高速進展き裂が分岐する瞬間の平板試験片両面における同時撮影*

鈴木 新一^{*1}, 坂上 賢一^{*2}Simultaneous Photographing of Fast Propagating Cracks
at Bifurcation on Both Surfaces of Plate SpecimensShinichi SUZUKI^{*3} and Kenichi SAKAUE^{*3} Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

Pulsed holographic microscopy is applied to take photographs of rapidly bifurcating cracks in PMMA plate specimens. The cracks are of the opening mode and propagate at a speed more than 600 m/s. The photographs are simultaneously taken on the both side of the specimens about 10 μ s after bifurcation. The photographs show that, in many cases, the bifurcated crack's shape on one side of a specimen is apparently different from that on the other side of the specimen. Even in the case of cracks that have similar shapes on the both sides of specimens, the crack shapes are different near the bifurcation points on the both sides of the specimens. These facts indicate that the rapid crack bifurcation in PMMA is three dimensional phenomenon. Also shown is the example that two crack branches have different crack opening displacements. It means that the bifurcation of the crack was asymmetric with respect to the line along the mother crack.

Key Words: Fracture Mechanics, Brittle Fracture, Impact strength, Crack Propagation, Crack Opening Displacement, High-Polymer Materials, Experimental Stress Analysis, Crack Bifurcation

1. 序 論

脆性材料が破壊する際には数百 m/s から数千 m/s の高速で進展するき裂が発生する。このような高速進展き裂は、き裂速度が十分速い場合、進展の途中でき裂先端が突然二つに分岐することが知られている^{(1)~(9)}。動的破壊力学の最終目標のひとつは、高速進展き裂のき裂先端位置を時間の関数として予測できるようになることであり、そのためには、き裂がいつ、どこで分岐するかを予測できる必要がある。しかし、高速進展き裂の分岐の力学的機構は、いまだ完全には理解されていない。

高速進展き裂の分岐の理論的研究では、多くの場合、以下の2項目を仮定している(図1参照)^{(10)~(12)}。

- (1) き裂は板厚方向に貫通した二次元き裂である。
- (2) 分岐は母き裂に沿った直線に対して対称に発生する。すなわち、二つの分岐き裂は同一速度で進展し、同じき裂開口変位をもつ。

これは分岐の二次元モデルであるが、これらの仮定がどの程度正しいかは、実験技術上の困難から、これまであまり正確には調べられていない。

この問題に対する実験的研究のひとつに、Ravi-Chandar and Knauss⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の研究を挙げることができる。彼らは、分岐の発生にはき裂先端付近に発生する微小き裂が関わっていること、また、き裂の分岐過程が試験片板厚方向に一樣には起こっていないことを指摘している。しかし当時の光学測定法の限界から、これを明確に示す写真は得られていない。

最近、高速度ホログラフィ顕微鏡法^{(15)~(19)}を用い、

Fig. 1 Two dimensional model on crack bifurcation

* 原稿受付 2002 年 3 月 18 日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学機械システム工学系(☎ 441-8580・豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。^{*2} 准員, 豊橋技術科学大学大学院。

E-mail: shinichi@mech.tut.ac.jp

高速進展き裂の分岐の瞬間を顕微鏡撮影することが可能となった。高速度ホログラフィ顕微鏡法は、他の測定法に比べて非常に高い空間分解能をもっており、分岐の瞬間のき裂が鮮明に撮影されている。その中で、撮影された写真の何枚かは、き裂の分岐が二次元的に発生するのではなく、板厚方向に異なる構造をもった三次元現象として発生していることを示唆している^{(20)~(22)}。しかし、き裂が試験片の片側表面でしか撮影されていないため、き裂先端の三次元的な構造は不明のままである。

本研究では、2台のパルスホログラフィ光学系⁽²³⁾を用い、分岐直後のき裂を平板試験片の両面で同時撮影する。得られた2枚の写真と比較し、分岐き裂が試験片両面で、同じ形状をもっているか否かを明らかにする。また写真から、二つの分岐き裂が同じ開口変位をもっているか、すなわち、分岐が対称に発生しているか否かを明らかにする。

