



走査形電子顕微鏡による 疲労き裂進展の直接観察

城 野 政 弘*

1. はじめに

19世紀の半ばすぎ、ドイツの鉄道技師 Wöhler により、車軸の折損事故に関連して金属材料の疲労の研究が始められて以来、数多くの研究成果が積重ねられてきているが、依然として機械・構造物の破壊事故が疲労を原因として起こっていることが多い。これは、一つには疲労に関する知識の集積とともに材料の使用条件がより苛酷になりつつあることがその理由であり、最近では、疲労き裂が発生、進展しても、それが致命的な破壊に至る以前に発見、補修されれば、機器の機能は満足されることから、このような考え方を積極的に取入れた損傷許容設計が行われるようになってきている。その場合、欠陥あるいはき裂の検出とともに疲労き裂の進展速度を正しく推測することが不可欠となる。き裂先端近傍の応力やひずみは、応力拡大係数、 K 、がわかればそれにより一義的に規定されることから、疲労き裂進展速度も応力拡大係数の変化幅、 ΔK 、によりよく表わされるが、変動荷重下のき裂進展速度や平均応力の影響あるいはき裂閉口現象^①など ΔK のみでは表わし得ない現象も多く、疲労き裂進展機構は必ずしも明らかではない。一方、疲労破壊は本来極めて局所的な現象であり、荷重の繰返しとともに進行することから、その機構を明らかにし本質的な理解を得るには、局所現象を微視的かつ動的に連続して観察することが重要となる。それには試料室が大きく、バルクな試料の観察が可能な走査形電子顕微鏡による観察が有力な手段と考えられ、当講座では、疲労き裂進展の実験結果を積重ねるとともに、十数年来大阪大

学名誉教授菊川真先生のご指導のもと、走査形電子顕微鏡の中に疲労試験装置を組み込み、疲労き裂進展挙動を直接観察することにより疲労き裂進展機構の解明に努めてきた。ここでは得られた二、三の結果を紹介する。

2. 試験装置および試験片

試験装置として、先ず通常の熱電子銃形走査電子顕微鏡内に油圧サーボ方式の疲労試験装置を組み込み、基礎実験を積重ねるとともに、さらに高分解能の観察を行うため、電界放射形走査電子顕微鏡内に同方式の疲労試験装置の組み込みを試みた。後者の試験機の概略図を図1に示す。⑧の取付けフランジより右側の部分が顕微鏡の中に入っており、②の試験片に動的な繰返し荷重を负荷しながら、直接観察が出来るものである。また本試験機では、油圧負荷装置のシリンダ側ならびにピストン側に接続されたチャック③、④が、固定台に対し互いに逆方向に運動するようにになっており、その運動量を調整することにより、動的な繰返し荷重のもとでも観察部を顕微鏡視野内で静止させることが出来るようにしている。

これらの試験装置による観察は、当然のことながら試験片表面に限られる。一方、疲労き裂の進展挙動は、拘束が大きく平面ひずみ状態に近い試験片内部と平面応力状態の試験片表面では異なり、通常は内部でき裂進展が先行し、表面でのき裂はそれにひきずられて進展するため、表面の観察から疲労き裂進展を支配する内部の進展挙動を推定することは困難となる。そこで本研究では、結晶粒径 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 、方位差 3% 以内の一方方向性珪素鋼板を試験材料とし、図2に示すような形状ならびに方向に試験片を採取して用いた。この場合作動すると考えられるすべり系の四つのすべり方向のうち試験片面に

*城野政弘 (Masahiro JONO), 大阪大学, 工学部機械工学科, 第一講座, 教授, 工学博士, 機械工学

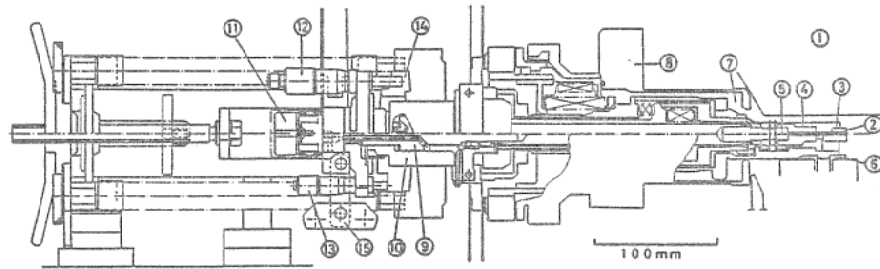


図1 走査形電子顕微鏡内疲労試験装置

(①電界放射形走査電子顕微鏡, 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真空予備室, ⑧試験機取付けフランジ, ⑨ピストン, ⑩シリンダ, ⑪サーボ弁, ⑫微動マイクロメーター, ⑬粗動マイクロメーター, ⑭環状ビーム, ⑮自在継手)

