

画像処理を用いた変動荷重下の疲労 き裂進展挙動のSEM直接観察

大阪大学工学部
川崎製鉄(株)

正 城野 政弘, 正 菅田 淳, 学 駒城 倫哉
正 ※大久保 啓之

1. 緒言

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微視的直接観察が有効な手段となり、多くの研究が行われている¹⁾。筆者らもこれまでに電界放射形走査電子顕微鏡内に疲労試験装置を装着し²⁾、疲労き裂進展試験を行い進展中の疲労き裂を動的直接観察することで、き裂進展機構の解明を試みてきた³⁾。また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、画像処理を行うことによりより客観的な定量解析も試みてきた⁴⁾。本研究ではこれをさらに進めるとともに2段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展挙動についてき裂先端周辺を中心に微視的直接観察およびマイクロコンピュータによる画像処理を行い、おもに荷重変動時におけるき裂周辺の変形状態ならびにき裂開口量の変化などについて検討を加えた。

2. 試験装置および画像入力方法

試験装置はすでに報告した電界放射形走査電子顕微鏡(SEM; 日立製作所 HPS-2S)に装着可能な電気油圧サーボ式引張圧縮疲労試験機²⁾である。試験には一方向性ケイ素鋼板のCCT試験片を用いたが、表面にはSEMの2次電子像をより鮮明にするため厚さ50Å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。

図1に画像入力システムのブロック線図を示す。荷重、変位(引算変位)等各種計測信号および画像信号はA/D変換器を通してマイクロコンピュータ(NEC PC9801

-VX4 記憶容量 4Mbytes)へ送られる。特に動的な繰返し荷重下での観察像を実時間で取込むためには、画像入力に高速性が要求されるため、高速Direct Memory Access型A/Dコンバータ(ELMEC EC-2390)を用いて直接メモリへデータを書き込むようにしている。本研究では、画像のコンピュータへの取込みと同時に比較のため写真撮影も行った。この場合写真撮影に必要な露出時間は4秒程度であるため、試験は周波数0.1Hzの台形波(荷重保持時間は最高および最低荷重でともに4sec)を用いて行った。このためSEMの走査時間を10msec/本、掃引時間を5sec/7V-Aに設定し、1画面の構成画素は縦490ドット×横200ドットとなるようにA/D変換速度を50μsec/ドットとし、分解能12bitで取込んだ。この結果画像データとしては、連続した最高5フレームの取

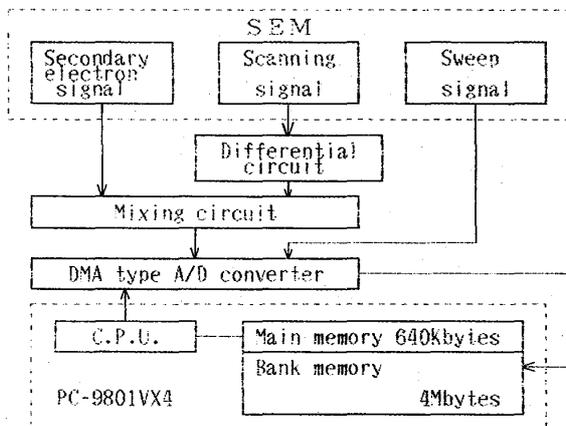


図1 画像入力システムブロック線図

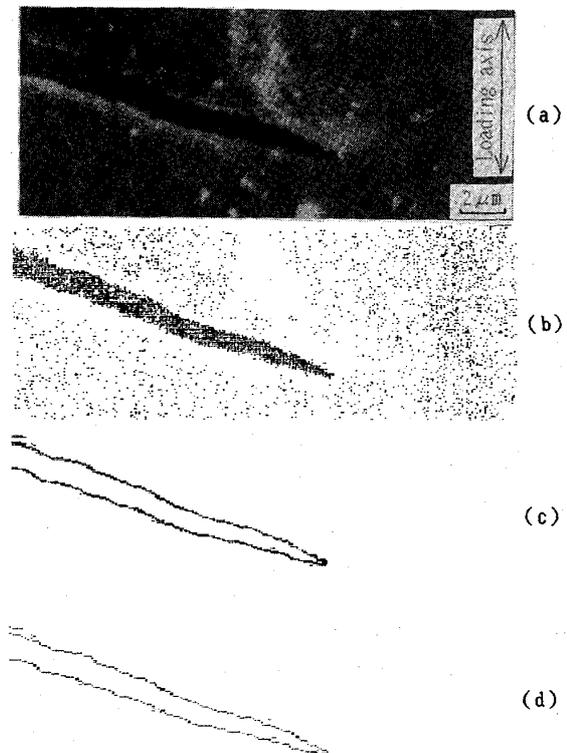
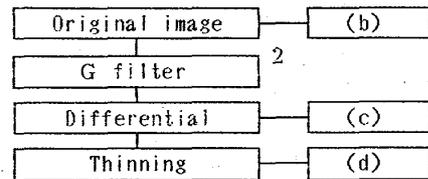


