.3 X線回折半価幅変化と疲労亀裂発生の関係

前述のように、Cr-Mo-V鍛鋼におけるX線回折半価幅の変化と、疲労損傷が蓄積して亀裂が発生する現象とは、同一のモデルで解析できるのだから、両者は本質的には同じ現象で、X線回折半価幅変化は疲労損傷の蓄積に対応すると主張しても良いのではないかと考えられる。しかし、そうであれば、定数 E_x と E_f の値は等しくなるはずで、実験結果と適合させるためには大きく異なる値を取らなければならないという事実と合わない。したがって、両者を単純に同じ現象と見なすことはできず、あるいは、単位領域で転位の再配列は起こるが損傷は発生しないというような場合も、考えなければならないのかも知れない。

いずれにしても、ここで用いたモデルはあまりにも単純すぎる。さらに詳しく疲労損傷蓄積とX線回折半価幅変化との関係を考察するためには、モデルの改善が不可欠であるが、これは、前項の問題と同様、簡単ではない。

4.4 亀裂発生条件について ここでは、亀裂発生は損傷領域がつながることにより起こると考えたが、その条件は、便宜上、単に、損傷領域の密度が浸透閾値に達したとき亀裂が発生することとした。しかし、実際には、応力方向との方位依存性や、損傷領域に隣接する領域の方が損傷しやすくなる、というようなことがあると考えられる。

シミュレーションによる疲労損傷算出法を作成するときには、それらも考慮すべきである。特に、コンピュータ・シミュレーションであれば、このような詳細条件を付与することは容易であるので、種々の条件を検討し、最も実験結果と適合しやすいものを選ぶことが望ましい。

4.5 Kの値について 実験による亀裂発生回数に適合させるためには、(16)式に示したように、(10)式のKの値を-12としなければならなかった。しかし、このKに対応する C_f の値を逆算すると、0.999994になる。2次元格子の浸透閾値は0.3~0.7程度⁸⁾であるので、この C_f の値は大きすぎる。

このような不具合が生じた原因は、上述のモデルの問題もあるが、主には、測定上の次の問題によると考えられる。すなわち、前にも注意したように、実験で観察された亀裂の最小長さは0.1~1.0 mm程度であって、長さが μm オーダーの微小亀裂の発生点をとらえたものではない。亀裂発生が確認された繰返し回数Nには、 μm オーダーから0.1~1.0 mmまで亀

裂が成長するのに必要な回数が含まれており、微小亀裂の発生は、それよりもずっと早くに起こっていると考えられる。さらに、表1に示したように、介在物等が母材と固着した状態(ケースB)では歪み集中が小さくて亀裂はなかなか発生しない。すなわち、Nには介在物等が母材から剥離するまでに要する回数も含まれていると考えられる。したがって、現実に近い詳細なシミュレーションを行う際には、介在物等の母材からの剥離、ないしは微小な腐食孔の発生成長や、微小亀裂の成長も考慮したモデルを作成することが望ましい。

ただ、実用的には、Kの意味にこだわらず、(16)式を使っても良いだろう。そして、他の材料、他の疲労条件の場合にも、観察できる最小亀裂の発生寿命を単純なモデルで精度良く予測できるのであれば、実用的には、それを使っても良いと思われる。破損寿命が必要なら、その後の亀裂成長に対して、破壊力学等を加味し、高温酸化雰囲気等も考慮した合理的なシミュレーションを行えば良い。

5. 結 論

疲労に伴うX線回折半価幅の変化ならびに疲労亀裂の発生に対して、破壊駆動力が指数分布となる、同一のモデルでの解析を試みた。その結果、どちらに対しても、実験結果とかなり良く適合する近似式が得られた。したがって、このような解析法は、実用上、有効であり、これを基にして、コンピュータ・シミュレーションによる疲労損傷算出法を開発できる可能性がある。また、X線回折半価幅の変化は、亀裂発生前の疲労損傷の蓄積現象と、密接に関係していると考えられる。

文 献

- (1) 後藤ほか4名, 材料, 39-441, (1990), 608-613.
- (2) たとえば, S. コサンダ著, 石井・田中訳, 金属疲労の解析と応用, (1981), 138-143, 現代工学社.
- (3) 大谷ほか3名, 機論, A-54, (1988), 1312-1317.
- (4) 大谷ほか2名, 機論, 930-71, (1993), 101-102.
- (5) 多田ほか3名, 材料, 44-496, (1995), 84-89.
- (6) 生野ほか3名, 機論, A-61, (1995), 389-394.
- (7) 高橋, 統計力学入門, (1984), 19-22, 講談社サイエンティフィク.
- (8) たとえば, 小田垣, パーコレーションの科学, (1993), 1-25, 養華房.
- (9) 材料学会編, X線応力測定法, (1981), 193, 養賢堂.
- (10) 藤山ほか3名, 材料, 42-481, (1993), 1212-1217.