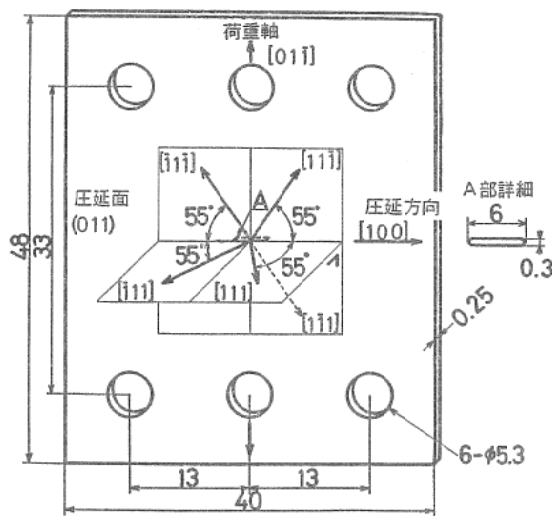


図2 試験片形状と作動すべり系

平行でない二つは荷重軸に直角な面内にあって作動せず, 残り二つのすべり系は試験片表面に平行な面内にあり板厚方向にはすべり成分をもたないので, 試験片の表面でも平面ひずみ状態の内部と同じ変形挙動が観察できることになる。

3. 観察結果

図3は, 熱電子銃形走査電子顕微鏡内疲労試

(注) 疲労き裂は先端に形成される塑性変形層の中を進展していく結果, き裂縁近傍には圧縮の残留応力が生じ, そのため疲労き裂はたとえ荷重が引張りであってもある荷重点までは閉じていることになる。この現象をき裂閉口現象 (crack closure) と呼ぶが, き裂閉口にはその他の複雑な要因も関係し, しかもこれが疲労き裂の進展に極めて重要な役割を果たすことから, その機構解明は現時点での重要な研究課題の一つとなっている。

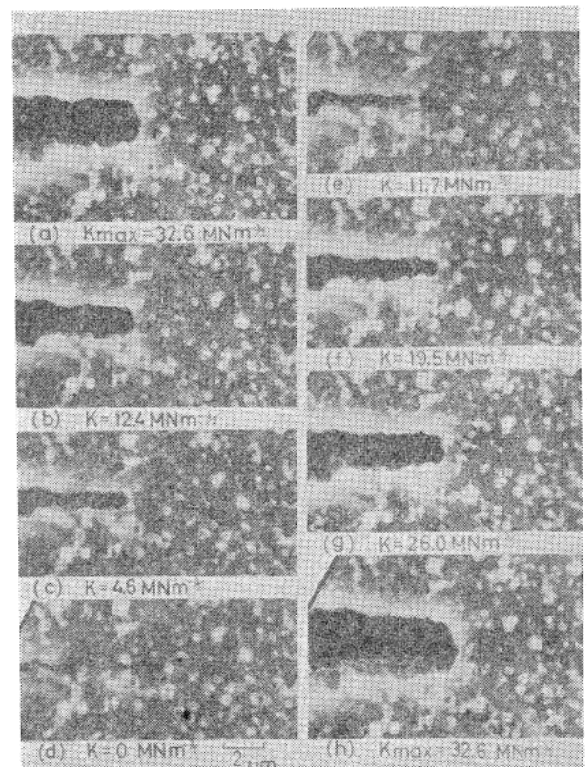


図3 Mode I 疲労き裂進展挙動の連続観察 (真空中)

