

高速進展き裂前縁のホログラフィ撮影*

鈴木新一^{*1}, 吉山育伸^{*2}

Pulsed Holography for Photographing Fast Propagating Crack Fronts

Shinichi SUZUKI and Ikunobu YOSHIYAMA

Pulsed holography is applied to take an instantaneous photograph of a crack front propagating through a PMMA plate specimen at a speed of several hundred m/s. The cracks are in the opening mode and not interacting with any stress waves. A pulsed holographic optical system records and reconstructs a crack front observed through a side boundary of a specimen, and the reconstructed image is photographed. A method is developed to decrease an aberration introduced by inhomogeneity of refractive index in PMMA, where the inhomogeneity results from manufacturing process of the PMMA. Also discussed are effects of changes of specimen thickness and refractive index in the strong stress field near a crack tip. From an obtained photograph one can know the shape of a crack front, which is not always symmetric. One can moreover measure the two angles between the crack front and the two specimen surfaces. The angles are important quantities to understand the three-dimensional structure of the stress field around the crack tip. The measured angles are similar to the numerical results given by Bažant and Estenssoro.

Key Words: Fracture, Measurement, Optical Engineering, Holography, Crack Front, Dynamic Fracture, Three-dimensional Stress Field

1. ま え が き

板厚 t の脆性材料中を高速で進展するき裂(開口形)先端の周辺で, き裂先端からある程度離れた所では, $1/\sqrt{r}$ (r はき裂先端からの距離)の特異性を持つ平面応力場が存在する(図1)^{(1)~(4)}. また, き裂先端の極近傍で, 材料の内部においては, 平面ひずみ状態が実現されていると予想される。したがって, 平面応力場から平面ひずみ場に移行する領域では, 応力場の三次元性が現れてくる。

これまで行われてきた三次元応力場に関する研究は, 主に, 静止き裂に関するものであり, それらは, 二つに大別することができる。ひとつは, 試験片表面とその近傍における応力場の特異性に関するものであり^{(5)~(8)}, もうひとつは, 三次元応力場の広がりに関するものである^{(9)~(11)}。本研究は前者の流れに属する。

Folias⁽⁵⁾とBenthem⁽⁶⁾は, き裂前縁が直線であり, かつ, き裂前縁が試験片表面と直角であることを仮定

し, 三次元応力場の特異性が $1/\sqrt{r}$ から外れることを理論的に示した。Bažant-Estenssoro⁽⁷⁾は三次元応力場の数値解析を行い, き裂前縁が試験片表面に垂直な静止き裂の問題では, Benthemと同じ結果を得た。さらに彼らは, 進行き裂先端におけるエネルギー収支を考え, 進行き裂においては $1/\sqrt{r}$ の特異性は保たなければならないこと, そしてそのためには, 進行き裂前縁は試験片表面と垂直にならないことを示した。彼らは, この結果を疲労き裂の進展と比較し定性的な一致を見たが, 定量的には, 必ずしも一致しなかった。しかしながら, Rolfeが構造用鋼材で行った実験は, Bažant-Estenssoroの数値結果と良く一致してい

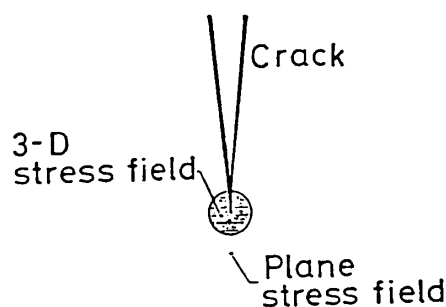


図1 き裂先端付近の応力場

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成元年2月27日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学 (〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

^{*2} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院 [現在, ブラザー工業㈱]。

る⁽⁷⁾。これらの研究から、き裂前縁と試験片表面との成す角が、き裂先端近傍に現れる三次元応力場の特異性を理解するうえで、重要な量であることがわかる。

他方、動的破壊力学の実験には静的または準静的破壊力学の実験にはない多くの技術的困難があり、動的破壊現象の本質的理解を妨げている。高速進展き裂の前縁形状は、これまで、破壊後の破面観察から推察されてきた。中でも超音波フラクトグラフィ^{(12)~(14)}の手法は、き裂の二次元的な進行を時間を追って知ることができる点で、注目に値する。しかし、高速進展き裂前縁の形状をき裂の進行中に光学的手法を用いて測定することは成されていない。本研究は、PMMA 平板中を数百 m/s の高速で進行する開口形き裂前縁のパルスホログラフィ撮影法に関するものである。パルスホログラフィを用いて、PMMA 中の高速進展き裂前縁を撮影する手法とその問題点を明らかにし、き裂前縁が試験片表面と成す角を測定するための一方法を述べる。

