表面疲労き裂の伝ば経路測定への画像処理の応用*

(疲労き裂の発生・伝ばのばらつきに及ぼす金属学的因子)

佐々木 茂美^{*1}, 石井 明^{*1}, 越智 保雄^{*1}

An Application of Image Processing to Measuring Surface Fatigue Crack Propagation Path (Some Metallurgical Factors Affecting the Scatter of Fatigue Crack Initiation and Propagation)

Shigemi K. SASAKI, Akira ISHII, and Yasuo OCHI

From the line image of the surface fatigue crack path, three parameters which showed the features of the crack shape and length were defined and measured as the crack deflection ratio, the initiation angle and the propagation angle. The rotating bending fatigue tests in a high cycle region were carried out for three metals, low carbon steel with four grain sizes, copper and austenitic stainless steel which had different crystal structure and slip character. The parameters measured for each metal were investigated in the relation to metallurgical structures. As a result, the parameters, especially, the crack initiation angle and the propagation angle represented well the effects of slip character and grain size respectively. The statistical scatters of the crack initiation lives and the crack propagation rates were discussed by using the parameters of crack path with regard to metallurgical factors.

Key Words: Image Processing, Personal Computer, Crack Propagation Path, Statistical Treatment, Grain Size, Slip Character

1. 緒 言

マイクロコンピュータの著しい発達と普及により、種々のコンピュータ画像処理が高精度でしかも低価格で行えるようになってきた。材料強度の分野への応用を見ると、例えば、き裂先端近傍のひずみの測定⁽¹⁾、モアレ縞によるひずみ分布の解析⁽²⁾ならびに疲労破面の三次元的表示⁽³⁾などにおいてよい成果を挙げている。さらに画像処理技術の紹介についても詳細な解説⁽⁴⁾が見られるようになってきた。一方、表面疲労き裂についてみると、(1)その発生・成長が延性材料の疲労破壊の主要過程であり、(2)しかも多数発生し、(3)線形破壊力学による巨視貫通き裂の場合の $\Delta K-dl/dN$ 関係を表面微小き裂に应用したときの寿命の評価は、危険側を与えるなどから、実用的にも、その挙動を調べることは重要であると考えられる。著者らは前報⁽⁵⁾で、表面疲労き裂の発生・伝ばの統計的性質を調べ、それらに及ぼす材料組織の影響について検討した。

本報では、従来の顕微鏡観察からは厳密な測定が困

難であったき裂の伝ば経路を、パソコン画像処理を用いて観測して考察を行った。すなわち、き裂の屈曲、蛇行の程度を実測し、材料と結晶粒径を種々に変えてそれらの値を測定して検討を行い、さらに、き裂の発生寿命および伝ば寿命のばらつきと金属組織的因子との関係についても考察した。

2. 画像処理システムと計測処理

2・1 画像処理システムの概要 画像処理装置のシステム構成を図1に示す。試験片を直接あるいはレプリカフィルムに転写されたき裂画像は、金属顕微鏡を介して、CCDカメラ(画素数H 384 * V 498)を用いて256 * 256画素、各画素当り64段階の輝度レベルの信号として画像入力装置(三谷商事製)に入力され、フロッピーディスクにセーブされる。

図1 画像処理装置のシステム構成

* 昭和61年11月25日 第941回講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月14日。

*¹ 正員、電気通信大学(〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

ソフトウェアは、図2に示すように、メインプログラム("HALLEY"と呼ぶ)をBASIC言語で記述し、処理時間のかかる部分を機械語サブルーチン(市販品のソフトルーチンCOMET-Iと新たな機能を追加したルーチン)にして高速化し、モニタの画像を見ながら対話形式で各種の処理を行っている。

2・2 表面き裂伝ば経路の測定法 画像処理過程の一例を図3に示す。これはき裂が $\phi 0.2\text{ mm}$ の微小穴から発生し、約 $700\text{ }\mu\text{m}$ に成長したときの片側半分のレプリカフィルム像を原画像とし、き裂長さを画像処理によって自動的に測定する過程を示している。

