疲労き裂進展挙動のSEM画像処理援用動的直接観察*

菅田 淳**

Direct SEM Observation of Fatigue Crack Growth Behavior using Image Processing Technique / Atsushi SUGETA

Key words: fatigue, crack growth mechanism, direct SEM observation, image processing technique, quantitative analysis, crack tip opening displacement, deformation near crack tip

1. はじめに

疲労き裂進展は本来、局所的な現象であるためその機構を解明するには走査型電子顕微鏡 (SEM) 等の高倍率観察装置による微視的直接観察が有効な手段である。これまでに多くの研究が行われ、疲労き裂進展モデルが提案されるとき裂先端の開口量であるき裂先端開口変位 (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) が一定振幅荷重および変動荷重のいずれにおいてもき裂進展量を直接支配する微視的支配パラメータであることが明らかにされている^{1)~10)}。しかしながら、従来の観察ではき裂像の写真撮影に少なくとも数秒の露出時間を要するため、動的直接観察の場合においても繰返し速度はたかだか0.1 Hz程度にとどまっていた。写真画像からのき裂開口変位、き裂進展量などの定量解析には、多大の労力と時間を要し、しかも目視による測定では客観性が損なわれる可能性がある。また、き裂進展機構の解明のために必要不可欠と考えられるき裂先端近傍の変形状態の定量解析については、その測定、処理の困難さからほとんど行われていないようである。

そこで、菊川、城野らにより作製された電界放射型走査電子顕微鏡内疲労試験装置を用い、新たに電子顕微鏡の画像信号を高速で A/D 変換し、マイクロコンピュータに取り込み、画像処理を行う試験装置システムを構築し、疲労

き裂進展挙動の動的直接観察を行い、き裂開口変位やき裂先端近傍材料の変形量の定量解析を試みた^{11)~13)}。

2. 試験装置および画像計測法

図1に電界放射型走査電子顕微鏡に装着可能な電気油圧サーボ式引張圧縮疲労試験機の概略図を示す。一般の試験機のように、アクチュエータのシリンダと試験片の一端を固定し他端にピストンにより荷重を加えた場合、試験片の変位のために高倍率で観察している時には、試験片中央部のき裂は視野から外れて観察が困難となる。そこで本疲労試験装置は、試験機を駆動したままで動的直接観察ができるよう以下の工夫をしている。図中②の試験片は一方を⑨で示すピストンに他方を⑩で示すシリンダに連結されており、このピストンとシリンダの両者を反対方向に運動させ、その相対移動量を調整することにより、観察部分の荷重軸方向の移動成分をほぼ除去している。さらに、機械的方法で除去できない微小な移動量については、走査電子顕微鏡の観察視野をき裂に追従させるように電気的操作を行うことで相殺し、繰返し荷重下でも試験片観察部が視野内で静止するよう工夫されている⁶⁾。疲労試験は、動的な繰返し荷重下において最大荷重時および最小荷重時にき裂画像の計測が行えるよう台形波を用いて行っている。

図2に試験装置のシステムブロック線図を示す。SEMの2次電子信号は高速 Direct Memory Access 型 A/D 変換器 (分解能 12 bit) を介してマイクロコンピュータ (記憶容量 16 Mbytes) へ転送される。最高変換速度は $2.5 \mu\text{s}$ であり、1画面縦 490 画素×横 200 画素の画像データを取り込む場合には、その所要時間は 0.245 s となる。したがって台形波における最大および最小荷重の保持時間をこの時間に設定することにより荷重繰返し速度約 2 Hz の試

* 原稿受付 平成7年2月13日

** 大阪大学工学部 (吹田市山田丘2-1)
1983年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻前期課程修了, 工学博士。1992年大阪大学工学部機械工学科講師, 1994年助教授。現在に至る。研究分野: 材料強度学, 疲労機構の解明

① 電界放射型走査電子顕微鏡, ② 試験片, ③ シリンダ側チャック, ④ ピストン側チャック, ⑤ ロードセル, ⑥ 試料台, ⑦ 予備排気室, ⑧ 試験機取付けフランジ, ⑨ ピストン, ⑩ シリンダ, ⑪ サーボバルブ, ⑫ 微動マイクロメータ, ⑬ 粗動マイクロメータ, ⑭ 環状ビーム, ⑮ 自在継手, ⑯ 釣合いばね