2. 撮影手法

2.1 試験片 本研究で用いた試験片を図2に示す。試験片は、縦 220 mm、横幅 310 mm、厚さ 20 mm の透明 PMMA 平板であり、高速進展き裂は長さ 70 mm の切欠先端で発生する。観測領域内には4本の導電塗料が塗布されており、これらが切断されときの信号を用いて、き裂速度が検出される。試験片は透明なので、点Qの位置からき裂前縁を観察することができる。しかし、PMMA 平板には板厚方向に屈折率の非一様性があり、これがき裂前縁の鮮明な写真撮影とき裂前縁形状の正確な測定とを妨げる。この点に関しては、後に議論する。き裂が2本めと3本めの導電塗料の間を進行している時に、き裂前縁のホログラフィ撮影が行われる。

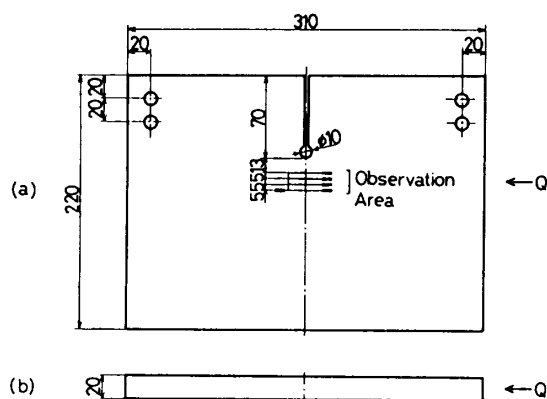


図2 透明 PMMA 試験片

2.2 破壊手法⁽¹⁵⁾ 試験片の破壊手法を図3に示す。試験片にはあらかじめ引張荷重が加えられており、その荷重は切欠先端にき裂を発生させるのに必要な荷重よりも小さい。次に、破壊用ルビーレーザーからパルスレーザー光を発射し、その光をレンズで切り欠き直下に集光する。レーザー光が集光した位置には微小な欠陥が発生し、そこから高速進展き裂が進展を開始する。微小欠陥とき裂の発生時には応力波が放射される。その応力波は試験片端面で反射し、高速進展き裂に向かって帰ってくる。本研究では、高速進展き裂がその応力波と衝突する前にき裂のホログラフィ撮影が終了するよう、試験片の大きさを十分大きくとっている。すなわち、本研究で撮影されるき裂は、無限平板中を伝ばするき裂とみなすことができる。

2.3 ホログラフィ光学系 高速進展き裂前縁のホログラフィ撮影に用いる光学系を図4に示す。き裂が観測領域の中を伝ばしているとき、撮影用パルスルビーレーザー PL が1回発振する。レーザーから出た光は凹レンズ L1 で広げられた後ビームスプリッタ BS で二つに分けられる。ビームスプリッタで反射した光はレンズ L2, L3 を通過して平行光線となり、ホログラフィ乾板 HP に斜めに入射する。これが参照光である。ビームスプリッタを透過した光はレンズ L4 を通過し、鏡 M3, M4, M5 で反射した後、試験片端面 A から試験片 S 内に入射する。端面 A には表面がわずかに粗面になっている透明平板が張り付けてある。そのため試験片内に入射した光は、拡散照明光(強い指向性は持っている)となり、き裂を一様に照明する。また、この照明光は試験片端面 A に垂直ではなく、斜め下方から入射する [図4(b)]。これは、照明光の進行方向を、き裂を観察する方向からずらすことにより、き裂の観察を容易にするためである。き裂面で弱く散乱された光は試験片端面 B を通過し、ホログラフィ乾

