高速度ホログラフィー顕微鏡法とモアレ干渉法による 分岐き裂の開口変位測定*

鈴木 新一^{*1}, 森田 康之^{*2}, 坂上 賢一^{*3}

Measurement of Opening Displacement of Bifurcated Cracks by High-Speed Holographic Microscopy and Moiré Interferometry

Shinichi SUZUKI^{*4}, Yasuyuki MORITA and Kenichi SAKAUE

^{*4} Toyohashi University of Technology, Dep. Mechanical Engineering
Hibarigaoka 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

High-speed holographic microscopy is applied to take successive microscopic photographs of a fast propagating crack at bifurcation. The crack speed is about 650 m/s. From the photographs, crack opening displacements (CODs) of the mother crack and two bifurcated branches are measured along the crack. A specimen with a notch is also made, where the notch has the bifurcated notch tip same as the bifurcated fast propagating crack. Opening displacement of the notch is measured by Moiré interferometry under static loading condition. The measurement results show that the opening displacements of both the mother crack of the bifurcated fast propagating crack and the mother notch of the bifurcated notch are proportional to square root of the distance r from the crack or the notch tip. The opening displacements of the two bifurcated branches of the notch are also proportional to $\sqrt{r}$. But the CODs of the bifurcated branches of the fast propagating crack are not always proportional to $\sqrt{r}$.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Fracture Mechanics, Brittle Fracture, Crack Opening Displacement, Optical Measurement, High-Polymer Materials, 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、進展速度が十分に速い場合、進展の途中で二つに分岐することが知られている(図 1)。分岐は高速進展き裂の特徴的な挙動のひとつであり、これまで多くの研究者によって、理論、実験の両面から研究されてきた^{(1)~(16)}。しかし分岐の力学的機構はいまだ完全には解明されていない。

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々刻々予測できるようになることである。この目標が達成されれば、構造物の破壊経路を、設計段階で予測できるようになる。そのためには、き裂が何時何処でどの方向に分岐するかを予測できるよう、分岐の力学的機構を解明する必要がある。

最近、高速度ホログラフィー顕微鏡法が高速進展き裂の分岐の問題に適用されるようになった^{(14)~(16)}。高

速度ホログラフィー顕微鏡法は、動的破壊の実験的研究に用いられる他の光学的手法に比べてはるかに高い解像力(180 本/mm)を持っている^{(14)~(21)}。そのため、古典的な光干渉法との組合せにより、分岐の直前直後におけるき裂先端応力場が精密に測定されている⁽¹⁵⁾。

また、高速度ホログラフィー顕微鏡法の高い解像力を利用し、分岐の直前直後におけるき裂開口変位(COD)を測定することができる⁽¹⁶⁾。測定の結果、分岐前のき裂では、COD はき裂先端からの距離 r の $1/2$ 乗に比例することが示されている。また分岐後のき裂では、母き裂(図 1)の COD が $\sqrt{r}$ に比例することが示されている。

分岐していない高速進展き裂の COD が $\sqrt{r}$ に比例することは、理論的に導かれており⁽²²⁾、かつ実験に

Fig. 1 Bifurcation of a fast propagating crack

* 原稿受付 2000 年 6 月 23 日.

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1).

^{*2} 准員, 九州大学大学院.

^{*3} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院.

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

よっても確かめられている⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。しかし、先端が二つに分岐した高速進展き裂の COD に関しては、文献(16)が唯一の測定であり、まだ不明な点が多い。

本研究は、高速度ホログラフィー顕微鏡法を用いて、PMMA [Poly(methyl Methacrylate)；アクリル] 平板中を高速進展するき裂が分岐する瞬間を顕微鏡撮影する。得られた写真からき裂開口変位を測定する。また、撮影されたき裂と同じ形状を持つ静止分岐切欠きを作製し、静的荷重下における切欠きの開口変位をモアレ干渉法⁽²³⁾⁽²⁴⁾で測定する。得られた結果を比較し、両者の間の共通点と相違点を明らかにする。

2. 実験方法

2・1 座標系 分岐後のき裂の COD 測定に用いる座標系(図1)の原点位置を、以下のように決定する⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