図1 走査電子顕微鏡装着型引張圧縮疲労試験機

図2 疲労試験装置および画像計測システムのブロック線図

験が可能である。しかしながら、走査速度を速くすると電子顕微鏡画像の解像度が低下するため、十分な解像度の画像を取り込むには実質 1 Hz 程度が限界となる。1 画面の画素数を上記に設定することにより最大 20 画面の連続取込みが可能である。一般には、データのサンプリング間隔と走査信号とが必ずしも同期しないため、取り込んだ 1 次元的信号から 2 次元の画像に再構成する場合、各走査線に対応する行の開始点が定まらず機械的な配列では場合によっては斜めにずれた画像として再生されることになる。ここでは、2 次電子信号のブランキング部を検出し、画像の再構成を行っている。また、連続画面データの分割は同時に計測した掃引信号の立下がりゼロクロス点を検出し、1 画面の開始点として行っている。

試験には一方向性けい素鋼板の CCT 試験片を用い、表面には SEM の 2 次電子像をより鮮明にするため厚さ 5 nm 程度の金を蒸着し、さらに変形計測用の標点として酸化マグネシウムを付着させている。

3. 画像解析手法および適用例

走査電子顕微鏡により得られた疲労き裂画像を用いた定量解析として、き裂開口変位 (COD) およびき裂先端開口変位 (CTOD) の計測ならびに複数画像の比較によるき裂

図3 き裂開口量解析アルゴリズム

先端近傍の変形量の計測を行った。

3.1 き裂開口量の計測

疲労き裂開口量の解析アルゴリズムを図 3 に示す。図 4 は画像解析の対象とした疲労き裂の SEM 画像であり、図 5 はその輝度分布を示したものである。輝度値の低い方がき裂領域に、高い方が酸化マグネシウム標点領域に対応し、その中間に試験片表面の輝度が分布している。試験片表面の輝度分布は広範囲にわたり、き裂領域の輝度分布と重なっているため、き裂領域の抽出のための 2 値化処理におけるしきい値を自動的に決定するのは困難であり、ここではマニュアル操作によりしきい値を決定した。図 6 はしきい値を 128 とした時の 2 値化画像であり、き裂以外の領

図4 疲労き裂の SEM 画像例

図5 SEM 写真の輝度分布

図6 2値化処理後の画像

域も抽出されているが、ここでは面積が最大の領域をき裂として認識し解析対象として選んでいる。

このように認識したき裂領域を用いて COD を計測する。COD は図 7 に示すようにき裂の中心線（一点鎖線）に垂直な方向のき裂開口量として定義する。一般にき裂は屈曲を繰り返しながら進展するため、COD の計測を行うためには、まずき裂の中心線を求める必要がある。き裂中心線の決定は、まずき裂を画素幅の微小領域に分割し、その各微小領域の重心を結んだ曲線を考え、この曲線と曲線の両端を結んだ直線との荷重軸方向の差がき裂開口変位の半分以上ある場合をき裂屈曲と判断する。この操作を繰返し全き裂屈曲点を求め、屈曲点における微小領域の重心を結ぶことによりき裂全体に対する中心線としている。図 8 にき裂開口変位の計測例を示す。中央が抽出されたき裂領

図7 き裂開口変位 (COD) の定義

図8 き裂開口変位の計測例

域であり、下図が計測された COD である。COD はき裂先端に向かって緩やかに減少していき、き裂先端近傍で急激に減少している。このような COD の急激な減少が認められる位置でのき裂開口変位をき裂先端開口変位 (CTOD) と定義する。実際の解析では、き裂先端から 10 画素除いた後方のき裂領域に対する COD 曲線を図中実線で示すように直線近似し、き裂先端後方において最初に実線と COD 曲線とが交わる位置での開口変位として CTOD を定義している。本例では、CTOD はき裂先端から 1.25 μm 後方の位置で、0.51 μm と計測された。この値は、SEM 写真上で直接計測した値とよく一致しており、画像処理によるき裂先端開口変位の自動計測が可能であることがわかる。

3.2 き裂先端近傍の変形量の解析

最小荷重負荷時と最大荷重負荷時に計測された画像から疲労き裂先端近傍の変形状態の解析を試みた。解析アルゴリズムを図 9 に示す。変位量の解析は、2 つの画像を重ね、画像間での対応づけを取って行った。菊川、城野および筆者のこれまでの研究から、荷重軸にほぼ直角に進展する Mode I き裂の前方領域では、すべり変形が起これないことが明らかにされている⁵⁾。そこで 2 画像の重ね合わせは、き裂前方の複数個のマグネシウムの位置を重ね合わせるにより行った。2 枚の画像間の対応点を探索するために、最大荷重時に得られた画像中に図 10 に示すような窓領域（縦 51 画素、横 51 画素）を設定し、この窓領域をテンプレートとして取りだし、最小荷重時に得られた画像中に重ね合わせ探索を行った。き裂画像の計測は通常最小荷重時、最大荷重時の順で行っており、変位量解析におい