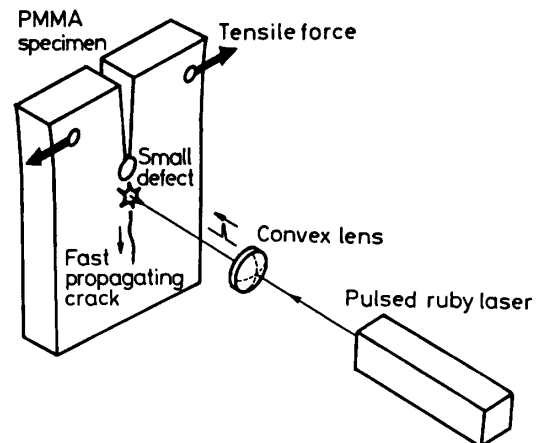


図3 試験片の破壊手法

板 HP に入射する。これが物体光である。端面 B にはガラス平板が張り付けてあり、そのガラス平板と PMMA 試験片との間は流動パラフィンで満たされている。流動パラフィンの屈折率は 1.48 であり、PMMA の屈折率 1.49 に近い。したがって、試験片端面とガラス平板との間を流動パラフィンで満たすことにより、試験片加工後に端面に残っているわずかな凸凹に因る像のひずみをなくすことができる。この光学系を用いて高速進展き裂前縁部を 1 枚のホログラムとして記録する。

記録されたき裂前縁部の再生と写真撮影の方法を図 5 に示す。現像処理されたホログラムを再生光(He-Ne レーザの平行光線)で照明することにより記録されたき裂前縁部の虚像を再生し、その写真撮影を行う。再生光の入射角 θ_c は再生されるき裂の虚像が最も明るくなる角度とする⁽¹⁶⁾。すなわち、

$$\theta_c = \frac{\theta_r}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_R} \cdot \sin \frac{\theta_r}{2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ_r は参照光の入射角、 λ_R はルビーレーザー光の波長(694 nm)、 λ_H は He-Ne レーザ光の波長(633 nm)である。式(1)で決定される θ_c は、再生像に現れる収差(ルビーレーザーと He-Ne レーザとの波長の違いから生ずる)を最小にする角度⁽¹⁷⁾

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_R} \cdot \tan \theta_r \right) \dots\dots\dots (2)$$

とは、わずかに異なる。しかし、その違いによって再生

像に現れる収差に比べて、PMMA 試験片内の屈折率の非一様性による解像力の低下のほうがはるかに大きい。すなわち、き裂前縁部の撮影においては、現在のところ、ルビーレーザーと He-Ne レーザの波長の違いにより生ずる収差は、問題にはならない。したがって本研究では、再生像が最も明るくなる θ_c において再生を行う。

3. 結果と検討

3.1 き裂前縁部の再生像 上記の手法を用いて撮影された高速進展き裂前縁部の写真の一例を図 6(a) に示す。図 5 の光学系を用い、き裂面に焦点を合わせて撮影されたものである。明るく見える部分がき裂面である。写真中央に見えるのが、試験片端面から直接観察したときに見えるき裂面である [図 6(b)中の光路 a ; (b)では、き裂は紙面に垂直に進展する]。その両側には、試験片表面に映ったき裂の鏡映像が現れている [図 6(b)中の光路 b, b']。光路 b, b' を伝ばする光は試験片表面で全反射している。この写真から、試験片の中央部では試験片表面よりもき裂が先行して進んでいることがわかる。また、き裂前縁が試験片表面と成す角は直角ではない。

3.2 屈折率の非一様性の影響 前述したように、PMMA 試験片では板厚方向に屈折率が変化しており、表面付近の屈折率は内部のそれよりもわずかに高い。そのため、試験片内部を伝ばする光の経路は、伝ばするにつれて、試験片表面のほうへ曲がり、試験片は円筒形の凹レンズに似た働きをすることになる。

図 7(a), (b) は PMMA 試験片内部での光の経路を模式的に示したものである。図 6(b)と同様、き裂は紙面に垂直に進展する。き裂面が試験片表面と交わる点を D, E とし、き裂面を点 Q(x 軸上)から観察するものとする。図 7(a)において、点 D, E から出た光は、その経路を曲げながら、点 Q に到達する。点 Q で、その二つの光路の接線を引けば、その接線は、それぞれ、

