

モード I 疲労き裂先端近傍場での 1 サイクル中のすべり変形挙動†

元屋敷 靖子* 菅田 淳** 植松 美彦**
森山 拓哉*** 城野 政弘**

Slip Deformation around Mode I Fatigue Crack Tip during One Loading Cycle

by

Yasuko MOTOYASHIKI*, Atsushi SUGETA**, Yoshihiko UEMATSU**,
Takuya MORIYAMA*** and Masahiro JONO**

Fatigue test was conducted on a grain-oriented 3% silicon iron under constant amplitude loading. Slip behavior around the fatigue crack tip was observed at the several levels of one loading cycle by means of Atomic Force Microscope (AFM) in order to elucidate the fatigue crack mechanisms. The quantitative evaluation of the fatigue crack growth behavior could be achieved by using the image processing technique. During loading, slips could begin to operate only when the applied stress reached to a certain level. Two preferential slip systems operated at the crack tip in this material. They moved alternately and caused the crack opening and propagation during loading. On the other hand, slips moved in the opposite direction to those during loading at the crack tip alternately and this led the crack closure during unloading. It can be said that the crack open plastically by the slip deformation after it open elastically.

Key words : Atomic force microscope, Mode I fatigue crack growth, Slip deformation, Image processing technique

1 緒 論

疲労き裂進展メカニズムの解明にはき裂先端近傍で生じる現象の観察が非常に有効な手段であり、これまでも光学顕微鏡や SEM を用いた観察によって様々な知見が得られている^{1)~5)}最近では高分解能を有する原子間力顕微鏡 (AFM) が、疲労き裂進展メカニズム解明のために用いられている。著者らの以前の研究⁶⁾において、結晶方位差が 3% 以内の一方性ケイ素鋼板を用いて疲労き裂進展試験を行ない、Mode I で進展する疲労き裂先端近傍での荷重 1 サイクル中の微視的挙動について AFM を用いて観察した。試験は荷重軸直角方向に対して $\pm 55^\circ$ 方向の 2 つのすべり系のみが作動するように採取した試験片を用いて行ない、AFM を観察手法として用いることで、き裂先端近傍で作動するすべりを同定し、また得られた AFM 画像に画像処理を施すことですべり変形量を定量的に評価し、CTOD とすべり変形量には相関があることを示した。このように AFM を用いた疲労き裂の観察によって、これまでの顕微鏡では観察が困難であった、き裂先端近傍で作動し、き裂進展に関与する個々のすべり線を確認することができるなど、AFM による疲労き裂先端近傍の観察が非常に有効であることが確認された。しかしながら、既報⁶⁾では観察を実施するための 1 サイクルでの荷重分割数が十分でなく、また上下どちらか一方のすべり変形挙動に注目していたため、1 サイクル中に上下のすべりが同時に生じるのか、あるいは非対

称に生じるかなど、その詳細については明らかになっていない。

著者らは前報⁷⁾において同じく一方性ケイ素鋼板を用いて数サイクルにわたって最小および最大荷重時での AFM 観察を行ない、高 K 値領域においてもすべりの非対称性が強い場合には、き裂はすべり作動量の大きい方に微視的に傾斜して進展することを確認した。また、一方のすべり変形量と他方の隣接する 2 本のすべり線の間隔を検討することで、このような傾斜き裂においても 2 つのすべりが交互に作動するすべり面分離機構でき裂は進展することがわかった。

そこで本論文では同材料を用い、高 K 値領域においてすべりの非対称性が強くないき裂について、1 サイクルでの荷重レベルに応じた挙動を AFM 観察した。この時 1 サイクルの荷重分割数を多く設定し、さらに上下 2 つのすべり系に注目することで、Mode I で進展する疲労き裂進展挙動の詳細について検討する。

2 供試材料および試験方法

供試材料は、前報⁷⁾と同じ平均粒径 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 、厚さ 0.28 mm に冷間圧延した方位差 3% 以内の一方性 3% ケイ素鋼板である。試験片は Fig. 1 に示す CCT 試験片であり、試験片表面に対して結晶方位が図中に示すようになるよう採取することで、荷重軸直角方向に対して $\pm 55^\circ$ をなす 2 つのすべり面 $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$ のみが作動する。

疲労き裂進展試験は、電気油圧サーボ式小型引張圧縮

† 原稿受理 平成 15 年 9 月 3 日 Received Sep. 3, 2003

* 正会員 Inst. for Materials Tech., Univ. of Kassel, Moenchebergstrasse, D-34109 Kassel, Germany