- (1) 座標系原点は、母き裂の延長線上にある。
- (2) 座標系原点の x 方向位置は、

$$\sum_{i=1}^N x_i = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となるよう決定される。ここで x_i は分岐き裂先端の x 方向位置である。このようにして決定された座標原点は、母き裂の仮想先端とみなされる。

Fig. 2 Specimen for fast propagating cracks

分岐した先端形状を持つ切欠きの開口変位測定においても、座標系原点の位置は上記の方法で決定される。

2・2 高速進展き裂の撮影

2・2・1 試験片 高速進展き裂の分岐の実験に用いる試験片を図2に示す。試験片材質はPMMA、寸法は300×50 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を負荷する。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付け、高速進展き裂を発生させる。き裂は下方に向かって高速進展し、試験片中央の観測領域内で二つに分岐する。

2・2・2 ホログラフィー記録⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾ 高速度ホログラフィー顕微鏡法の記録用光学系を図3(a)に示す。き裂は試験片SP中を紙面に垂直な方向に進展する。き裂が観測領域の中を進展しているときに、3台のパルスルビーレーザ、PL1、PL2、PL3が順に発振する。レーザ光の半値幅は30 nsである。

1コマ目の記録：ルビーレーザPL1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で反射した光はレンズL1で広げられ、凹面鏡CMで反射されて平行光線になる。その平行光線は鏡M1、M2で反射され、ホログラフィー乾板HPに入射角 $\theta_1(=30^\circ)$ で入射する。これが1コマ目の参照光である。

ビームスプリッタBS1を透過した光は、レンズL4で広げられ、鏡M7で反射した後、ビームスプリッタBS4、BS5を透過する。その後レンズL7、L8を通過して平行光線になり、鏡M9、M10で反射した後、ビームスプリッタBS6を透過して試験片表面に

- PL1~3 -- Pulsed ruby laser
- L1~8 -- Lens
- M1~10 -- Mirror
- BS1~6 -- Beam splitter
- CM -- Concave mirror
- IL -- Imaging lens
- PD -- Photo detector
- PH -- Pin hole
- SP -- Specimen
- RI -- Real image
- HP -- Holographic plate
- θ_j -- Angle of incidence

(a) Optical system for recording

(b) Reflection by the specimen surface

Fig. 3 High-speed holographic microscopy

垂直に入射する。試験片表面に入射した光は、図3(b)に示すように、二つの試験片表面 A, B のどちらかで反射される。二つの反射光は互いに干渉し、き裂の周辺に干渉じまを作る。試験片表面で反射した光はビームスプリッタ BS 6 で反射し、結像レンズ IL を通過してホログラフィー乾板 HP に入射する。これが物体光である。このようにして1コマ目のホログラムが乾板上に記録される。

この光学系はイメージプレーンホログラフィーの光学系になっており、物体光は、乾板の直前に、き裂と試験片の実像 RI を作る。これにより、再生像の高い解像力を実現している。

2コマ目の記録：1コマ目の記録から t_1 秒後、パルスレーザ PL 2 が発振する。PL 2 から出た光はビームスプリッタ BS 2 で二つに分けられる。BS 2 で反射した光はレンズ L 2 で広げられ、凹面鏡 CM で反射して平行光線になる。その後、鏡 M 3, M 4 で反射し、入射角 $\theta_2 (=45^\circ)$ でホログラフィー乾板 HP に入射する。これが2コマ目の参照光である。

ビームスプリッタ BS 2 を透過した光はレンズ L 5 で広げられ、ビームスプリッタ BS 4 で反射する。その後1コマ目の物体光と同じ光路を通り、ホログラフィー乾板 HP に入射する。これが2コマ目の物体光である。このようにして2コマ目のホログラムが、ホログラフィー乾板の上に記録される。

3コマ目の記録：2コマ目の記録から t_2 秒後にパルスレーザ PL 3 が発振する。PL 3 から出た光はビームスプリッタ BS 3 で二つに分けられ、1, 2コマ目の記録と同様に、3コマ目のホログラムをホログラフィー乾板 HP の上に記録する。参照光入射角 θ_3 は 60° である。