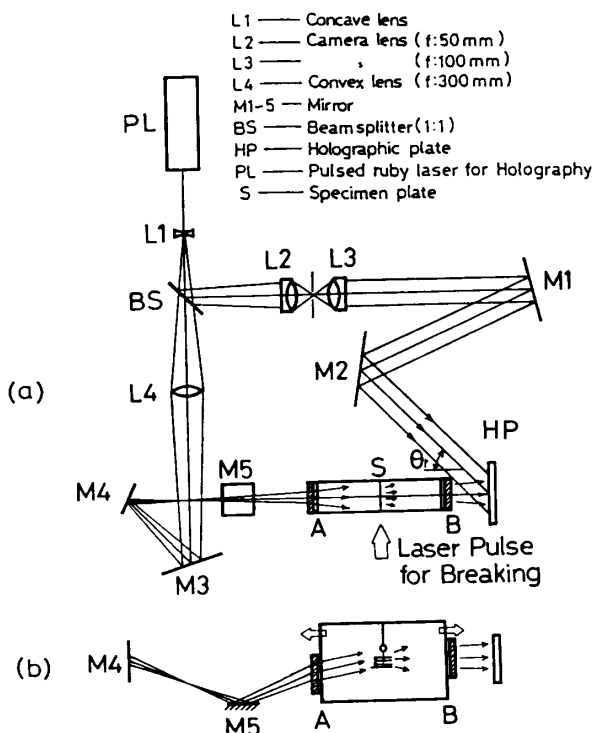


図 4 記録用ホログラフィ光学系

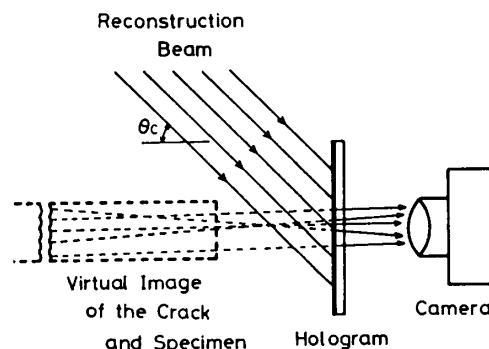


図 5 再生用光学系

点D', E'でき裂面と交わる。これは、点Qから観察した場合には、点D, EはあたかもD', E'にあるかのごとく見えることを意味する。すなわち、PMMAの屈折率の非一様性は、板厚方向に、画像の収縮を生じさせ

る。また前述したように、屈折率の非一様性により、試験片は円筒形の凹レンズに似た働きをする。そのため、撮影された画像には強い非点収差が現れ、これが板厚方向の解像力を著しく低下させている。この画像の収縮と解像力の低下は、き裂前縁形状の精密な測定とき裂前縁が試験片表面と成す角の測定において障害となる。

No. 17 $v=218\text{m/s}$

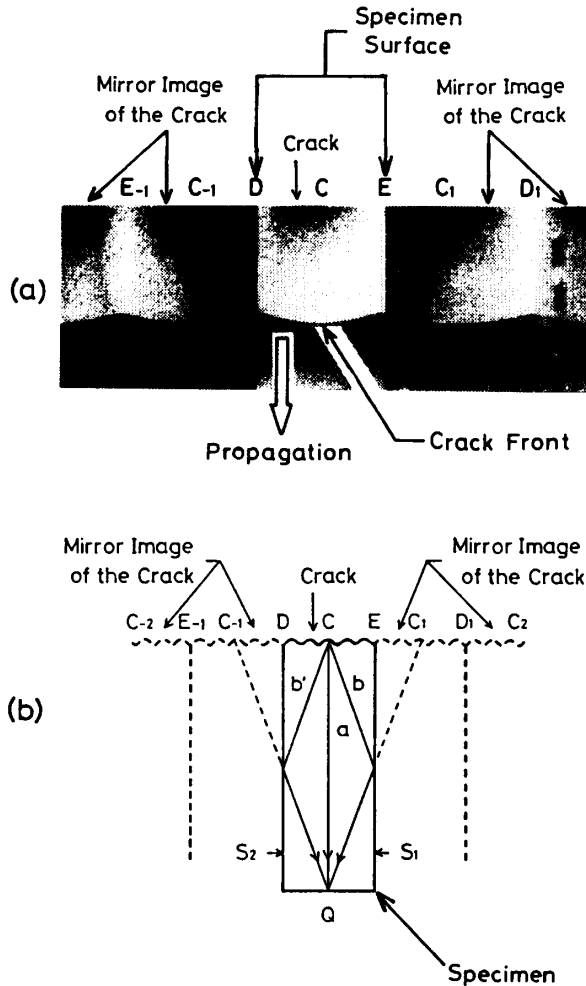


図6 高速進展き裂前縁部再生像

3.3 き裂鏡映像の撮影 この障害を避けるために、本研究では試験片表面に映ったき裂の鏡映像を撮影し、その鏡映像から、き裂前縁と試験片表面との成す角を測定した。以下にその基本的な考えを述べる。