** 正会員 大阪大学工学部機械システム工学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Mech. Eng. and Systems, Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

*** 学生会員 大阪大学大学院 〒565-0871 吹田市山田丘, Graduate Student, Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

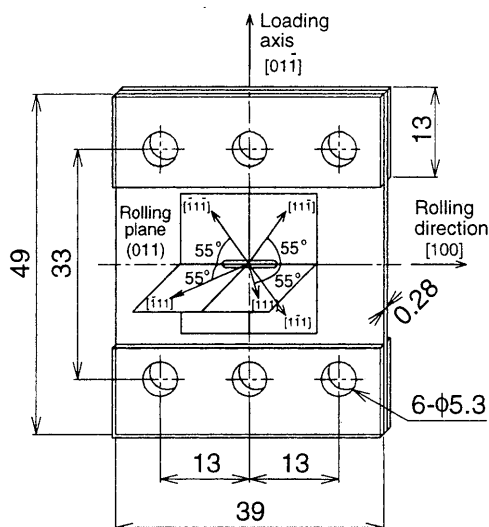


Fig. 1. Specimen configuration and crystallographic orientation of material.

疲労試験機を用い、繰返し速度 $f = 1\text{Hz}$, $\sigma_{\max} = 144\text{MPa}$, 応力比 $R = 0.05$ の一定振幅荷重を行なった。また、試験途中で一旦荷重を停止し、Fig. 2 に示す1サイクルの荷重レベルを12等分した点で荷重を保持し、そのとき採取した試験片表面のレプリカをAFMで観察することで、1サイクル中のすべり挙動を詳細に検討する。

3 実験結果

3・1 き裂先端近傍のすべり様相

Fig. 3 に最小荷重時である荷重点13におけるき裂先端を含む領域でのAFM画像を示す。このときの応力拡大係数範囲は約 $25.9\text{MPa}\mu\text{m}^{1/2}$ であり、き裂は巨視的には荷重軸直角方向に進展していた。ここで観察されたき裂は、上下のすべりには前報⁷⁾で観察されたような強い非対称性は見られず、微視的にもほぼ荷重軸直角方向に進展している。以下では、き裂先端から上下すべり方向に沿ってそれぞれ約 $1\mu\text{m}$ 離れた位置における上側のすべりの領域Uと下側のすべりの領域Lにおけるすべり変形挙動を詳細に観察、比較することで、き裂に対する上下のすべりと疲労き裂進展挙動との相関を検討する。

3・2 負荷時のすべり挙動

領域Uでの負荷時の荷重点1(最小荷重時)、荷重点5, 荷重点6, および荷重点7(最大荷重時)におけるAFM画像をFigs. 4(a)-(d)に示す。また同様に領域L

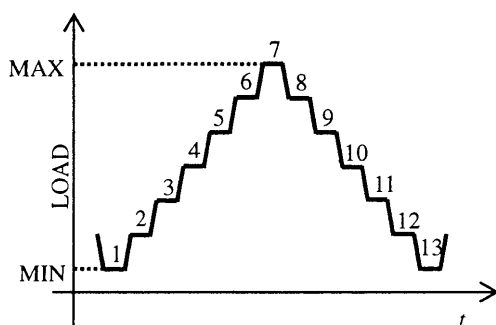


Fig. 2. Sampling points.

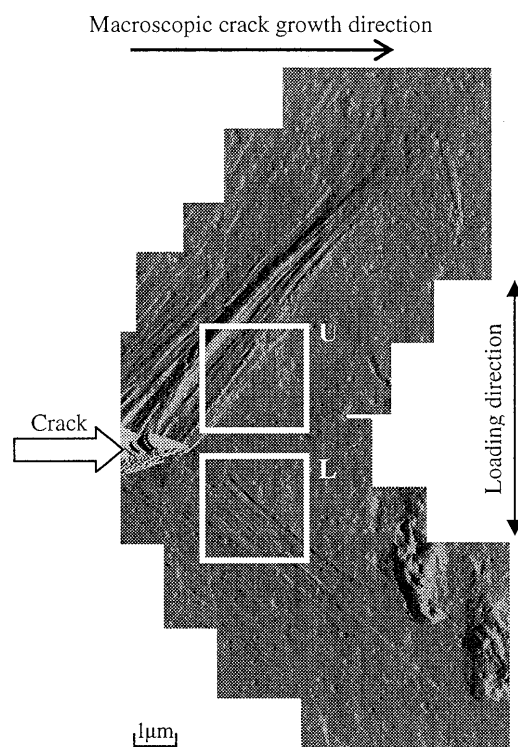


Fig. 3. AFM observation of slip deformation around fatigue crack tip (point 13).