図2 ソフトウェア"HALLEY"の構成

図3 画像処理過程

背景とき裂とがはっきりと分離できるような明りょうな画像(a)については、図1と図2の画像処理を用いることにより自動的に2値化画像(b)を得ることができる。2値化の手法として、最初に画像全体の輝度ヒストグラムを作る。次にヒストグラムの谷部分の輝度レベルを(双峰性ヒストグラムを仮定して)その分散が最大となる値として2値化のしきい値を求め⁽⁶⁾、その値を用いて2値化を行っている。シェーディングやビネットによる画像の背景の非均質さが大きいときには、観察領域を小領域に分けて(例えば、4~64分割にする)、それぞれの領域で2値化レベルを求めて2値化を行っている。このような方法を介して求めた全体としての(b)の2値化画像はさらに反転と膨張、収縮(c)を行うことにより、き裂の部分的なとぎれをなくしたり次の細線化処理時のひげや穴の発生を抑えている。細線化(d)にはHildritchの方法⁽⁷⁾を用いて1画素幅の8連結の線図形を得ることにしている。き裂経路の測定には、計測の始点を明りょうにするために原画像と細線化画像を重ね合わせ(e)、計測範囲を四角のウィンドウで設定し、その一つの角をき裂発生点(穴の縁)に合わせて、各き裂経路長さを自動的に求めている(f)。なお、上記の処理が不能な不明りょうな画像については、原画像のき裂経路上に追跡点を表示して、目視でマニュアルトレースする方法によって、き裂経路をトレースして、線面像を得ている。

2・3 表面き裂経路の測定表示法 画像処理によるき裂の伝ば経路の測定表示法を図4に示す。従来は、き裂寸法としてき裂の円周方向への投影長さ l のみを用いてきたが、 $\widehat{AB}$ としてのき裂の屈曲、蛇行に伴うき裂経路長さの増加と蛇行の程度を評価するために、蛇行率 R_d と図示のような発生角度 θ_1 、伝ば角度 θ_2 を定義する。

$$R_d = (\widehat{AB} - \overline{AC}) / \overline{AC} \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 $\widehat{AB}$ はき裂の経路の実際の長さである。なお

図4 疲労き裂伝ば経路の表示法

R_d の値はき裂自体の屈曲の回数と蛇行の程度が増すにつれて増加する。き裂の発生角度 θ_1 は微小穴からのき裂の発生点の位置を表している。き裂の伝ば角度 θ_2 はき裂先端の円周方向からの傾き角を表しており、蛇行の程度が増すにつれて増加する傾向がある。なお、本報の図3などの測定には、き裂長さ l が約 500 μm の時のき裂画像を用いている。

3. 供試材および実験方法

供試材は低炭素鋼 S15C (bcc), オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (fcc) と純銅 (99.99 % Cu, fcc) の3種で結晶構造とすべり特性が異なっている。2種の材料の化学成分 (wt %) を示すと、S15C (0.16 C, 0.21 Si, 0.47 Mn, 0.018 P, 0.022 S, 0.021 Ni, 0.031 Cr, 0.03 Cu), SUS304 (0.06 C, 0.69 Si, 1.25 Mn, 0.035 P, 0.005 S, 8.18 Ni, 18.31 Cr) である。なお、S15C は熱処理温度と時間を変えて4種類のフェライト結晶粒径としている。表1に供試材の熱処理後の機械的性質と平均結晶粒径を示す。試験片は納入状態の $\phi 19\text{ mm}$ の圧延丸棒から図5に示す形状、寸法に機械加工した後、真空焼なまし処理を施し、その後、表面をエメリー紙 (#400-#1500) 研磨およびアルミナの懸濁液でバフ研磨仕上げを行って軽く腐食して用いた。なお、試験片表面には表面き裂の位置を決めるために、(b) に示すように円周方向に4箇所 $\phi 0.2$ のドリルで深さ 0.2 mm の微小穴をあけている。

表1 熱処理後の機械的性質と平均結晶粒径

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Heat treatment Annealing	Average grain size (μm)
S15C	A 263	416	47	66	800°C 1h	14
	B 244	398	52	68	900°C 1h	25
	C 190	396	61	65	1050°C 1h	55
	D 187	400	59	64	1100°C 6h	102
Cu	43	177	64	74	720°C 1h	49
SUS304	235	795	82	76	1100°C 1h	55

図5 試験片の形状寸法

疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機 (3 000 cpm) を用いて、表1の各材料に対して平均破断寿命がほぼ等しくなる ($N_f = 6.75 \sim 8.09 \times 10^4$) ように応力振幅を選んで、室温大気中で行った。なお、SUS304の試験片は試験中にかなり発熱するので試験片の横方向から送風器で冷却しながら試験を行った。き裂の観察は大部分はレプリカ法を用い、若干は試験片から直接顕微鏡で観測している。