PMMAの屈折率 n は板厚方向 (z 軸方向) のみの関数であり [$n=n(z)$], $n(z)$ は偶関数 [$n(z)=n(-z)$] とみなせる。屈折率が連続的に変化している媒質にスネルの法則⁽¹⁸⁾を適用すれば、

$$n \cos \phi = \text{const.} \dots\dots\dots (3)$$

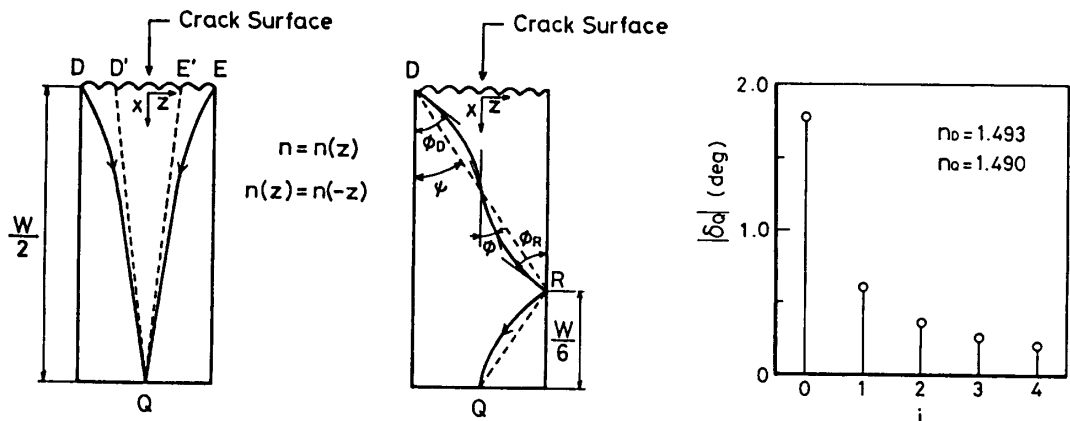
となる。ここで、 ϕ は光路が x 軸となす角である。点Dでの屈折率を n_D 、光路が x 軸となす角を ϕ_D とし、光路上の任意の一点で光路が x 軸と成す角 ϕ を $\phi_D + \delta$ とすると、式(3)から

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{n_D}{n} \cos \phi_D \right) - \phi_D \dots\dots\dots (4)$$

となる。屈折率が一樣ならば、 δ は常に零である。

点Dから出た光が試験片表面で反射することなく点Qに到達する光路が図7(a)に示してあり、一度試験片表面で反射する場合の光路が図7(b)である。

(a)の場合、光路の長さは約 $w/2$ であり、その距離を伝ばする間に伝ば方向の偏向を受ける。(b)においては光は点Rで反射する。屈折率分布が偶関数であり、点DとRでの屈折率 n_D, n_R が互いに等しいので、式(3)より、点Rで光路が x 軸となす角 ϕ_R は、点Dにおける角 ϕ_D に等しい ($\phi_R = \phi_D$)。すなわち点Rでは、



(a) PMMA 試験片内での光路 (b) PMMA 試験片内での光路 (c) 反射回数 i に対するふれの角 δ_i

図7

ふれの角 δ は零である。したがって (b) の光路では、点 Q における光路のふれの角 δ_0 は光路 RQ 上で生じるものである。これは、ふれの角を生じさせる光路長が実質的に約 1/3 になったことを意味し、試験片の円筒形凹レンズとしての影響を減少させる。

光路 DR 上で、 $z=0$ での δ を δ_0 とすると、式 (4) において、 ϕ_D は比較的良好な近似で

$$\phi_D = \psi - \delta_0/2$$

と置き換えることができ、上式を用いて式 (4) を書き換えれば、

$$\delta_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{n_Q - n_D}{n_Q + n_D} \frac{1}{\tan \psi} \right) \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここで、 n_Q は点 Q (x 軸上) での屈折率である。点 Q でのふれの角 δ_0 は、符号を除いて、 δ_0 と等しい ($|\delta_0| = |\delta_Q|$)。したがって、上記の式を用いて、 δ_Q の絶対値を知ることができ、それを図 7(c) に示す。 $n_D = 1.493$, $n_Q = 1.490$ と仮定した。横軸は試験片表面での反射回数である。試験片表面で 1 回反射する光では、反射しない光に比べて、ふれの角が約 1/3 に減少する。また、試験片表面で反射する回数が多い光路ほど、屈折率の非一様性による進行方向のふれが少ない。このことから、試験片表面で反射した光 (すなわち、試験片表面での鏡映像) を撮影すれば、屈折率の非一様性による画像の収縮と解像力の低下を低減できることがわかる。