については荷重点1, 荷重点6および荷重点7における画像をFigs. 5(a)-(c)に示す。領域Uの荷重点1(Fig. 4(a))で見られるすべりU1は以前のサイクルで作動したものである。荷重点1から5までは新しいすべりは見られなかったが、荷重点6(Fig. 4(c))ですべりU1の前方にすべりU2が新たに観察された。このことからこのすべりU2は荷重点5-6間で生じたものと考えられる。その後最大荷重時である荷重点7では、すべりU2の前方に新たなすべりは見られなかったが、すべりU2がこの領域の下側では一本だが、途中から2本に分かれて見えた。これは荷重点6-7間では、荷重点5-6間で作動したすべり面よりもわずかに傾いてすべりが作動したためと考えられる。ただしこれらのすべりはき裂先端のごく近傍では5-6間および6-7間でほぼ同じ位置で作動していたことから、以後では分離しているすべりによる変位もすべりU2によるものとして扱う。

一方領域Lでは荷重点1(Fig. 5(a))で見られるすべりL1は、以前のサイクルで作動したすべりであり、荷重点6までその前方に新しいすべりは見られなかった。最大荷重となった荷重点7で初めて、Fig. 5(c)に見られるようにすべりL1の前方で新たにすべりL2が生じているのが確認された。このように、作動するすべり系にかかわらず、疲労き裂先端近傍での新しいすべりの形成は負荷直後ではなく、ある程度負荷レベルが高くなった時点で生じることがわかった。

次に画像処理技術を援用して、各荷重点間での上下のすべり変形量を測定した。Figs. 6(a), (b)に処理例として領域Uの荷重点5-6間および領域Lの荷重点6-7

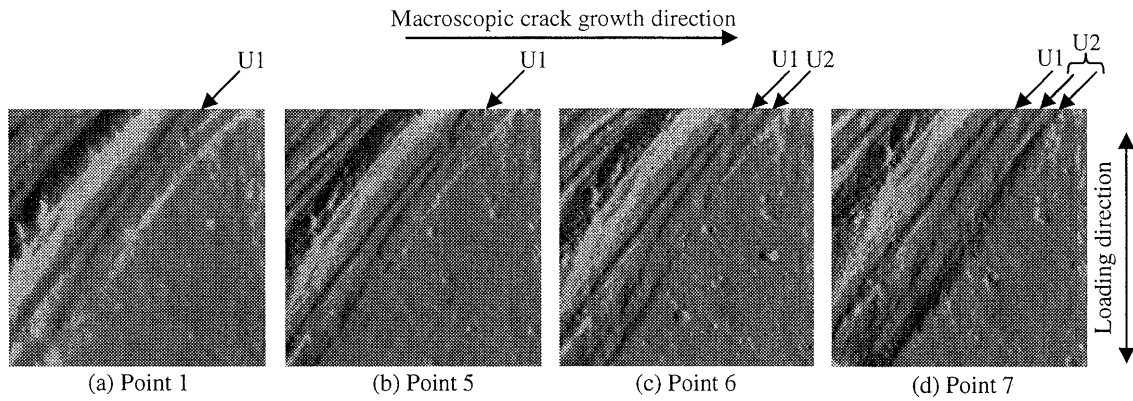


Fig. 4. AFM images near crack tip during loading (Region U).

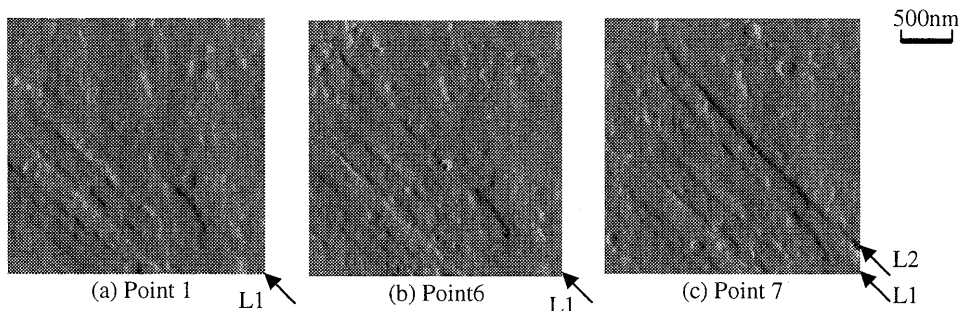


Fig. 5. AFM images near crack tip during loading (Region L).