験装置を用いた観察の一例で, 荷重 (K値) が比較的高く, き裂進展が荷重軸方向に対してほぼ直角となる Mode I き裂進展の場合である。図には最大荷重の (a) からそれに続く 1 サイクルの荷重繰返しにおいて適宜荷重保持を行い写真撮影したき裂進展の連続観察例を示している。この場合破面には表面までストライエーションが認められ, この間隔は毎回の進展量とほぼ一致している。き裂先端の形状は写真にみられるように約 130° の開き角をもち, この角度は

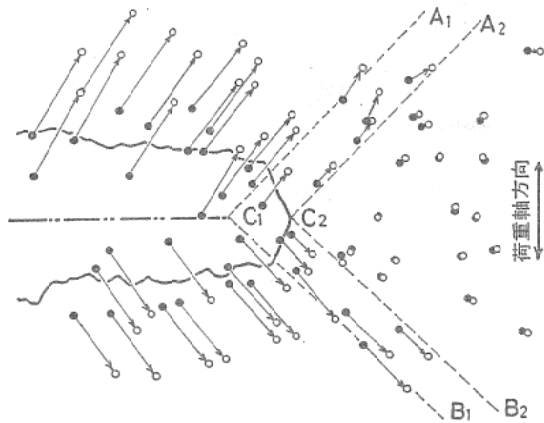


図4 引張過程における疲労き裂先端近傍の変形挙動

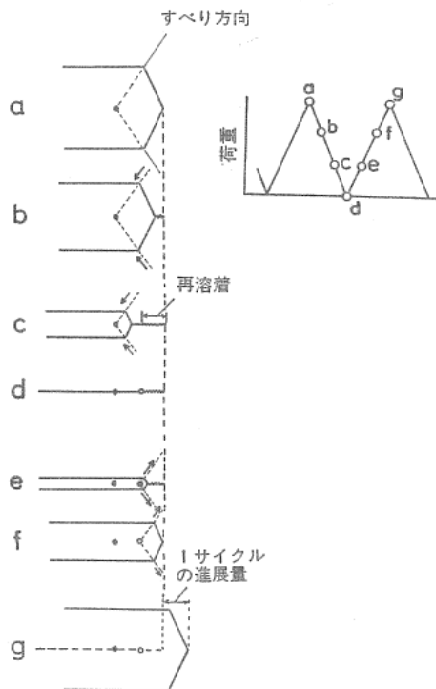


図5 Mode I 疲労き裂の進展モデル (真空中)

図3(a)(b)(c)(f)(g)(h)からわかるように除荷過程、引張過程ではほぼ一定で、上下のき裂縁の形状もほとんど変化していない。このことは、き裂先端の頂点のみですべり変形が起こり、引張あるいは除荷過程中このすべりが一定量順次作動して開閉口していく交互すべり面分離によりき裂が進展していることを示している。図4は、図3(d)から(h)に開口した際のき裂周辺の変形を試験片表面に付着させた酸化マグネシウム粉末を標点として測定したもので、この変形様式からも前述のことが確認され、これらの観察からス