このように1枚のホログラフィー乾板の上に、参照光入射角を変えながら、三つのホログラムを多重記録

する(角度多重記録)⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

2・2・3 再生と顕微鏡撮影 三重記録されたホログラムからそれぞれのき裂像を分離して再生する方法を図4に示す。再生には、記録時と同一の光学系が用いられる。

現像処理の後、ホログラフィー乾板を He-Ne レーザの再生光で照明する。再生光は、基本的には参照光の共役光であり、参照光と同じ光路を参照光とは逆方向に進む。ただし、He-Ne レーザの波長 λ_H (633 nm) はルビーレーザの波長 λ_R (694 nm) より約10%短いため、再生光入射角 θ'_j は参照光入射角 θ_j よりもわずかに小さく、次式で与えられる。

$$\sin \theta'_j = (\lambda_H / \lambda_R) \sin \theta_j \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで添字 j はコマ番号である。

1コマ目の再生：ホログラフィー乾板を1コマ目の再生光 ($\theta'_1 = 27.1^\circ$) で照明する[図4(a)]。すると1コマ目のホログラムが1コマ目の物体光の共役光を再生する。物体光の共役光は、物体光と同じ光路を物体光とは逆方向に進行する。したがって物体光の共役光は、結像レンズを通過し、ビームスプリッタで反射した後、試験片のあった位置に試験片とき裂の実像を再生する。この実像を顕微鏡撮影すれば、1コマ目のき裂像を得ることができる。

ホログラフィー乾板を1コマ目の再生光で照明すると、2, 3コマ目のホログラムも物体光の共役光に相当する光を再生する。これらの光は結像レンズの手前で、空間フィルタによって遮断される。したがって試験片のあった位置には1コマ目の実像だけが分離して再生される。

2, 3コマ目の再生：1コマ目の場合と同様に、ホログラフィー乾板を2コマ目(または3コマ目)の再生光で照明する。すると試験片のあった位置に、2コマ目(または3コマ目)のき裂像が分離、再生される。

Fig. 4 Reconstruction of crack images from the three superimposed holograms

2・3 静止切欠きの開口変位測定

2・3・1 試験片 分岐した先端形状を持つ切欠きの開口変位測定に用いた試験片を図5に示す。試験片寸法は300×300 mm, 板厚は3 mmである。試験片には長さ約150 mmの切欠きが設けてあり, その先端は二つに分岐している。分岐部分の長さは約3.5 mmである。切欠き幅は0.3 mmであり, 加工にはCO₂レーザを用いた。切欠き先端部には, モアレ干渉法による変位測定のために, 回折格子が貼られている。格子はx軸に平行であり, これにより, y方向変位が測定される。試験片両端中央部に静的引張力が負荷される。

2・3・2 モアレ干渉法⁽²³⁾⁽²⁴⁾ モアレ干渉法による

Fig. 5 Bifurcated notch in a PMMA specimen

(a) Before deformation

(b) After deformation

Fig. 6 Moiré interferometry

変位測定をFig. 6に示す。Fig. 6(a)は試験片が変形する前の状態を示している。試験片表面には回折格子が貼付けてあり, 格子の方向は紙面に垂直である。この回折格子に, He-Neレーザの平行光線A, Bを入射させる。平行光線A, Bの入射角 α_0 は, 次式によって与えられる。

$$\sin \alpha_0 = \lambda_H f_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで λ_H はHe-Neレーザの波長, f_0 は回折格子の周波数である。入射した光は回折格子表面で反射・回折する。入射角 α_0 が式(3)を満足するとき, 入射光線A, Bの一次の反射回折光 A_1, B_1 は, 試験片表面に垂直である。このとき回折光 A_1, B_1 は互いに平行なので, A_1, B_1 を用いて試験片表面を観察すれば, 試験片は一樣な明るさであり, 干渉じまは観察されない。

試験片に引張荷重を負荷し, 試験片が変形したときの様子をFig. 6(b)に示す。変形後, 回折格子の空間周波数は, $f_0 + \Delta f$ に変化する。そのため, 一次回折光 A_1, B_1 の回折角が変化し, A_1 と B_1 は互いに平行ではなくなる。その結果, A_1, B_1 を用いて試験片表面を観察したとき, 試験片上には干渉じまが現れる。この干渉じまはy方向の変位 v の等変位線を表しており, 干渉じまに沿って v は一定である。干渉じまのしま次数を N としたとき, 変位 v は

$$v = N / (2f_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。したがってしま次数 N を測定することにより, ある点の変位 v を知ることができる。本研究では, 空間周波数 $f_0 = 488$ 本/mmの回折格子を用いた。