上記のことを確認するため、き裂面に相当する所に交差角の分かっている直線を 2 本引き、試験片表面に映った鏡映像から、2 本の直線が成す角の測定を行った。その結果を図 8 に示す。鏡映像から測定された角

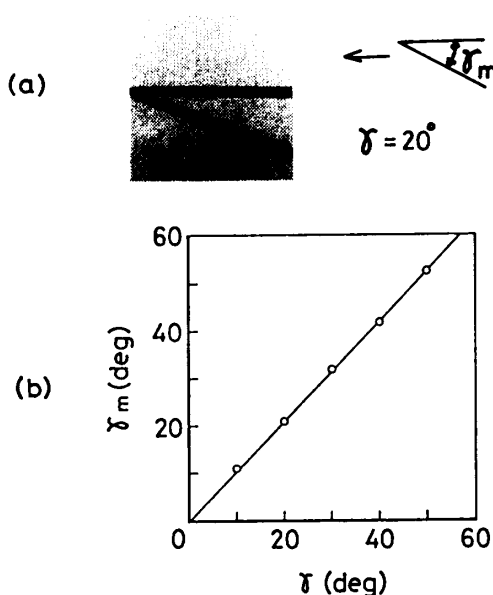


図 8 真の角度 γ に対する写真からの読取り角 γ_m

γ_m は真の角 γ にほぼ等しい ($\gamma_m = 1.05\gamma$) ことがわかる。これにより、試験片表面で 1 回反射してできるき裂の鏡映像を撮影すれば、き裂前縁が試験片表面と成す角を測定することができる。

3.4 き裂前縁と材料表面との成す角

このようにして撮影されたき裂前縁部の写真の例を図 9 に示す。(a) はき裂形状がほぼ左右対称な例であり、き裂速度は 218 m/s である。き裂は試験片内部において先に進行している。また、き裂前縁が二つの試験片表面と成す角 α, β は直角ではなく、それぞれ $102^\circ, 101^\circ$ である。(b) は、き裂形状が左右非対称な例であり (き裂速度 248 m/s)、き裂前縁が二つの試験片表面と成す角 α, β が互いに異なっている ($105^\circ, 93^\circ$)。しかし、この様にき裂前縁形状に非対称性が現れている場合でも、試験片内部のき裂が先に進行していることに変わりはない。

Bažant-Estenssoro は進行き裂前縁が試験片表面と成す角 α (または β) を数値計算で求めた。それによればポアソン比が 0.39 の時、 $\alpha = 104^\circ$ という結果が得られている。図 9 の写真に示した α (または β) は彼らが予想した値と近いものであり、 α, β が鈍角であるという点では一致している。しかしながら、 α, β はき裂ごとに異なっており、一定の値を示してはいない。特に、き裂前縁形状が非対称になった時には α と β との間に大きな違いが生じている。

3.5 試験片板厚の減少による影響

き裂先端付近では、強い引張応力により、試験片板厚の減少が起こる。そのため試験片表面は平面鏡とみなせなくなり、そのような所に映った鏡映像からは、正確なき裂前縁形状を知ることができない。これを避けるために本研究では、き裂から十分離れた所に映る鏡映像を撮影した [例えば、図 7(b) 中の点 R はき裂から 100 mm 以上離れている]。具体的には、図 6 において、CD 間のき裂前縁形状を知るために C_1D_1 間を撮影し、CE 間を知るために C_1E_1 間を撮影する。これにより、き裂先端から 75 mm 以上離れた所に映った鏡映像を撮影していることになり、板厚減少の影響はないものと考えられる。図 9 の写真は、このようにして得られた 2 枚の写真 (C_1D_1 間と C_1E_1 間) をつなぎ合わせて作られたものである。

3.6 き裂前縁近傍における屈折率変化の影響

き裂先端周辺には $1/\sqrt{r}$ の特異性を持つ応力場が存在しており、その応力場により PMMA の屈折率が減少する (透過形コウスティック法⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾はこの屈折率変化と板厚変化とを利用している)。き裂前縁の観察は、応