間の結果をそれぞれ示す。図中○印が基準となる点（例えば (a) では荷重点 5 での点）を表しており、□印がこの点に対応する次の荷重点（例えば同じく (a) では荷重点 6）での位置を示している。そしてこの二つの点を結ぶ線分がその荷重点間で作動したすべり変形量に相当し、その向きは○印から□印へ方向となる。ただし、明らかに誤対応と見なされる点はマニュアル操作で取り除いている。また、各図中に破線で示す直線は AFM 画像で観察されたすべりに対応している。負荷開始からすべり U2 が生じる前の荷重点 5 までは領域 U、L ともにほとんど変位が生じていなかった。荷重点 5-6 間では Fig. 6 (a) に示すように領域 U ではすべり U2 を境に変位が現れていることから、このすべりによる変位が生じていることがわかる。その値は約 $0.17\mu\text{m}$ であった。一方新たなす

べりの生成が見られなかった領域 L ではほとんど変位が生じていなかった。その後荷重点 6-7 間では、領域 L では (b) に示すように新たに作動したすべり L2 による変位が生じており、その変位が約 $0.32\mu\text{m}$ であったのに対して、新たなすべりの生成が見られなかった領域 U ではすべり U2 がさらに約 $0.33\mu\text{m}$ 作動していた。また、いずれの領域においてもこれらの最も前方のすべりによる変形量に対して、後方のすべり U1 および L1 による変形量は微小であった。

このサイクルでは、上下のすべり線ともに新しいすべりが、それぞれ以前のサイクルで作動したすべりの前方で生じ、後方にあるすべりの変形量に比べてこれらのすべりによる変形量が最も大きいことから、き裂はこれらの新しく作動した上下のすべりによって進展したものと考えられる。この材料におけるき裂は前報で示したようにすべり面分離機構で進展していること考慮して、負荷時におけるき裂進展様相を模式的に Fig. 7 にまとめる。負荷時に新たに作動したすべりは、上のすべり U2 および下のすべり L2 であるが、U2 は荷重点 6 で観察されたのに対して、L2 はその後の荷重点 7 で初めて観察されたことから、先にすべり U2 が作動し、その後すべり L2 が作動したことがわかる。このことから、このサイクルの始めではき裂の最先端は (a) に示すようにすべり L1 上にあったものと考えられる。先に作動した上のすべり U2 によってき裂面は (b) のように変形する。荷重点 5 から 6 までの間に作動した上のすべり U2 による変形量は約 $0.17\mu\text{m}$ であり、荷重点 6-7 間のすべり U2 による変形量

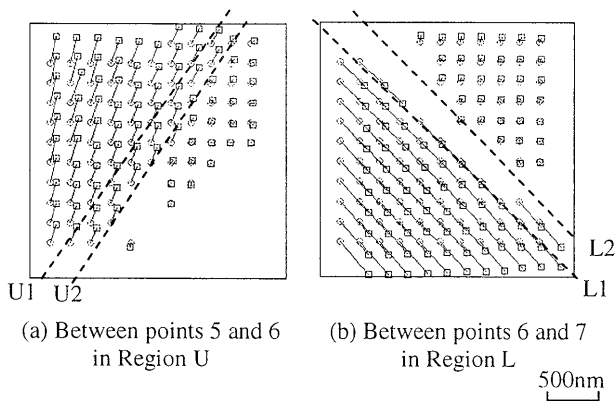


Fig. 6. Displacement distribution.