切欠きの開口変位 δ の測定法をFig. 7に示す。母切欠きの開口変位 δ_M の測定では, 二つの切欠き面上の対応する2点P, Qのy方向変位 v_P, v_Q の差を求める。

$$\delta_M = v_P - v_Q = \Delta N / (2f_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta N = N_P - N_Q$$

ここで, N_P, N_Q は点P, Qでのしま次数である。式

Fig. 7 COD measurement from Moiré interference fringes

Fig. 8 Photographs of fast propagating crack, 99 BT 24

Fig. 9 COD versus r of crack

(5)から、2点P, Q間のしま次数の差 ΔN を測定することにより、母切欠きの開口変位 δ_M を求めることができる。同様にして、分岐切欠き1, 2の開口変位 δ_1, δ_2 をも測定する。

3. 実験結果

3.1 高速進展き裂の測定結果 高速度ホログラフィー顕微鏡法で撮影された高速進展き裂の分岐の瞬間の写真を図8に示す。図8(a), (b), (c)は1コマ目, 2コマ目, 3コマ目である。1コマ目は分岐の4.5 μ s前, 2コマ目, 3コマ目は分岐の1.0 μ s後, 5.5 μ s後である。写真は鮮明であり、き裂に沿ってCODを測定することができる。き裂の周辺には多数の干渉じまが現れている。この干渉じまから、き裂先端応力場を解析することができる。

き裂は点Bで分岐しており、分岐角(図1)は13.5°である。また図8(c)のき裂では、分岐き裂1, 2の長さは、約3.5 mmである。分岐の前と後とで、それぞれ、き裂速度が一定であると仮定すると、写真から分岐前のき裂速度と分岐後のき裂速度が得られる。分岐前のき裂速度は682 m/s, 分岐後は612 m/sである。

分岐前のき裂では、き裂に沿ってCODを測定する。分岐後のき裂では、母き裂に沿って母き裂のCODを測定する。また二つの分岐き裂の開口変位を、図8(c)に示すように、 y 軸と平行な方向に測定する。これはモアレ干渉法の測定結果と比較するためである。これを COD_y と記す。

COD測定の結果を図9に示す。横軸は2.1節で定義された母き裂仮想先端からの距離 r ($\phi=180^\circ$, 図1), 縦軸は開口変位である。図9(a)は、1コマ目のき裂の測定結果である。分岐前のき裂のCODが $\sqrt{r}$ に比例することがわかる。図9(b)は、2コマ目のき

Fig. 10 Moiré interference fringes around the branch notch

裂の測定結果である。分岐後においても、母き裂のCODは $\sqrt{r}$ に比例している。しかし、分岐き裂の y 方向開口変位は $\sqrt{r}$ に比例していない。

図9(c)は3コマ目の測定結果である。母き裂のCODはやはり $\sqrt{r}$ に比例している。分岐き裂2の開口変位 COD_{y2} は $\sqrt{r}$ に近い振舞いをしている。しかし分岐き裂1の開口変位 COD_{y1} は $\sqrt{r}$ に比例していない。二つの分岐き裂の開口変位の和($COD_{y1} + COD_{y2}$)はやはり $\sqrt{r}$ に比例しない。和($COD_{y1} + COD_{y2}$)は、 r が小さくなるにつれて、母き裂のCODから外挿される $\sqrt{r}$ の直線(実線)から、上側にずれている。この結果は、他の高速進展き裂においても確認されている。

文献(16)は、分岐き裂の開口変位を分岐き裂に垂直

Fig. 11 Opening displacement of the bifurcated notch

な方向で測定している。本研究は、モアレ干渉法による静止分岐切欠きの測定結果と比較するために、開口変位を y 軸に平行な方向で測定する。しかし、本研究で取扱うき裂の分岐角は 13.5° と小さく、 y 方向に測定した開口変位と分岐き裂に直角に測定した開口変位の差は 2.8% である。

3・2 先端が分岐した切欠きの測定結果 モアレ干渉法により得られた干渉じまと静止分岐切欠きの写真を図 10 に示す。切欠きの分岐角は 13.5° 、分岐切欠きの長さは約 3.5 mm であり、図 8(c) に示した分岐直後の高速進展き裂先端とほぼ同じ形状に作られている。この写真から母切欠きの開口変位 δ_M と分岐切欠き 1, 2 の開口変位 δ_1, δ_2 を測定する。