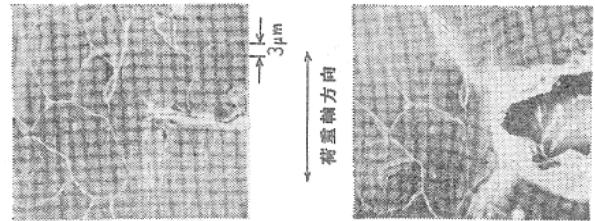


図6 微小格子とき裂開口によるその変形

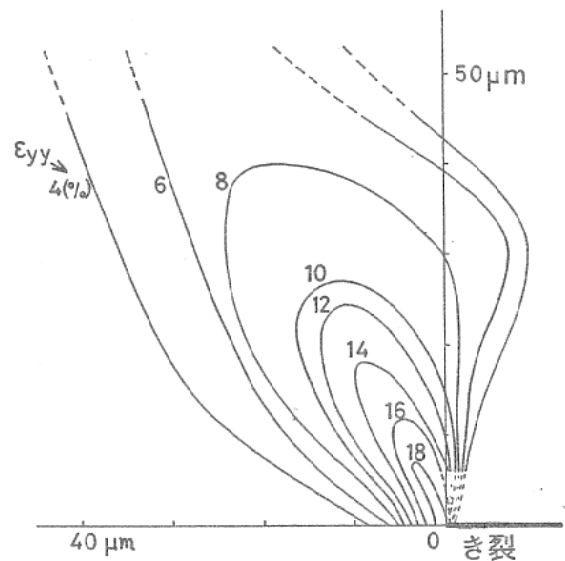


図7 疲労き裂先端のひずみ分布

トライエーションを形成して進展する Mode I 疲労き裂の進展は、図5のモデルで表わされることがわかった。ただし電子顕微鏡試料室など真空環境中では、前回すべりを起こしたき裂先端の一部に再溶着が起るため実際の進展量はその分だけ小さくなる。

なお、このようなき裂先端近傍の変形様式は、例えば図6(a)に示すように、観察部位にフォトリソ膜を塗布し、顕微鏡の走査ビームを利用した電子ビーム露光により超微小格子を予め描いておくと、その格子の変形からも測定することができる。図6(b)は引張荷重によりき裂先端が開いた場合の格子ひずみの様子を示すものであり、これらの格子点の移動から求めたき裂先端近傍の荷重軸方向ひずみ分布の一例を図7に示す。

以上は、熱電子銃形走査電子顕微鏡内に組込んだ試験装置による観察例であるが、この場合顕微鏡の分解能の関係で、観察は比較的K値レ

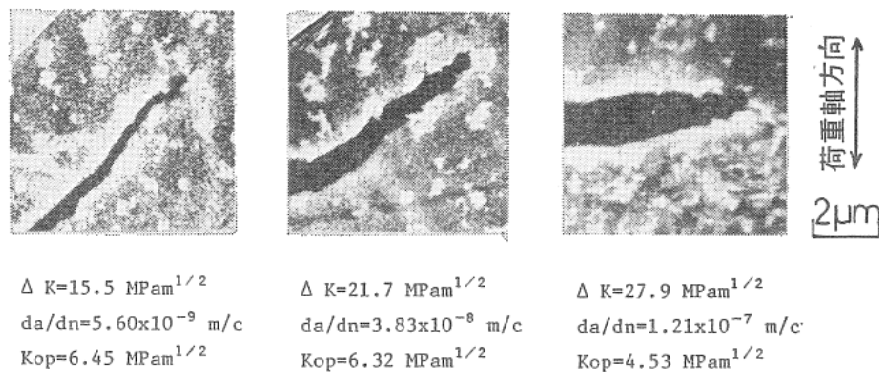


図8 疲労き裂進展の動的直接観察例

ベルの高い場合に限られ、またこのような領域では写真撮影のため荷重を保持するとき裂の開口量が増加するなど試験速度の影響もあることがわかった。そこで図1に示したようにより分解能の高い電界放射形走査電子顕微鏡内に疲労試験装置を組込み、動的な直接観察を行うことを試みた。試験に当たっては、観察部を機械的な機構により顕微鏡視野内にとどめると同時に荷重信号と顕微鏡走査線の掃引信号とを同期させることにより動的荷重下でのき裂先端近傍の様子をストロボスコープに観察できるようにした。このようにしてK値レベルを広い範囲に変えて観察を行った例を図8に示す。 ΔK が大きい場合は、き裂先端で対称なすべりが生じ、き裂は荷重軸にほぼ直角な方向に Mode I で進展するが、 ΔK レベルが低くなるにつれ、上下どちらか一方のすべりが優勢となり、き裂進

展方向は荷重軸直角方向からずれ Mode I と Mode II の混合形となる。このような Mode II 成分が増加するにつれて破面の凹凸も増し、き裂開口点、 K_{op} 、の値も高くなることが観察される。

4. おわりに

以上のように走査形電子顕微鏡による動的なき裂進展挙動の直接観察は、疲労き裂進展機構の解明に対しきわめて有力な手段であり、き裂進展速度と進展機構の対応などに対する知見が得られつつあり、またき裂先端近傍の変形や開口量の定量測定は、微視的な観察結果と工学的な巨視的試験結果との橋渡しとなることが期待される。今後は変動荷重下での疲労き裂進展挙動の観察や定量測定などを進めて行きたいと考えている。