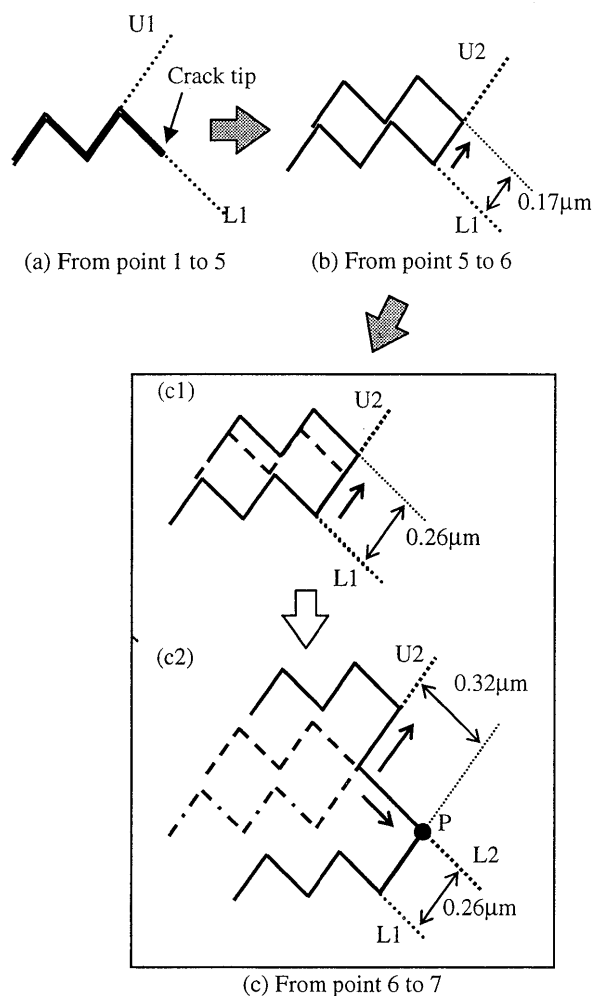


Fig. 7. Schematic illustration of fatigue crack behavior during loading.

は $0.33\mu\text{m}$ であったことから、負荷時に作動したすべり U2 による変形量の合計は約 $0.50\mu\text{m}$ となる。これに対して下のすべり L2 とその後方のすべり L1 との間隔は約 $0.26\mu\text{m}$ であった。また、すべり U2 の前方では新たなすべりは作動していなかったことから、荷重点 6-7 間ではまず (c-1) に示すようにすべり U2 が作動し始め、その後 (c-2) に示すようにすべり L2 が作動し始めた後もすべり U2 はさらに作動していたと考えられる。

負荷過程で新たに作動した上下のすべり U2 および L2 による変形量は、それぞれ $0.50\mu\text{m}$ および約 $0.32\mu\text{m}$ であった。また、すべりが作動し始めた順番は上のすべり、下のすべりの順であったことから、観察された領域では上のすべりの方が作動しやすい状態であったため、下のすべり L2 が作動し始めた後も、上のすべり U2 はさらに作動したものと考えられる。

3・3 除荷時のすべり挙動

Fig. 8 に領域 U および領域 L での除荷時の最小荷重時 (荷重点 13) での AFM 画像を示す。領域 U では除荷開始直前の最大荷重時 (Fig. 4 (d)) では見られなかったすべり U3 および U4 が負荷時に生成したすべり U2 の前方に見られる。すべり U3 は荷重点 9-10 間で、すべり U4 はその後の荷重点 10-11 間で生じたものであった。これ

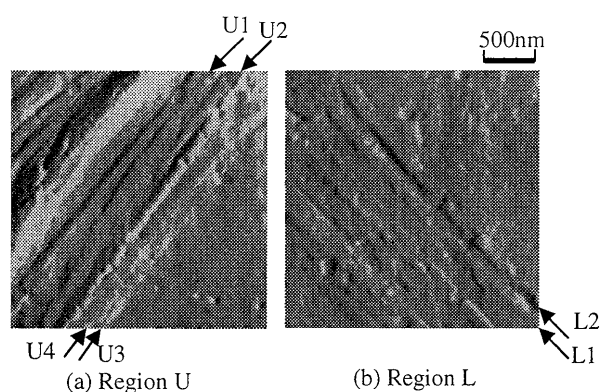


Fig. 8. AFM images near crack tip (Point 13).

に対して領域 L では、荷重点 13 まで新たなすべりは観察されなかった。

除荷時の各荷重点における AFM 画像をもとに画像処理を施すことで、各荷重点間でのすべり変形量を測定した。Fig. 9 に領域 U および領域 L における荷重点 9-10 間、10-11 間および 11-12 間での変位分布図を示す。図