2. 実験方法

2.1 試験片 本研究で使用した試験片を図2に示す。試験片材質は透明PMMA、寸法は300 mm×

Fig. 2 Specimen and rapidly bifurcating crack

PL -- Pulsed ruby laser	CM -- Concave mirror
L1~4 -- Lens	IL1,2 -- Imaging lens
M1~9 -- Mirror	SP -- Specimen
BS1~5 -- Beam splitter	RI _{A,B} -- Real image
PD -- Photo detector	HP1,2 -- Holographic plate
PH -- Pin hole	

Fig. 3 Optical system for pulsed holographic microscopy

50 mm, 板厚は3 mmであり、切欠きはない。試験片には、一様な引張応力20.0 MPaを負荷する⁽¹⁸⁾。使用したPMMAの引張強さは、78.5 MPaである。その状態で、試験片上端中央の点Aにカッタナイフで傷をつけ、き裂を発生させる。き裂は下方に向かって高速で進展し、試験片中央の観測領域内で二つに分岐する。

2.2 パルスホログラフィ顕微鏡法 図3は、高速進展き裂の撮影に用いるパルスホログラフィ顕微鏡法の記録用光学系を示している。き裂は、試験片SP中を紙面に対して垂直に進展する。き裂が、観測領域の中を進展しているときに、パルスルビーレーザPLが発振し、き裂のホログラフィ記録を行う。

パルスルビーレーザPLから出た光は、ビームスプリッタBS1で二つに分けられる。BS1の反射光は、レンズL1、凹面鏡CMで平行光線になる。この平行光線は、鏡M1で反射した後、ビームスプリッタBS2で二つに分けられる。ビームスプリッタBS2の反射光は、ホログラフィ乾板HP1に入射角45°で入射する。これが、試験片表面SAをホログラフィ記録するための参照光である。ビームスプリッタBS2の透過光は、鏡M2、M3で反射した後、ホログラフィ乾板HP2に入射角-45°で入射する。これが、試験片表面SBをホログラフィ記録するための参照光である。

ビームスプリッタBS1の透過光は、レンズL2、L3、L4を経て平行光線になる。この平行光線は、ビームスプリッタBS3で二つに分けられる。ビームスプリッタBS3の透過光は、鏡M6、M7で反射し、ビ

Fig. 4 Imaging system to record cracks on either surface of the specimen

ームスプリッタ BS 4 を透過した後、試験片表面 SA に入射する(図 4, 照明光 1)。照明光 1 の表面 SA に対する入射角は φ である。試験片表面で反射した光は、ビームスプリッタ BS 4 で反射し、結像レンズ IL 1 を通過した後、ホログラフィ乾板 HP 1 にほぼ垂直に入射する。これが、表面 SA の物体光である。物体光は、ホログラフィ乾板 HP 1 の直前に試験片の実像 RI_A を形成する。

他方、ビームスプリッタ BS 3(図 3)の反射光は、鏡 M 8, M 9 で反射し、ビームスプリッタ BS 5 を透過して試験片表面 SB に入射する(図 4, 照明光 2)。照明光 2 の入射角は φ である。試験片表面で反射した光はビームスプリッタ BS 5 で反射し、結像レンズ IL 2 を通過してホログラフィ乾板 HP 2 に入射する。これが表面 SB の物体光である。物体光は、ホログラフィ乾板 HP 2 の直前に試験片の実像 RI_B を形成する。

このようにして、平板試験片両面における高速進展き裂のき裂形状が同時にホログラフィ記録される。ホログラフィ乾板を現像処理した後、実像 RI_A, RI_B を再生し、顕微鏡撮影する。

本研究では、試験片に透明材料を用いるため、試験片に入射した光は、表面 SA と SB の両方で反射する(図 5)。二つの反射光(ψ_{1A} と ψ_{1B} , または ψ_{2A} と ψ_{2B})は互いに干渉し、き裂の周辺に干渉じまを形成する。したがって、実際にはき裂と干渉じまの両方が撮影される。干渉じまは、き裂先端近傍における試験片の板厚と屈折率変化を示している。したがって、表面 SA 側から観察される干渉じまは、表面 SB 側から観察される干渉じまは、同じ形状であり、かつ左右を反転させた鏡像になっている。