4. 実験結果ならびに考察

4.1 き裂の発生角度, 伝ば角度, 蛇行率 き裂はその進展に伴い屈曲を繰返し、蛇行しながら成長する⁽⁸⁾。しかしながら、その様子は1本1本のき裂で異なっている。そしてそれらの屈曲、蛇行の大きさ、頻度の違いが各々のき裂進展のばらつきに影響し、さらに発生・伝ば寿命のばらつきに影響するものと考えて検討を行う。図6にき裂発生角度 θ_1 、図7にき裂伝ば角度 θ_2 をS15Cの各結晶粒径 [(a), (b), (c), (d)の順に結晶粒径は大きくなる] ならびに表1の各材料 [結晶粒径がほぼ同じで(e), (f), (c)の順に積層欠陥

図6 き裂発生角度 θ_1 の分布

図7 き裂伝ば角度 θ_2 の分布

エネルギーが高くなるため、変形に際して転位は交差すべりを起こしやすくなり、すべり形態は planar から wavy なすべりに移行する] について4度おきのヒストグラム表示した結果を示す。測定点数はそれぞれの分布で24点である。

図6の θ_1 の分布をみると、(e)のSUS 304を除いて測定点の約2/3のデータが0度から8度の範囲に集中し、それよりも角度の大きなデータの数急激に少なくなっている。結晶粒径の増加につれて分布範囲が広がるという傾向は見られないが、SUS 304では他のものに比べて12度以上のデータが1/3と最も多い。図7の θ_2 の分布では、 θ_1 と違って、各結晶粒径、各材料ごとの分布の広がり方(形状)にある一定の傾向がみられる。すなわち、結晶粒径が増加するにつれ

て分布範囲(θ_2 の最大値)が広がり、SUS 304, Cu, S15Cの順に積層欠陥エネルギーが高くなるにつれて分布範囲が広がる傾向がある。このことは大きな結晶粒径のものほど、また積層欠陥エネルギーの高い材料ほど大きな伝ば角度を生じることを意味している。

次に金属組織との関係を知るために θ_1 , θ_2 の統計的な性質を求める。図6, 7のヒストグラムを見ると、 θ_1, θ_2 はともにほぼ指数分布とみなすことができるので、 θ_1, θ_2 の値を指数分布で回帰してその平均値 $\bar{\theta}_1$, $\bar{\theta}_2$ を図8に示した。(a)がS15Cの結晶粒径 D 依存性を表し、(b)は平均結晶粒径がほぼ同じ場合の積層欠陥エネルギー Γ 依存性を表している。なお、 Γ の値(erg/cm²)は、厳密には測定方法によって異なるが、ここではSUS 304で約14, Cuで約55とした⁽⁹⁾。S15Cでは Γ の厳密な測定値は得られていないが、bcc金属においては Γ の値は十分に大きく、数百以上の値となると考えられていることから、ここでは約200以上とした。なお、図には同時に測定値としての式(1)の蛇行率 R_d の平均値 $\bar{R}_d$ も示している。

$\bar{\theta}_1$ の変化傾向をみると、結晶粒径 D が増加するにつれて $\bar{\theta}_1$ の値は減少した後、逆 $D=102\mu\text{m}$ の場合に多少増加している。積層欠陥エネルギー Γ の増加に対しては、単調的な減少傾向がみられる。 Γ の大きな材料において $\bar{\theta}_1$ が小さな値を示す原因としては、き裂の発生自体は微小穴による応力集中とそれによるすべりき裂の発生の結果であると思われるが、 Γ の大きな材料では、交差すべりが容易なため、発生箇所が微小穴に面している結晶粒の結晶方位によってあまり制限されないと思われることから、すべりやすいものほど微小穴による応力集中が高い所の小さな発生角度で発生しやすくなるためであると思われる。

$\bar{\theta}_2$ の変化傾向には、 $\bar{\theta}_1$ と比較して、組織の影響がより大きく現れている。図8(a)の結晶粒径依存性をみると、 D が増すにつれて $\bar{\theta}_2$ は単調に増加している。これは D が増すにつれて大きく蛇行して伝ばするき裂の割合が増すことを意味している。この傾向は、図7の(a)から(d)の分布範囲の拡大に見られるように、 θ_2 の最大値の増加と対応している。図8(b)の積層欠陥エネルギー依存性をみると、SUS 304で小さな値となっている。これはSUS 304ではき裂がほぼ直線的に伝ばし、蛇行の程度は小さいため、結果として全体的に小さな $\bar{\theta}_2$ を生じるためであろう。なお、実験値としてのS15Cの値はCuよりも若干小さくなっている。