図9 き裂先端近傍変形解析のアルゴリズム

図10 対応点の探索方法

ては、最小荷重時を基に最大荷重時の画像に対して対応点探索を行うのが一般であると考えられる。しかしながら、SEM から得られる画像の領域に制限があり、変形前の最小荷重時の画像を基に探索した場合、変形後の最大荷重時の画像内に対応点が存在しない場合がある。したがって、上述のようにここでは、必ず対応点が存在するように最大荷重時の画像をもとにして2画像間の対応点探索を行っている。また、最小荷重時に得られた画像の全領域に対して探索を行うのは時間がかかるので、窓領域の中心座標を中心として窓領域より大きい探索領域を設け、この中で対応点を探した。探索は対応点においてテンプレートと探索領域の輝度分布が類似していることに着目し以下に示すSSDA法¹⁴⁾により行った。すなわち、テンプレートの画素の輝度値を T_{ij} 、テンプレートを重ね合わせた部分での画素の輝度値を S_{ij} とすると、各画素の輝度値の差の絶対値の総和 R_s は

$$R_s = \sum |T_{ij} - S_{ij}|$$

であり、テンプレートを探索領域中で順次移動させ、 R_s が最小値となる点を対応点とみなすものである。ただし、この方法では最小荷重時と最大荷重時でき裂の形状が異なるために、き裂縁近傍で誤対応を生じる。現在はこの誤対応を、前述したき裂開口変位の計測結果を用いてき裂領域周辺の移動量と移動方向を考慮した制約条件と若干のマニュアル操作によって排除している。

き裂先端近傍の変位量解析の例を図11に示す。(a)は1荷重サイクル中の最小荷重負荷時に計測した画像で、この例ではき裂は完全に閉口し、画像中には認められない。

(a) 最小荷重負荷時の SEM 画像

(b) 最大荷重負荷時の SEM 画像

(c) 疲労き裂先端近傍の変形場

図11 疲労き裂先端近傍の変形の解析例

(b)は最大荷重負荷時に計測したものであり、(c)が両画像間のSSDA法による対応点の探索の結果である。窓領域として最大荷重時の画像中に、20画素間隔の格子点を中心として設けた。図中丸印が最大荷重時の画像中の窓領域の中心であり、四角印がそれに対応する最小荷重時の画像中の点である。そして、丸印と四角印を結ぶ線分の長さが丸印の点における変位量に相当する。なお、酸化マグネシウム標点の無いところでは、特徴がなく対応づけが一意に決まらない場合があり、変位データの計測は行えなかった。図からわかるようにき裂先端後方ではすべり変形による移動量は大きく、また一様である。その一方、き裂先端前方ではすべりは極めてわずかである。そして、両者の間のすべり帯のところでは、き裂先端前方から後方に向かって徐々にすべり量が増加している。このすべりは図中に示

図 12 疲労き裂先端近傍の主せん断ひずみ場

したき裂先端を通る荷重軸直角方向に対して $\pm 55^\circ$ 傾いたすべり線よりも前方から始まっている。

次に、2 画像間の対応点検索によって離散的に得られたき裂先端近傍の変位データをもとに主ひずみ、主せん断ひずみの同定を試みた。これらの同定には、変位の一次の微分量が必要となるため、まず変位の連続分布を決定する必要がある。ここでは、変位を荷重軸方向変位 u とそれに直角方向の変位 v に分解し、それぞれに対して曲線をあてはめることとした。曲線の当てはめは、き裂周辺の変位場がき裂先端を通るすべり線に沿って急激に変化していることを考え、局所的な変化に柔軟に対応できる B-スプラインによって表現されるスプライン関数¹⁵⁾を用いて行った。スプライン関数による曲線の当てはめは、節点の取り方(個数および間隔)や B-スプラインの次数の影響を強く受け、データ点での曲線との残差平方和を小さくするために、単純にスプライン関数の次数を高くしたり、節点の数を増やすと、データ点とデータ点の間で当てはめた曲線が振動を起こしてしまう。そこで、当てはめた曲線の妥当性を定量的に評価するために赤池の情報基準量(AIC)¹⁵⁾を用いた。本解析では、計算量と精度のかねあいから 3 次の B-スプラインを用い、節点の個数と場所は AIC がある程度小さくなるようにマニュアル操作によって決定した。き裂先端のすべり変形に寄与すると考えられる主せん断ひずみ γ_{xy} は、このようにして求められる変位曲線 u および v から