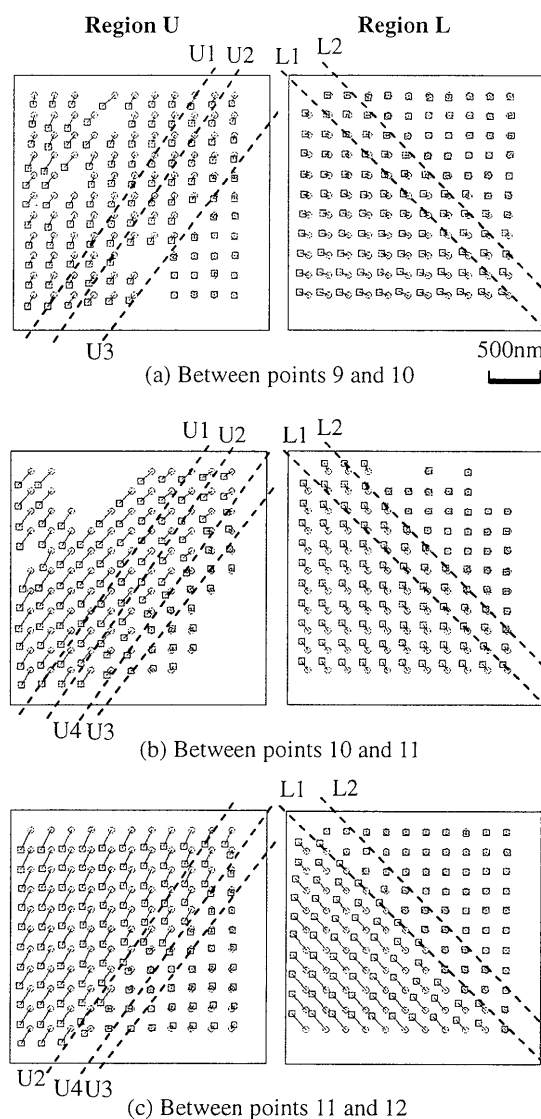


Fig. 9. Displacement distributions during unloading.

は省略するが、荷重点 9 までは上下すべりともほとんど変位が生じていなかった。これらの図に見られる除荷時のすべり変形は負荷時とは逆向きであった。そこで負荷時に見られたすべり運動を順すべり、除荷時のすべり運動を逆すべりと区別して呼ぶ。荷重点 9-10 間では、領域 U で新たに生じたすべり U3 による変形が生じており、その大きさは約 $0.07\mu\text{m}$ であった。一方領域 L ではすべり L2 による変位が見られ、その大きさは約 $0.03\mu\text{m}$ であったが、これは上のすべり U3 による変形量よりも小さいことから、荷重点 9-10 間では主に上のすべりが作動しており、このことから除荷時でもすべり易い上のすべりが先に作動したものと考えられる。

荷重点 10-11 間では、領域 U で新たに生じたすべり U4 による変形量は約 $0.11\mu\text{m}$ であった。また、すべり U4 とすべり U3 の間でほとんど変位が生じていないことから、すべり U3 は作動していないことがわかる。また、後方のすべり U2 もわずかに作動していた。領域 L ではすべり L2 がわずかに作動していたが、上のすべりによる変形量よりも小さく、約 $0.06\mu\text{m}$ であった。このことから荷重点 9-10 間と同様に、この区間でも上のすべりが主に作動していたと考えられる。

荷重点 11-12 間は、領域 U ではすべり U3 はここでも作動しておらず、すべり U4 による変形量が約 $0.10\mu\text{m}$ 生じていた。領域 L ではすべり L1 と L2 の間で変位が見られず、すべり L1 の後方で変位が約 $0.09\mu\text{m}$ 生じていることから、ここではすべり L2 は作動せず後方の L1 が作動していることがわかる。この区間で作動した上下のすべりによる作動量に大きな差は見られなかった。

荷重点 12-13 間では、領域 U ですべり U4 による変位は見られなくなっており、すべり U2 より後方の変位がわずかに生じているだけである。一方領域 L では、すべり L1 および L2 による変形はほとんど見られず、すべり L1 のさらに後方のすべり L0 が約 $0.13\mu\text{m}$ 作動していた。このことから、この区間では下のすべりが主に作動していることがわかる。

このように除荷直後に新たにすべりの形成もしくはすべりが作動するのではなく、荷重がある程度減少してからそれらの挙動が生じることがわかった。また、作動す

るすべりは除荷が進むとともに、徐々にき裂先端から後方に移動しているのが確認された。

そこで、Fig. 10 に除荷時のき裂進展様相について模式的に示す。除荷時では最初に荷重点 9-10 間で上のすべり U3 が作動していた。このとき上のすべり U2 と U3 の間隔は約 $0.32\mu\text{m}$ となっていたのに対して、負荷時に作動した下のすべり L2 による変形量は約 $0.32\mu\text{m}$ であったことから、負荷過程が終了した時点でき裂の最先端はすべり L2 上にあったと考えられる。その結果除荷時にはそこから逆すべりが (a) に示すように作動する。その後荷重点 10-11 間で上のすべり U4 がすべり U3 の後方で作動していたが、このすべり U4 はき裂先端のごく近傍では U3 とほぼ同じ位置から作動していたことから、(b) のように作動していたと考えられる。すべり U4 による変形は荷重点 11-12 間でも生じていたが、同じ区間で下のすべり L1 も作動していた。(b) に示すようにき裂の最先端で作動したすべり U3 および U4 による変形量の合計は約 $0.27\mu\text{m}$ であったのに対して、下のすべり L2 と L1 の間隔は約 $0.26\mu\text{m}$ であったことから、上のすべりが先に作動し、その結果すべり L1 と L2 の間のき裂は (c) のように完全に閉じたために、その後すべり L2 は作動せず、後方の L1 が (c) のように作動し始めたものと考えられる。また、荷重点 10-11 および 11-12 間では上のすべり U2 も作動していたことから、き裂形状は (c) に示すように非常に複雑なものになっていたと考えられる。