試験片は透明材料であり、照明光 1, 2 の大部分は試験片を透過する(図 4)。照明光 2 の透過光は、ビームスプリッタ BS 4 で反射した後、結像レンズ IL 1 を通過する。照明光 1 の反射光と照明光 2 の透過光は異な

る方向に進行するため、結像レンズ IL 1 を通過した後、二つの光は異なる位置に集光する。集光した光のうち、照明光 2 の透過光を空間フィルタで遮断することにより、ホログラフィ乾板 HP 1 には、試験片表面の反射光のみが入射することになる。

照明光 1, 2 を試験片に対して垂直入射($\varphi=0^\circ$)させた場合、照明光 1 の反射光と照明光 2 の透過光は、全く同じ光路を進む。そのため、ホログラフィ乾板 HP 1 には、これらの光が同時に入射することになる。試験片表面からの反射光は、透過光に比べて強度が低いため、照明光 1, 2 を試験片表面に垂直に入射させた場合には、試験片表面のき裂形状を撮影することは困難である。本研究では、図 4 に示すように、照明光 1 と照明光 2 を試験片表面に対して斜めに入射させ、照明光 1 の反射光と照明光 2 の透過光を空間フィルタを用いて分離した。また、き裂形状を観察する際の視差を極力小さくするため、 $\varphi=3^\circ$ とした。これによって、き裂開口変位の測定に現われる誤差は 0.14% である。

照明光 1 の中で試験片を透過する光と、照明光 2 の中で試験片で反射する光に関しても全く同じである。

3. 結果と検討

本研究では、同一の実験条件下で 13 例の分岐き裂の撮影を行った。その結果、試験片両面でき裂形状が明らかに異なる場合が 6 例あった。また、試験片両面でき裂形状が完全には一致しないものの、似た形状をもつ場合が 7 例あった。

3.1 試験片両面で異なる形状をもつ分岐き裂 試験片両面で全く異なる形状をもつ分岐き裂の一例を、図 6~8 に示す。図 6 は、破壊後の試験片を示している。写真は、表面 SA 側から撮影された。き裂は試験

Fig. 5 Light waves reflected by or transmitted through the specimen

Fig. 6 Specimen after fracture, 01 BT 38

Fig. 7 Photographs of a rapidly bifurcating crack, 01 BT 38

片上端で発生した後、下方に向かって進展し、試験片のほぼ中央で分岐している。二つの分岐き裂は、その後も進展を続け、試験片の破断に至っている。図中には、パルスホログラフィ顕微鏡法によって撮影が行われた瞬間のき裂先端位置が示されている。

図7は、パルスホログラフィ顕微鏡法によって撮影された分岐き裂の写真である。図7(a)は表面SA、(b)は表面SBにおいて撮影された。き裂速度は約660 m/sであり、表面SB上の点Bにおける分岐から約7 μ s後に撮影された。き裂が二次元的な貫通き裂であれば、図7(a)、(b)のき裂は互いに鏡像関係になる。しかし、一見してわかるように、分岐き裂は表面SAとSBにおいて全く異なる形状をしている。

表面SA [図7(a)] において、き裂は点Aでき裂1とき裂2に分岐している。き裂1は、撮影の瞬間には進展を停止していた。その後、き裂2は点Cでき裂3とき裂4に再度分岐している。き裂3、4はその後も進展し、試験片の破断に至っている。

表面SB [図7(b)] において、き裂は点Bでき裂3とき裂5に分岐している。き裂5は、撮影の瞬間には進展していたが、その後進展を停止した。

図8は、図7(b)の写真を左右反転し、図7(a)の写真に重ねたものである。き裂周辺に現れた干渉じまは、試験片両面で撮影された2枚の写真において互いに一致している。これは、撮影が十分高い精度で行われたことを示している。

図7、8から、き裂1とき裂4は表面SAにのみ開口部をもつ表面き裂であることがわかる。また、き裂5は表面SBにのみ開口部をもつ表面き裂であることがわかる。このように、分岐き裂の多くは表面き裂とし