蛇行率 $\bar{R}_d$ についてみると、 D の増加とともに減少した後、若干増加している。一見、 $\bar{\theta}_1$ と対応関係が見

図8 き裂伝ば経路パラメータの統計的性質

られるが、 θ_1 は微小穴の応力集中の結果生じるき裂の発生に関係するのに対して、 R_d はき裂が組織の影響を受けた結果生じる伝ば経路の増加を表していることから直接の関係はないと思われる。 Γ の増加に関してはいったん増加した後、減少している。その傾向は、 $\bar{\theta}_2$ の変化傾向とよく対応している。蛇行率 $\bar{R}_d$ の D に対するこのような変化傾向の原因としては、 R_d は屈曲する回数と蛇行の大きさが増加するにつれてその値は増加することから、 D の小さな材料では蛇行の程度は小さい($\bar{\theta}_2$ は小さい)が、屈曲の回数が多いため $\bar{R}_d$ の値は大きくなるものと思われる。一方、 D の大きい材料では屈曲の回数は少なくなるが蛇行の程度が大きくなるため $\bar{\theta}_2$ は増加し、結果として $\bar{R}_d$ の値は大きくなるものと思われる。 Γ 依存性に対しては、 $\bar{\theta}_2$ の場合と同様に SUS 304 ではき裂が比較的直線状に伝ばするため、結果として全体的に $\bar{R}_d$ の値は小さくなる。

4.2 き裂の発生寿命、伝ば寿命 図9は前報⁽⁵⁾で得られた表面疲労き裂伝ば曲線の一例である。き裂伝ば曲線のばらつきをみると結晶粒径がほぼ同じ場合[(a)~(c)]には、SUS 304の場合がもっとも大きく、同じ S15C 材では、結晶粒径が小さい(d)で非常に小さくなる傾向がある。

そこで、き裂伝ば曲線のばらつきの程度を定量化するために、き裂発生寿命 N_i と伝ば寿命 N_p を定義する。 N_i はき裂長さが $l_i = (200 + 2.6D)\mu\text{m}$ に達した時

の繰返し数である。なお、 D は平均結晶粒径で、 $2.6D$ は発生したき裂が深さ方向に1平均結晶粒径 D だけ進むときの表面のき裂長さに対応している⁽⁵⁾。 N_p はき裂長さがある値に達した時の繰返し数で、ここでは、その値を前項の $\bar{\theta}_2$, $\bar{R}_d$ との比較のために $l_p = 500\mu\text{m}$ とした。また、各寿命データの表示に際しては、 N_i , N_p の分布がワイブル分布でほぼ表示できることならびにデータ処理の便利さからワイブル確率紙にプロットし、次の2母数ワイブル関数で表示した後、それらの標準偏差 s と平均値 μ から変動係数 η_N を求め、その値の大小で寿命のばらつきの程度を表すことにした。

$$F(N) = 1 - \exp\{-(N/\beta)^a\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_N = s/\mu \quad \dots\dots\dots (3)$$

図10(a), (b)に η_{N_i} と η_{N_p} の結晶粒径 D 依存性と積層欠陥エネルギー Γ 依存性を示す。 N_i と N_p の変動係数は D および Γ に対してほとんど同一の変化傾向を示している。最初に、図(a)の D 依存性をみると、最小の結晶粒径で変動係数はともに大きな値となっており、 N_i のほうがより大きな値となっている。しかし、より大きな D では逆に減少した後、 D の増加とともに単調に増加する傾向がみられ、 η_{N_p} は η_{N_i} に近づく傾向がみられる。