このように除荷時でも上下のすべりが交互に作動しており、荷重の減少とともに逆すべりが作動する位置は徐々に後方に移っていることから、き裂の最先端から順に逆すべりが作動することでき裂は閉じていくものと考えられる。ただし、負荷時に作動した上のすべり U2 による変形量は約 $0.50\mu\text{m}$ であったのに対して、除荷時ではすべり U3 および U4 による変形量の合計が約 $0.27\mu\text{m}$ で、すべり U2 による変形量は約 $0.19\mu\text{m}$ であったことから、除荷時に作動した上のすべりによる変形量の合計は約 $0.46\mu\text{m}$ となり、き裂の最先端からわずかに後方では、最小荷重時でも閉口していないと考えられる。

この 1 サイクルでの詳細観察結果では、除荷時に作動した逆すべりが負荷時の作動したすべりよりも前方で作

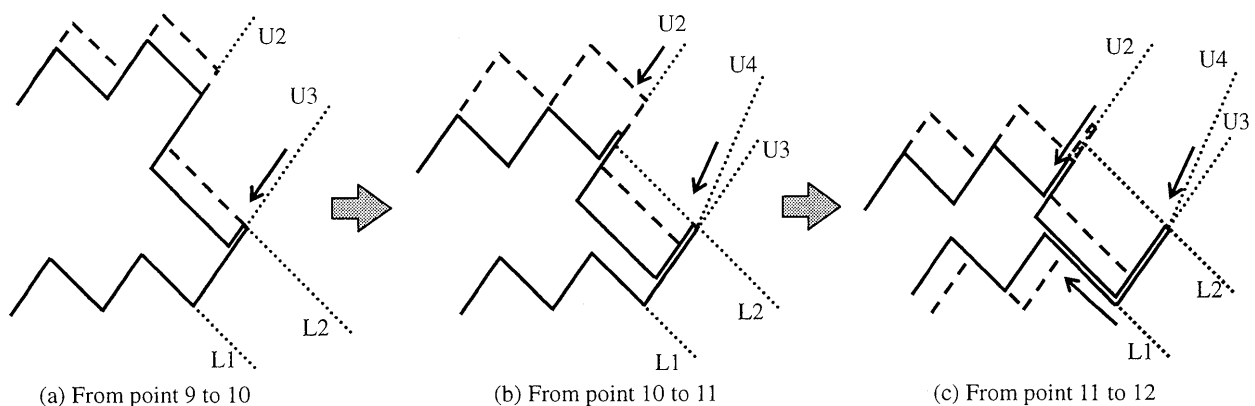


Fig. 10. Schematic illustration of fatigue crack behavior during unloading.

動していた。しかし、前報⁷⁾で示したように3サイクルにわたる連続観察結果では、いずれの場合も最大荷重時に存在していたすべり以外のすべりが最小荷重時の画像には見られなかったことから、ここで観察された荷重時に作動したすべりの前方で新たなすべりが作動するといった挙動は、必ずしも常に起こるものではないと考えられる。このような挙動が生じた原因としては、荷重時に上のすべり U2 が下のすべり L2 が作動し始めた後もさらに作動した結果、除荷開始時のき裂形状が Fig. 7 (c-2) に示すように複雑なものとなったため、除荷時にはすべり U2 も作動していたが、すべり L2 上のき裂最先端点 P でも作動し易い上のすべりによる新たな逆すべりが生じたものと考えられる。