図2 輪郭抽出プロセス

込みが可能である。取込んだ連続画像の再構成は、A/D変換器の他チャンネルより同時に取込んだ掃引信号により1画面ずつに分割している。さらに入力される画像のSEM2次電子信号には水平走査信号の微分信号を加算して取込んでおり、微分信号の立ち下がりにより、水平走査の開始点を検出することができるようになってきている。

3. 画像処理手法

図2に画像の輪郭抽出の手順を示す。図2(a)が処理対象としたSEM写真である。取込んだ1画面のデータには荷重の負荷、除荷時も含められているため、データの最初と最後を合わせて30%カットし、荷重保持状態の画像のみをディザ法⁵⁾を用いて表示したものが図2(b)である。なお実際のSEM画像と縦横比を合わせるため縦170ドット×横315ドットで表示している。図2(c)は(b)画像にノイズフィルターとして作用素Gを⁵⁾2回掛けた後微分したものである。さらにこれを細線化して図2(d)を得る。このような処理で、き裂縁輪郭の抽出はできるが、き裂縁輪郭および標点として用いた酸化マグネシウム結晶の輪郭を同時に抽出することは困難であった。そこで画面全体の明確な画像を得るためには、微分を行う際のしきい値を変化させ、き裂縁と標点についてそれぞれ別個に最も明確に現れる処理を行い両者の画像を合成して一画像とした。

4. 実験結果

本実験では荷重比3:2、頻度比1:100、応力比 $R=0$ の2段繰返し変動荷重試験を行い、荷重変動時付近を中心にき裂開口量、き裂進展挙動について観察を行った。

微視的変形状態の計測として、まず荷重負荷にともなうき裂先端周辺の変形挙動について検討を行った。図3は最小荷重時とそれに続く負荷時において計測された画像を合成し、き裂先端周辺の標点の移動量を示したものである。最小、最大荷重時の画像間でのき裂進展量はごくわずかでありき裂先端の位置はほとんど変化していないと考えられるので、ここではき裂先端を2画像の同一点と考えて重ね合わせている。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酸化マグネシウム標点の移動量が大きく、それに比べてき裂前方ではすべりは極わずかであることがわかる。誤差もあるので全ての点が同じであるとは言えないが、酸化マグネシウムの位置は負荷されるにつれてすべり線方向へ移動する傾向にある。このことは菊川らが、先にKレベルが高く完全なMode I き裂に対して写真観察から得た結果³⁾と定性的にはよく一致している。

次に荷重変動時に着目し、高レベル荷重の負荷による低レベル荷重下でのき裂の開口量の変化について検

討した。図4は $K_H/K_L=23.4/16.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の2段繰返し変動荷重試験での高、低レベル荷重の最大荷重負荷時の計測画像の例である。(a)が高レベル荷重の負荷直前、(b)が高レベル荷重負荷時、(c)が負荷直後の画像である。当然ながら高レベル荷重時にはき裂が大きく開口し、また変形も大きいことがわかる。しかしながら高レベル荷重負荷前後の2画面を比較してもき裂開口変位およびき裂周辺の変形場には顕著な差は認められないようである。このように定常な繰返し変動荷重の場合には、高-低2段変動荷重下で認められるようなき裂進展の過渡的現象⁶⁾は起こらないばかりでなく、高レベル荷重の負荷前後でも、き裂開閉挙動に相違が生じない。このことから定常なき裂の開口あるいは、き裂周辺の変形を記述する巨視的破壊力学パラメータを考えれば、それによるき裂進展速度の推定法が、き裂進展機構上も妥当性を持つことが示唆されるが、本試験ではき裂開口量や変形量が小さいため明確な結論は、今後の詳細な検討に待ちたい。

図5は比較的進展速度の速い領域で、変動荷重8プ



図3 最大荷重時と最小荷重時の比較

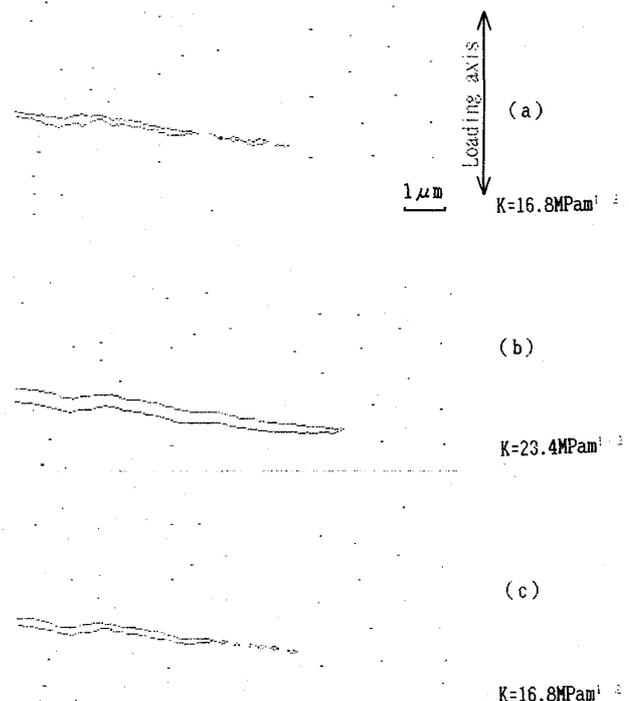


図4 高レベル荷重負荷前後の画像の比較



図5 き裂進展量計測例(例1)