そこで、変動係数のこのような減少増加傾向について検討する。微小穴から発生したき裂は、発生直後はすべり帯とき裂との区別の困難さから、短いものは

図9 表面疲労き裂伝ば曲線

(a) 結晶粒径依存性 (b) 積層欠陥エネルギー依存性

図10 表面疲労き裂の発生・伝ば寿命の統計的性質

(微小穴を含めて $210 \sim 230 \mu\text{m}$ 以下) D または Γ にはあまり依存しないようである。また、き裂の発生直後はき裂の伝ば速度はいったん小さくなり、その後き裂の進展とともに大きくなる傾向が観察される。さらに、き裂発生角度 $\bar{\theta}_1$ は図 8(a) に示されるように $\bar{\theta}_2$ のような単調な D 依存性が見られないことから、き裂の発生は微小穴の応力集中のために結晶粒径の影響をあまり受けないと思われる。その後、深さ方向に約 1 結晶粒分き裂が進む間に組織の影響を受けるようになると思われる。しかしながら、その影響の期間(繰返し数)は結晶粒径 D によって異なる。 D が最小の場合には、 $l_i = 236 \mu\text{m}$ となることから、 l_i に達するまでの組織の影響は他の結晶粒径の場合に比べて非常に小さいと思われることから、 η_{N_i} の傾向が他のものと異なることになると思われる。また、伝ば寿命 N_p のばらつきが D の最小の場合に大きい値を示すことに対しては、前項で述べた図 8(a) の $\bar{R}_d$ と $\bar{\theta}_2$ の関係より、き裂の屈曲の回数の多いことによるき裂経路長さの増加が影響しているのではないかとと思われる。

一方、図 10(b) のほぼ同じ結晶粒径(約 $50 \mu\text{m}$) に対する Γ 依存性をみると、 N_i 、 N_p の変動係数は Γ の増加とともに逆に単調に減少し、き裂発生、伝ばの寿命のばらつきは小さくなる傾向がみられる。また、 Γ が 55 erg/cm^2 の純銅を除けば発生寿命のばらつきが変動係数が若干大きな値となっている。き裂伝ば寿命 N_p のばらつきの Γ の増加に対するこのような減少傾向は各材料の交差すべりの難易さから説明できると思われる。結晶粒内のき裂の進展は、材料のすべり特性の影響を受け、 Γ が大になるほど交差すべりが容易になり、き裂先端でのすべりが活発となりき裂は容易に進展できるようになり結果として、き裂伝ば寿命 N_p のばらつきは小さくなると思われる。同様なことが、微小穴から発生したき裂が l_i (この場合、約 $330 \mu\text{m}$) に達するまでに受けると思われることから、き裂発生寿命のばらつきに対しても伝ば寿命と同様な傾向を示すものと思われる。

5. 結 言

パソコンによる画像処理応用として、表面疲労き裂

の線画像を求め、き裂の伝ば経路を表す三つのパラメータ(蛇行率: R_d , 発生角度: θ_1 , 伝ば角度: θ_2)を測定して、統計的な性質を求めた。供試材としては、結晶構造とすべり特性の異なる S15C, Cu, SUS304 の 3 種類の材料と 4 種類の結晶粒径を持つ S15C を用いて、き裂の発生寿命および伝ば寿命のばらつきに及ぼす結晶粒径と積層欠陥エネルギーの影響について検討を行って次の結論を得た。

(1) き裂としての特徴がはっきりしているような鮮明な画像に対しては、一連の画像処理を行うことにより、き裂経路(長さ)の自動計測が可能である。

(2) 本報で提案した三つのパラメータ R_d , θ_1 , θ_2 を用いることにより、き裂の進展の状態を表すことができる。 θ_1 はすべり特性の影響を、 θ_2 は結晶粒径の影響を受け、 R_d はその両方の影響を受けることがわかった。

(3) き裂の発生寿命 N_i と伝ば寿命 N_p のばらつきを 2 母数ワイブル分布で表示し、ばらつきの程度を変動係数で表示した。 N_i と N_p のばらつきは最小の結晶粒径のもので大きいのが、より大きな D で減少した後、結晶粒径の増加とともに増加するが、すべり特性の影響をみると、積層欠陥エネルギーの増加とともに N_i と N_p のばらつきは逆に減少することがわかった。

終わりに、本研究の画像処理プログラムの作成および実験に協力された当時本学学生であった田村昌久、鈴木直人の両君に感謝する。なお、本研究の一部は昭和 61 年度文部省科研費 (No. 61550073) によって行われたものである。

文 献

- (1) 曾根田・ほか 2 名, 機講論, No. 860-3 (昭 61-6), 291-296.
- (2) 森本・白石, 材料, 33-367 (昭 59), 495-500.
- (3) 駒井・菊地, 材料, 34-381 (昭 60), 648-652.
- (4) 瀬口, 材料, 35-389 (昭 61), 95/105.
- (5) Ochi, Y., ほか 2 名, *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.*, 8-4 (1985), 327-339.
- (6) 長尾, 画像認識論, (昭 59), 39/44, コロナ社.
- (7) 手塚・ほか 2 名, デジタル画像処理工学, (昭 60), 139-142, 日刊工業新聞社.
- (8) Suresh, S., *Met. Trans., A*, 16A-2 (1985), 249-260.
- (9) 幡中・山田, 材料, 25-279 (昭 51), 1180-1191.