Fig. 8 Superimposed photograph, 01 BT 38

て発生している。これらの表面き裂のうち、き裂4は試験片の破断にまで至っており、表面き裂として発生した分岐き裂が、試験片の破断にまで成長し得ることを示している。

また、もう一方の破断に至る分岐き裂3は、試験片の両面において撮影されており、図8からわかるように、き裂先端部では試験片の両面でき裂位置がほぼ一致している。しかし、図7が示すように、表面SAにおけるき裂3の開口変位は、表面SBに比べると明らかに小さい。この二つの事実から、き裂3に関して次の二つの可能性が考えられる。

(1) き裂3は、表面SAとSB上の同じ位置を同じ方向に進展する独立した二つの表面き裂であり、貫通き裂になっていない。

(2) き裂3は板厚方向に貫通しているが、表面SAに近い試験片内部において、高分子の分子鎖がまだ二つのき裂面に架橋している。そのため、き裂3の表面SA上での開口変位が、SB上のそれよりも小さくなった。

き裂3が、上記の二つのどちらであったかは不明である。しかし、どちらの場合においても、き裂3は図1に示したような二次元貫通き裂ではなく、板厚方向に開口変位が変化している三次元き裂である。このように、図7に示したき裂の分岐過程は、図1に示した二次元的なモデルとは異なり極めて三次元的である。

き裂3とき裂4の長さは、それぞれ、3.6 mmと3.8 mmである。試験片板厚は3 mmであるから、図7の例は、き裂長さが少なくとも試験片板厚程度までは、分岐き裂が三次元き裂として進展することがある

Fig. 9 Specimen after fracture, 00 BT 09

ことを示している。鈴木らは、文献(22)の中で、高速進展き裂が分岐する瞬間を3コマ連続顕微鏡撮影し、き裂の分岐過程が三次元的であることを示した。また、き裂開口変位から求めたエネルギー解放率が、分岐の瞬間を挟んで連続である結果を得た。本研究の結果は、これら文献(22)の結果を支持している。

3・2 試験片両面でほぼ同じ形状をもつ分岐き裂

分岐直後のき裂が、試験片の両面で最も似た形状をもっていた例を次に示す。図9は、破壊後の試験片写真を示している。写真は、表面SA側から撮影された。き裂は試験片上端で発生した後、下方に向かって進展し、3本めの導電塗料が塗布されている位置で分岐している。分岐した二つのき裂のうち右側の分岐き裂は、その後試験片のほぼ中央で再度分岐している。パルスホログラフィ顕微鏡法による撮影は、2度めの分岐直後に行われた。

図10は、分岐き裂の写真を示している。図10(a)は表面SA、(b)は表面SBにおいて撮影された写真である。き裂速度は約670 m/sであり、分岐から約15 μ s後に撮影された。

表面SA [図10(a)] において、き裂は点Bでき裂1とき裂2に分岐している。き裂1はそのまま進展し、試験片の破断に至っている。き裂2は、点Dでき裂3とき裂4に再度分岐している。き裂3、4はその後も進展し、試験片の破断に至っている。

表面SB [図10(b)] において、き裂は点Aでき裂1とき裂2に分岐している。き裂2は、点Aで分岐した後、点Cでき裂3とき裂4に分岐している。

図11は、図10(b)の写真を左右反転し、図10(a)の写真に重ねたものである。き裂1、2は試験片両面

(a) Surface SA

(b) Surface SB

Fig. 10 Photographs of a rapidly bifurcating crack, 00 BT 09

でほぼ同じき裂形状をもっていることがわかる。しかしながら、き裂の分岐点 A, B が試験片の両面で異なっていることがわかる。また、き裂 3 とき裂 4 の分岐点も表面 SA では点 D であるのに対し、表面 SB では点 C であり、試験片の両面で分岐点が一致していない。このように、分岐き裂の形状が試験片両面でおおよそ一致する場合においても、分岐位置や分岐点付近のき裂形状には違いが現れている。

また、図 10 の写真から、表面 SA, SB のいずれの表面においてもき裂 1 の開口変位はき裂 2 に比べて小さいことがわかる。このように、試験片両面における分岐き裂の形状が、ほぼ同じである場合においても、二つの分岐き裂の開口変位には違いがあり、分岐は対称的に発生していない。