図6 き裂進展量計測例(例2)

表1 き裂進展速度推定例

		ΔK MPam ^{1/2}	$(da/dn)_{mic}$ predicted by ΔK m/cycle	Δa predicted by ΔK m	CTODy m	$(da/dn)_{mic}$ predicted by CTODy m/cycle	Δa predicted by CTODy m	Δa measured by CRT m	Δa measured by image m
Example 1 (8 blocks)	High level	21.0	4.68×10^{-8}	5.42×10^{-6}	1.84×10^{-7}	1.84×10^{-8}	3.10×10^{-6}	2.88×10^{-6}	2.86×10^{-6}
	Low level	14.7	6.31×10^{-9}		1.11×10^{-7}	3.69×10^{-9}			
Example 2 (3 blocks)	High level	26.1	1.10×10^{-7}	6.39×10^{-6}	2.20×10^{-7}	2.22×10^{-8}	5.59×10^{-6}	4.70×10^{-6}	4.73×10^{-6}
	Low level	17.9	2.20×10^{-8}		1.84×10^{-7}	1.84×10^{-8}			

ロック間なき裂画像を比較し、き裂進展量を計測したものである(例1)。前述したようにき裂先端前方ではすべり変形はわずかであり、酸化マグネシウム標点の位置は2画像間で変わらないと考えられる。そこでここではき裂先端前方の標点の位置同定を行うことによって2画像を重ね合わせており、き裂長さが変化していることがわかる。これよりき裂は8ブロックでX方向に78ドット、-Y方向に26ドット進展しており、荷重軸直角方向に 2.86×10^{-6} mの進展が計測された。図6も同様にき裂進展量の計測例(例2)で、変動荷重3ブロックの様子を示す。この図ではX方向に129ドット、-Y方向に41ドットの進展が測定されておりき裂進展量は荷重軸直角方向に測って 4.73×10^{-6} mとなる。なお電子顕微鏡画面からの測定値は例1に対して 2.88×10^{-6} m、例2に対して 4.7×10^{-6} mで画像処理により得られたものとよく一致しており、ここで行った画像処理によるき裂進展量の計測は有効であると考えられる。先に報告した計測システム⁴⁾では全画面の入力ができず広い領域の標点を観察することができなかつたため、き裂進展量の測定にはき裂線の形状パターン認識の必要があつたが、この方法でより簡易に測定することが可能となつた。

次に上述の画像より計測したき裂進展量と ΔK_{eff} およびき裂先端開口変位CTODから推定されるき裂進展量の比較を行う。き裂進展量の推定には一定振幅試験による微視的なき裂進展速度と ΔK_{eff} の関係ならびに進展速度とCTODyの関係を用いた線形加算則により行った。得られた結果を表1に示す。 ΔK_{eff} による推定では、実測されたき裂進展量よりやや大きめの推定となっているが、CTODyによる推定では推定値と実験値はよく一致していることがわかる。これは、今回測定したき裂進展量が3~8ブロック間なき裂進展を平均したものであり、き裂進展量も少ないため、き裂先端

で起きている現象をよりよく表していると考えられる微視的パラメータでき裂進展量を推定した方が、実際なき裂進展量に近いものとなつたと考えられる。

5. 結言

2段繰返し変動荷重下の疲労き裂進展挙動についてき裂先端周辺を中心に微視的直観観察およびマイクロコンピュータによる画像処理を行い、荷重変動時におけるき裂周辺の変形状態ならびなき裂開口量の変化などについて検討を加えた。得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

1) 電界放射型走査電子顕微鏡から2次電子信号を直接マイクロコンピュータへ高速DMA型A/Dコンバータを介して取込む計測システムを構成し、これにより0.1~1Hz程度の繰返し荷重下での連続した5画面の観察画像の実時間での取込みを可能とした。

2) 観察画像を処理することによって、疲労き裂縁や酸化マグネシウム標点の輪郭のみを抽出して表示することができ、き裂先端周辺の変形状態等の定量的取扱が容易になつた。さらに画像間の比較を行うことによって、き裂進展量の計測が比較的容易に行えるようになり、得られた結果は電子顕微鏡画面からの目視による結果とよく一致し、画像処理によるき裂進展量計測の有効性が確認された。

謝辞 本研究には文部省科学研究費一般研究(C)の補助を受けた。また研究遂行に当たり大阪大学学生磯兼智生君、古川裕之君の助力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Neumann, P., Acta Met., 22, (1974) 1167.
- 2) 菊川他4名, 材料, 31, (1982) 669.
- 3) 菊川他2名, 材料, 27, (1978) 853.
- 4) 城野他2名, 機構論, 864-1, (1986) 63.
- 5) 森本吉春 "パソコン画像処理ハンドブック"(1988) 共立出版
- 6) 城野他3名, 材料, 35, (1986) 918.