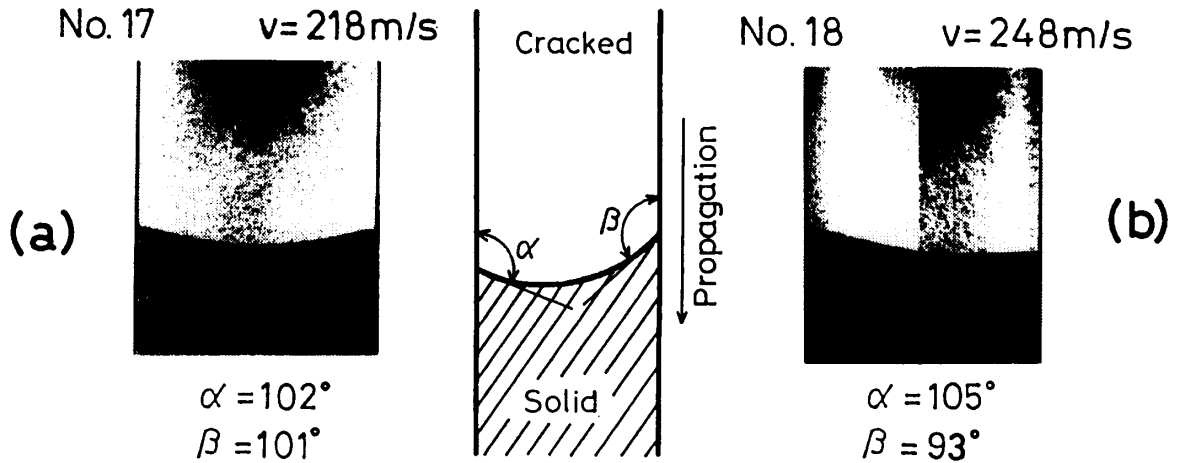


図9 高速進展き裂前縁と、それが試験片表面と成す角

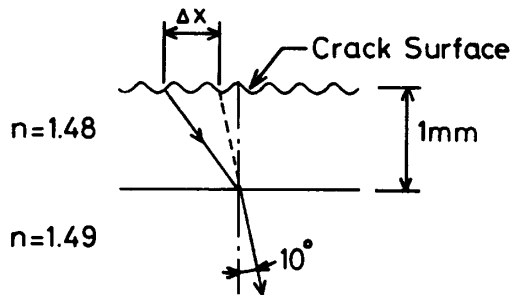


図10 き裂先端付近の屈折率変化による影響

力による屈折率変化が起こっている領域を通して行うことになり、この影響がどの程度あるかを見積もる必要がある。

マックスウェル・ノイマン応力光則⁽²²⁾(Stress optics law)を光学的に等方なPMMAに適用し、平面応力状態を仮定すると

$$\Delta n = A(\sigma_x + \sigma_y) \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで Δn は屈折率変化、 σ_i は応力成分、 A は応力光定数である。PMMAのヤング率を3200MPa、ポアソン比を0.39とすると、Raftopoulosら⁽²³⁾の実験から、 $A = -6.1 \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ となる。き裂の応力拡大係数を $K = 2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と仮定し、き裂先端からき裂面と直角方向に0.1mm離れた位置での屈折率変化 Δn を求めると $\Delta n = -7.0 \times 10^{-3}$ 、1mm離れた位置では $\Delta n = -2.2 \times 10^{-3}$ である。

そこで、き裂先端から1mm以内の領域では Δn が-0.01(すなわち $n=1.48$)であると仮定し、その境界のところから光が $\phi=10^\circ$ (試験片表面で1回反射して出来るき裂の鏡映像を観察するときの角度)で出て行くものとする(図10参照)。この条件のもとで図中の

Δx を求めると、 $\Delta x = 1.2 \times 10^{-3} \text{mm}$ となり、大変小さい。すなわち、き裂先端付近に現れる $\Delta n = 0.01$ 以下の屈折率の変動は、観察されるき裂前縁に対して、 $1 \mu\text{m}$ 程度のひずみをもたらすだけである。したがって、き裂前縁形状の測定、き裂前縁が試験片表面と成す角の測定においては、き裂前縁近傍に現れる屈折率変化の影響は無視できる。

3.7 超音波フラクトグラフィとの比較

まえがきでも述べたように、高速進展き裂の進展中の前縁形状を破壊後の破断面観察から知る手法として、超音波フラクトグラフィがある。その手法と、本研究で示したパルスホログラフィ法とを比較し、それぞれの特徴を以下に示す。

超音波フラクトグラフィ

- (1) 破壊後の破断面観察から、き裂前縁形状を知る。
- (2) き裂の二次元的な進行を時間を追って高い精度で知ることができる。
- (3) き裂速度が大きくなり、き裂面が粗面になると計測が困難になる。