3・4 き裂開閉口挙動

光学顕微鏡を用いてき裂先端開口変位 (CTOD) の変化を測定した。き裂は荷重点 4 までは荷重点 1 の状態とほぼ変わらず、閉じたままであった。その後荷重点 5 では、き裂の開口が確認された。先に述べたように荷重時のすべり変形は荷重点 5 以降で生じていたことから、この荷重点 5 で観察された開口はすべり変形によるものではなく、弾性的に開口したものと考えられる。開口変位はその後もさらに増加し、荷重点 7 で最大となった。すべりが作動し始めた荷重点 5 から荷重点 7 の状態に至るまでのき裂先端開口変位 (CTOD) の増加分を測定すると約 $0.8\mu\text{m}$ であった。ただしここではき裂先端後方約 $2\mu\text{m}$ の位置で測定された値を CTOD としている。荷重時のすべり変形による CTOD は Fig. 7 に模式的に示したように、主にこのサイクルで新たに作動したすべり U2 およびすべり L2 によるものであると考えられることから、これらのすべり変形量およびすべり方向を考慮して CTOD を求めると約 $0.64\mu\text{m}$ となり、光学顕微鏡観察から類推されたすべりが作動した後の CTOD の増加分に近い値であった。このことから、すべりが作動し始めた後のき裂の開口は、き裂先端近傍で作動した順すべりによって生じたものであることがわかる。また、巨視的に観察される CTOD には弾性的な開口およびき裂先端近傍でのすべり変形による開口の両方が含まれていることが確認された。

除荷時には先述のようにき裂先端近傍で逆すべりが作動しており、それによって CTOD は最大荷重 (荷重点 7) の状態から最小荷重時 (荷重点 13) の状態にまで減少しているのが確認できる。しかしながら荷重点 13 における CTOD はこのサイクルの始めの荷重点 1 の状態にまで戻っていなかった。このことから、前項でも述べたようにき裂最先端近傍は閉口しているものと考えられるが、わずかに後方では閉口していないことがわかる。これは荷重時の順すべりの作動量の方が除荷時の逆すべりの作動量に比べて大きかったためである。

以上のようにき裂はまず弾性的に開口し、その後き裂先端近傍で作動する荷重時の順すべりによってき裂が開口したと考えられる。また、除荷時でも弾性的にき裂が閉じ始めた後、逆すべりによってき裂が閉口することが

わかった。ただし、これらは巨視的にき裂先端から離れた位置で観察した結果であり、き裂先端のごく近傍のすべりが作動するような領域では、Figs. 7, 10 に模式的に示したようなすべり変形によるき裂開閉口が生じていると考えられる。また既報⁶⁾では確認できなかった、上下のすべりが1サイクル中で交互に作動する様相が観察された。

4 結 論

本研究では、一方向性 3% ケイ素鋼板を供試材として疲労き裂進展試験を行ない、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いてき裂先端近傍の様相を1サイクル中で詳細に観察し、荷重レベルに応じたすべり変形挙動について画像処理解析を援用することで定量的に検討した。また、それらの結果から1サイクルにおける疲労き裂進展メカニズムについて検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 荷重時の順すべりは荷重直後から作動し始めるのではなく、荷重がある程度増加した後に作動し始める。除荷時の逆すべりも、除荷開始後しばらくしてから作動し始めていた。

(2) 荷重過程では、先に一方のすべり系が以前のサイクルのき裂最先端で作動し、その後他方のすべり系がそのときのき裂の最先端から作動し始める。このように上下のすべりが交互に作動することでき裂は進展することが確認された。

(3) 荷重時に上下2つのすべり面でそれぞれ新たな順すべりが以前のサイクルで作動したすべりの前方で作動することによってき裂は開口し、進展する。除荷時には逆すべりが最大荷重時のき裂の最先端から作動し始めることで、き裂は先端から徐々に閉口する。

(4) 巨視的に観察されるき裂先端開口変位 (CTOD) は、荷重開始後しばらくして弾性的に増加した後にすべり変形によって塑性的に増加すると考えられる。

(5) 本実験のようにき裂進展方向に対して上下2つのすべり系のみが作動する場合、それぞれのすべり系が交互に作動するすべり面分離機構でき裂が進展することが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) P. Neumann, *Acta Metall.*, **22**, 1155 (1974).
- 2) 菊川 眞, 城野政弘, 安達正晴, *材料*, **27**, 853 (1978).
- 3) 菊川 眞, 城野政弘, 岩橋 稔, 市川光秋, 上杉暢彦, *材料*, **31**, 669 (1982).
- 4) 城野政弘, 宋 智浩, 後藤邦夫, *日本機械学会論文集*, **A-51**, 1453 (1985).
- 5) 城野政弘, 菅田 淳, 吾妻健夫, *日本機械学会論文集*, **A-57**, 2215 (1991).
- 6) 菅田 淳, 植松美彦, 谷本憲史, 上南恵資, 橋本亜希桐, 城野政弘, *日本機械学会論文集*, **A-66**, 1157 (2000).
- 7) 元屋敷靖子, 菅田 淳, 植松美彦, 城野政弘, *材料*, **53**, 627 (2004).