き裂 1, 2 が試験片の両面でほぼ同じ形状であることから、き裂 1 とき裂 2 は、撮影時には貫通き裂であった可能性がある。しかし、き裂 1 の開口変位はき裂 2 や母き裂の開口変位よりもかなり小さい。したがって、き裂 1 は表面 SA や SB 上の同じ位置に同時に発生した二つの表面き裂である可能性も残されている。これは、図 7 のき裂 3 の場合と同じである。

4. 検 討

上記のように、本研究で撮影したき裂の分岐過程は、三次元的である。しかし、分岐現象が真に三次元現象であるか否かを明確にするには、以下の 2 項目を検討する必要がある。ひとつはき裂発生方法であり、もうひとつは試験片の曲げ変形の影響である。

4・1 破壊方法の影響 本研究では、図 2, 図 12 に示すように、試験片上端面にカッタナイフで傷をつけることにより、き裂を発生させた。この方法では、き裂が板厚方向のどの位置で発生するかを制御してい

ない。したがって、図 12(a) のように板厚中央から破壊が開始する場合もあれば、図 12(b) のように、試験片表面に近い位置から発生する場合もある。図 12(a) の場合、き裂は、前縁が左右対称なき裂として進展すると考えられる。それに対して図 12(b) の場合、き裂が板厚方向に貫通した後も、き裂前縁形状に非対称性が残り、それが分岐の直前まで存在していた可能性が考えられる。

しかし、破壊後の試験片の破面観察から、上記のことに起因するき裂前縁の非対称性は、き裂が試験片板厚 (3 mm) の 2~3 倍程度の距離を進展する間にかなり小さくなっていることが確認された。本研究では、き裂は、試験片板厚の 8 倍程度の距離を進展した後に分岐しており、したがって分岐時には、き裂発生位置のばらつきによるき裂前縁の非対称性はなかったものといえる。

また鈴木らは、文献(24)~(26)の中で、板厚 20 mm の PMMA 試験片中を 200 m/s~260 m/s の速度で約 20 mm 進展した時のき裂前縁形状を調べた。高速進展き裂の発生には、パルスレーザ照射により欠陥を発生させる方法を用いている。その中では、き裂発生位置とき裂前縁の非対称性との間には、相関が認められなかったことが報告されている [文献(24)の討論]。彼らの実験結果は、上記の破面観察の結果を支持している。

これらのことから、「分岐時には、き裂発生位置のばらつきによるき裂前縁の非対称性はなかった」と考えられる。

4・2 試験片の曲げ変形の影響 本研究では、図 2 に示すような 300 mm×50 mm の細長い試験片に一様な引張応力を負荷し破壊した。したがって、基本的には試験片に曲げ変形は発生しない [文献(24)の討論]。また、図 7 の 2 枚の写真は、点 B より上の母き裂の開口変位が試験片の両面でほとんど同じであるこ

Fig. 11 Superimposed photograph, 00 BT 09

Fig. 12 Cross section of specimen and propagation of crack front edge

とを示している。このことから、試験片には曲げ変形が発生していないか、発生していたとしても無視できるほど十分小さいといえる。したがって、分岐の瞬間に試験片の両面でき裂形状が異なるのは、試験片に曲げ変形が発生したためではないといえる。

4.3 推察される力学的機構 分岐の直前直後でき裂先端が三次元構造をもつ力学的機構は、以下のようなものであると推察される。分岐に至るき裂は進展速度が速く、き裂面は粗面になっている。これは、高速進展き裂が、き裂前縁付近に存在していた材料中の微小な欠陥や、それを核として成長した微小き裂と、絶えず相互作用をするためと考えられている。このことは、高速進展き裂の前縁が、その進展の間、常に無秩序な変動を受けていることを意味する。分岐の直前には応力拡大係数は最大値を取り、したがって、き裂と微小き裂との相互作用も最大になると考えられる。その結果、き裂前縁は大きな変動を受け、三次元性が発生すると推察される。

5. 結 論

本研究では、PMMA 平板中の高速分岐き裂を 13 例撮影した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 13 例中 6 例において、試験片両面での分岐き裂の形状は、明らかに異なっていた。したがって、これらのき裂に関しては、分岐は三次元現象であるといえる。