開口変位測定の結果を図 11 に示す。横軸は母切欠き仮想先端からの距離 r ($2 \cdot 1$ 節)、縦軸は開口変位である。図 11 からわかるように、母切欠きの開口変位 δ_M は $\sqrt{r}$ に比例する。また、分岐切欠きの開口変位 δ_1, δ_2 も、 $r \geq 1.5\text{ mm}$ の領域では、測定誤差の範囲内で $\sqrt{r}$ に比例している。さらに、 δ_1 と δ_2 の和 ($\delta_1 + \delta_2$) は、 δ_M と同じ $\sqrt{r}$ の直線上に存在していることがわかる。このように、二次元貫通切欠きでは、母切欠きの開口変位も分岐切欠きの開口変位も $\sqrt{r}$ に比例する。

距離 r が 1 mm より小さい領域では、 δ_1, δ_2 は $\sqrt{r}$ に比例しない。これは、切欠き先端がき裂先端のように鋭くないためと考えられる。

開口変位 δ_2 は δ_1 より大きな値を示している。これは、図 10 からわかるように、分岐切欠き 2 が分岐切欠き 1 よりもわずかに長かったためと考えられる。

4. 考 察

4・1 切欠きをき裂とみなせる領域 切欠きの実

験において、切欠き先端がき裂先端ほど鋭くないことの影響は、 $r \leq 1\text{ mm}$ の範囲に限られている。このことから、切欠きを用いて得られた測定結果は、 $r \geq 1.5\text{ mm}$ の領域では、同一形状の静止き裂の測定結果とみなすことができる。

4・2 母き裂・母切欠きの開口変位 き裂先端が分岐していない場合、 COD は $\sqrt{r}$ に比例する。しかし、き裂先端が分岐している場合、 COD は $\sqrt{r}$ からずれると予想される。それにもかかわらず、本研究の測定結果は、高速進展き裂と静止切欠きの両方において、母き裂・母切欠きの開口変位が、測定精度の範囲内で、 $\sqrt{r}$ に比例することを示している。これは、本研究で対象としたき裂の分岐角が 13.5° と小さく、分岐の影響が現れ難かったことによると考えられる。分岐角が大きい場合には、開口変位は $\sqrt{r}$ からずれることが予想される。

4・3 分岐き裂・分岐切欠きの開口変位 切欠きの実験では、 $r \geq 1.5\text{ mm}$ の領域で、分岐切欠きの開口変位の和 ($\delta_1 + \delta_2$) が $\sqrt{r}$ に比例し、かつ、母切欠きの開口変位 δ_M と同じ $\sqrt{r}$ の直線上に存在する。これも分岐角が小さく、分岐の影響が強く現れなかったためと考えられる。

それに対して高速進展き裂では、分岐き裂の開口変位は必ずしも $\sqrt{r}$ に比例しない。また、開口変位の和 ($COD_{y1} + COD_{y2}$) は、 r が減少するにつれて、母き裂の開口変位から外挿した直線より上側にずれる。この結果は、切欠きから得られた結果と明らかに異なる。これは、高速進展き裂の分岐き裂が、分岐切欠きとは異なる幾何学的形状を持っていたためと考えられる。

本研究で用いた切欠きは、二次元の貫通切欠きである。それに対して高速進展き裂が分岐した直後の分岐き裂は、二次元の貫通き裂ではなく、三次元構造を持つことを示す実験結果が得られている⁽¹⁴⁾。それによると、分岐直後のき裂では、試験片表面と試験片内部とではき裂先端の形状が異なっていると予想される⁽¹⁶⁾。また、高速進展き裂の場合、単にき裂先端が進展して行くのではなく、き裂先端近傍に発生した微小き裂が主き裂と結合するとも言われている⁽²⁾⁽¹⁶⁾⁽²⁰⁾。本研究で示した高速進展き裂の分岐き裂の開口変位と分岐切欠きの開口変位の挙動の違いは、上記のようなき裂先端の幾何学的構造の違いによるものと考えられる。