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

により求められる。前出の図 11 に示した例のデータに対して求められた主せん断ひずみ分布を図 12 に示す。図中の点が計算を行った格子点であり、その点からの線の長さがひずみ量を、線の方が主ひずみの働く方向を示している。き裂先端前方領域ではほとんどひずみが現れていない。また、せん断ひずみはき裂先端を通るすべり線上にの

み生じるのではなく、その近傍の比較的広い範囲で生じていることがより明らかとなっている。

4. おわりに

電界放射型走査電子顕微鏡内疲労試験装置により得られる繰返し荷重下のき裂画像を高速でコンピュータに取り込む画像信号計測システムならびに変位の定量解析のための画像処理システムを構築した。このシステムを用いたき裂先端開口変位の測定やき裂先端近傍の変形場およびひずみ場の定量解析により、非定常な変動荷重下で現れる疲労き裂進展挙動の過渡的現象の機構が明らかになってきており、さらに解析を続けることにより疲労き裂進展機構に関する多くの知見が得られると期待される。

参考文献

- 1) P. Neumann: The Geometry of Slip Processes at a Propagating Fatigue Crack II, Acta Met., 22, 1167, (1974).
- 2) P. Neumann, H. Verhoff and H. Fuhlrott: On the Mechanisms of Fatigue Crack Growth, Proc. ICF-4, Waterloo, 2, 1313, (1977).
- 3) D. L. Davidson and J. Lankford: Dynamic, Real-Time Fatigue Crack Propagation at High Resolution as Observed in the Scanning Electron Microscope, ASTM STP 675, (1979) 277.
- 4) D. L. Davidson and J. Lankford: Mixed-mode Crack Opening in Fatigue, Mat. Sci. and Eng., 60, (1983) 225.
- 5) 菊川 眞, 城野政弘, 安達正晴: 疲労き裂進展過程の走査電子顕微鏡による連続観察とき裂進展機構, 材料, 27 (1978) 853.
- 6) 菊川 眞, 城野政弘, 岩橋 稔, 市川光秋, 上杉暢彦: 進展する疲労き裂の電界放射型走査電子顕微鏡による動的直接観察, 材料, 31 (1982) 669.
- 7) 城野政弘, 宋 智浩, 岡部雅彦, 上杉暢彦, 大垣雅由, 江口直紀: 発生初期微小き裂進展から弾塑性巨視疲労き裂までのき裂進展速度と開口挙動, 材料, 33 (1984) 560.
- 8) 城野政弘, 宋 智浩, 後藤邦夫: 進展する疲労き裂の電界放射型走査電子顕微鏡による動的直接観察, 日本機械学会論文集, A-51 (1985) 1453.
- 9) 城野政弘, 宋 智浩, 後藤邦夫, 山田真治: 疲労き裂進展の動的直接観察と疲労き裂進展機構(進展速度とき裂先端開口変位の関係), 材料, 35 (1986) 918.
- 10) 城野政弘, 菅田 淳: 変動荷重下の疲労き裂進展の走査電子顕微鏡による直接観察とき裂進展機構, 材料, 39 (1989) 1119.
- 11) 城野政弘, 菅田 淳, 宝田真一, 大久保啓之, 駒城倫哉: 走査電子顕微鏡による疲労き裂材料進展挙動の動的直接観察と画像処理技術の開発, 材料, 39 (1990) 1583.
- 12) 城野政弘, 菅田 淳, 吾妻健夫: 疲労き裂先端近傍変形の画像処理技術による定量解析, 日本機械学会論文集, A-57, 541 (1991) 2215.
- 13) 城野政弘, 菅田 淳, 濱崎俊彰: 電界放射型走査電子顕微鏡による 2 段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展挙動の直接観察, 材料, 40 (1991) 1428.
- 14) 駒井謙治郎: 画像処理技術を用いた破面解析の現状, 日本機械学会関西支部第 167 回講習会教材, (1989) 49.
- 15) 市田浩三, 吉本富士市: スプライン関数とその応用, 教育出版, (1979).