(2) 上記(1)のようなき裂において、分岐き裂が表面き裂として発生し、試験片の破断に至るまで成長する場合があることが確認された。

(3) 13 例中、他の 7 例のき裂においては、試験片両面でき裂形状が、ある程度似ていた。しかし、これらのき裂においても、二つの分岐き裂の開口変位は異なっており、分岐は母き裂に沿った直線に対して非対称である。

本研究は、文部科学省科学研究費基盤研究(C)(2)、課題番号 12650082 の補助を受けた。ここに感謝する。

文 献

- (1) Ramulu, M. and Kobayashi, A. S., *Int. J. Fract.*, **27** (1985), 187-201.
- (2) Kobayashi, A. S., Wade, B. G., Bradley, W. B. and Chiu,

- S. T., *Eng. Fract. Mech.*, **6** (1974), 81-92.
- (3) Irwin, G. R., Dally, J. W., Kobayashi, T., Fourney, W. L., Etheridge, M. J. and Rossmann, H. P., *Exp. Mech.*, **19** (1979), 121-128.
- (4) 青木繁・下川正樹・平野昌宏・坂田勝, 機論, **41**-347, 第 1 部, (1975), 1942-1948.
- (5) 青木繁・下川正樹・平野昌宏・坂田勝, 機論, **41**-352, 第 1 部, (1975), 3341-3347.
- (6) 青木繁・下川正樹・平野昌宏・坂田勝, 機論, **41**-352, 第 1 部, (1975), 3341-3355.
- (7) 岸本喜久雄・青木繁・坂田勝, 機論, **47**-422, A(1981), 1019-1024.
- (8) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-254.
- (9) 西岡俊久・岸本岳史・小野泰丈・坂倉慧悟, 機論, **65**-633, A(1999), 1116-1122.
- (10) Yoffe, E. H., *Phil. Mag.*, **42** (1951), 739-750.
- (11) Baker, B. R., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **29** (1962), 449-458.
- (12) Theocaris, P. S. and Georgiadis, H. G., *Int. J. Fract.*, **29** (1985), 181-190.
- (13) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., *Int. J. Fract.*, **26** (1984), 65-80.
- (14) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., *Int. J. Fract.*, **26** (1984), 141-154.
- (15) Suzuki, S., Nozaki, Y. and Kimura, H., *Applied Optics*, **36**-28 (1997), 7224-7233.
- (16) Suzuki, S., Inayama, A., Arai, N. and Mizuta, T. (Lagarde, A.ed.), *IUTAM Symp. on Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics*, Solid Mechanics and its Applications, **82** (2000), 587-854, Kluwer Academics Press.
- (17) 鈴木新一・稲山篤・新井直敬・水田貴久, 機論, **66**-645, A (2000), 931-938.
- (18) Suzuki, S., Sakaue, K., Morita, Y. and Mori, T. (Takayama, K.ed.), *Proc. 24th Int. Cong. High-Speed Photography and Photonics*, SPIE Vol. 4183, (2000), 480-487.
- (19) 鈴木新一・森田康之・坂上賢一, 機論, **67**-655, A(2001), 432-439.
- (20) Suzuki, S., Inayama, A. and Arai, N. (Allison, I. M. ed.), *Proc. 11th Int. Conf. Exp. Mech., Advances in Design, Testing and Analysis*, (1998), 583-588, Balkema, Rottterdam.
- (21) 鈴木新一・稲山篤・新井直敬・水田貴久, 機論, **65**-633, A (1999), 1116-1122.
- (22) 鈴木新一・坂上賢一・水田貴久・佐々木康利, 機論, **67**-664, A(2001), 2010-2017.
- (23) Suzuki, S., Homma, H. and Kusaka, R., *J. Mech. Phys. Solids*, **36**-6 (1988), 631-653.
- (24) 鈴木新一・吉山育伸, 機論, **56**-525, A(1990), 1107-1115.
- (25) 鈴木新一, 機論, **56**-532, A(1990), 2391-2398.
- (26) Suzuki, S. (Hyde, T. H. and Ollerton, E.ed.), *Applied Stress Analysis*, (1990), 26-35, Elsevier Applied Science.