5. 結 論

高速度ホログラフィー顕微鏡法を用い、高速進展き裂が分岐した直後のき裂開口変位を測定した。また、分岐した高速進展き裂と同じ形状を持つ静止分岐切欠きの開口変位を、モアレ干渉法を用いて測定した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 先端が二つに分岐したき裂の母き裂の開口変位は、母き裂先端からの距離 r の $1/2$ 乗に比例する。この結果は、高速進展き裂でも静止き裂(切欠き)でも同じである。

(2) 分岐切欠きの開口変位は $\sqrt{r}$ に比例する。また、それらの和は、母切欠きの開口変位と同じ $\sqrt{r}$ の曲線上に分布する。

(3) 上記の結果は、本研究で取扱ったき裂の分岐角が 13.5° と小さかったことによると考えられる。

(4) 高速進展き裂の分岐き裂の開口変位は必ずしも $\sqrt{r}$ に比例しない。また、それらの和は、母き裂から外挿された $\sqrt{r}$ の曲線から外れる。これは高速進展き裂の分岐が三次元的に起こっているためと考えられる。

本研究の実施にあたり、本学学生、佐々木泰利の協力を得た。ここに感謝する。

文 献

- (1) Ramulu, M. and Kobayashi, A. S., *Int. J. Fract.*, **27** (1985), 187-201.
- (2) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., *Int. J. Fract.*, **26** (1984), 141-154.
- (3) Yoffe, E. H., *Phil. Mag.*, **42** (1951), 739-751.
- (4) Baker, B. R., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **29** (1962), 449-458.
- (5) Kobayashi, A. S., Wade, B. G., Bradley, W. B. and Chiu, S. T., *Eng. Fract. Mech.*, **6** (1974), 81-92.
- (6) Irwin, G. R., Dally, J. W., Kobayashi, T., Fourney, W. L., Etheridge, M. J. and Rossmann, H. P., *Exp. Mech.*, **19** (1979), 121-128.
- (7) Theocaris, P. S. and Georgiadis, H. G., *Int. J. Fract.*, **29** (1985), 181-190.
- (8) 青木繁・下川正樹・平野昌宏・坂田勝, 機論, **41**-347, 第1部, (1975), 1942-1948.
- (9) 青木繁・下川正樹・平野昌宏・坂田勝, 機論, **41**-352, 第1部, (1975), 3341-3347.
- (10) 文献(9)の3348-3355ページ.
- (11) 岸本喜久雄・青木繁・坂田勝, 機論, **47**-422, A (1981), 1019-1024.
- (12) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-254.
- (13) 西岡俊久・岸本岳史・小野泰丈・坂倉慧悟, 機論, **65**-633, A (1999), 1123-1131.
- (14) 鈴木新一・稲山篤・新井直敬・水田貴久, 機論, **65**-633, A (1999), 1116-1122.
- (15) 鈴木新一・稲山篤・新井直敬・水田貴久, 機論, **66**-645, A (2000), 931-938.
- (16) 鈴木新一・坂上賢一・水田貴久・佐々木康利, 論文 No. 00-0515, 投稿中.
- (17) Suzuki, S., Nozaki, Y. and Kimura H., *Appl. Opt.*, **36**-28 (1997), 7224-7233.
- (18) Suzuki, S., Nakagami, R., Kanahashi, Y. and Agatsuma, K., *Proc. Int. Conf. Advanced Tech. in Exp. Mech. The Japan Soc. of Mech. Eng.*, (1997), 267-272, Wakayama.
- (19) 鈴木新一・金橋祐輔・仲神竜一, 機論, **62**-603, A (1996), 2534-2540.
- (20) Suzuki, S., Homma, H. and Kusaka, R., *J. Mech. Phys. Solid*, **36**-6 (1988), 631-653.
- (21) Suzuki, S., *Proc. 9th Conf. Exp. Mech., Copenhagen Denmark*, **5** (1990), 1833-1842.
- (22) Freund, L. B., *Dynamic Fracture Mechanics*, (1990), 160-169, Cambridge U. Press, Cambridge.
- (23) Post, D. (Kobayashi, A. S. 編), *Handbook on Experimental Mechanics, Soc. of Experimental Mechanics*, (1987), 314-387.
- (24) 新川和夫, Drinnon, R. H. Jr., Wang, F. X., Kobayashi, A. S., 機論, **58**-545, A (1992), 59-63.