パルスホログラフィ

- (1) 進行中のき裂そのものを観察している。
- (2) 瞬間写真のため、き裂の進行を時間を追って知ることができない。
- (3) き裂速度が大きくなりき裂面が粗面になると、き裂面での散乱光強度が大きくなり、撮影は容易になる。
- (4) 高速進展き裂に先行して発生するクレイズ層の厚さ測定を可能にする光干渉法に発展する可能性がある。

このように二つの手法は、それぞれ違った特長を持

っており、互いに補い合うデータを提供するのである。

超音波フラクトグラフィをPMMA中の高速進展き裂に適用した例として高橋^{(12)~(14)}の優れた研究があげられる。その研究では、き裂を直進させる目的で、表面に溝(side grooves)が切つてある試験片を用いている。そのため溝の所で強い応力集中が起こり、き裂前縁の試験片表面に近い部分が内部よりも先に進行する結果が得られている。それに対して本研究では溝のない試験片を用いているため、試験片内部のほうが表面近くよりも先に進行しているき裂を撮影している。このような実験条件の違いがあるため、本研究の手法で撮影されるき裂前縁形状と超音波フラクトグラフィから知られるき裂前縁形状とがどの程度一致するかは、現在のところ言うことができない。それらはいたいは一致するだろうと予想されるが微細な部分で一致するか否かは、破壊機構との関連から、興味深い問題になるかもしれない。

4. 結 論

パルスホログラフィの手法を用いることにより、PMMA中を高速進展するき裂前縁の瞬間写真を撮影することができる。得られた写真から、き裂前縁と試験片表面とが成す角を測定することができる。測定された角度は、Bažant-Estenssoroが数値計算で求めた値と近い。しかし、測定された角度はき裂ごとに異なっており、特に、き裂前縁形状が左右非対称になった時には、その差は大きい。このように、PMMA中を実際に進展しているき裂前縁が試験片表面と成す角は必ずしも一定していない。

本研究で試験片の破壊に用いたパルスルビーレーザーは、文部省宇宙科学研究所、小口伯郎教授、阿部隆土助教授から借用したものである。また本研究の実施に当たり、本学大学院生、青木功君、三浦一寿君の協力を得た。ここに感謝する。

文 献

- (1) Yoffe, E. H., The Moving Griffith Crack, *Phil. Mag.*, **42** (1951), 739.
- (2) Craggs, J. W., on the Propagation of a Crack in an Elastic-Brittle Material, *J. Mech. Phys. Solids*, **8**(1960), 66.
- (3) Achenbach, J. D. and Tolikas, P. K., Elastodynamic

- Effects on Crack Arrest, *ASTM STP*, 627(1977), 59.
- (4) 青木, 動破壊力学と動的破壊じん性, *材料*, **33**-365(1984), 229.
- (5) Folias, E. S., On the Three-Dimensional Theory of Cracked Plates, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **42** (1975), 663.
- (6) Benthem, J. P., State of Stress at the Vertex of a Quarter-Infinite Crack in a Half-Space, *Int. J. Solids Struct.*, **13**(1977), 479.
- (7) Bažant, Z. P. and Estenssoro, L. F., Surface Singularity and Crack Propagation, *Int. J. Solids Struct.*, **15**(1979), 405, and Addendum to the Paper, *Int. J. Solids Struct.*, **16**(1980), 479.
- (8) Suzuki, S., ほか2名, Pulsed Holographic Microscopy as a Measurement Method of Dynamic Fracture Toughness for Fast Propagating Cracks, *J. Mech. Phys. Solids*, **36**-6(1988), 631.
- (9) Yang, W. and Freund, L. B., Transverse Shear Effects for Through-Cracks in an Elastic Plate, *Int. J. Solids Struct.*, **21**-9(1985), 997.
- (10) Rosakis, A. J. and Ravi-Chandar, K., on Crack-Tip Stress State: an Experimental Evaluation of Three-Dimensional Effects, *Int. J. Solids Struct.*, **22**-2(1986), 121.
- (11) 鈴木・細田, 高速進展き裂コウスティックのホログラフィ記録, *機論*, 55-517, A (1989), 1974.
- (12) Takahashi, K., Dynamic Fracture Instability in Glassy Polymers as Studied by Ultrasonic Fractography, *J. Polym. Eng. Sci.*, **27**-1(1987), 25.
- (13) 高橋, マイクロメカニクス, *高分子*, **36**(1987), 726.
- (14) 高橋, 超音波を利用した高分子のフラクトグラフィ, *固体物理*, **23**-6(1988), 417.
- (15) Suzuki, S. and Nakajima, T., Development of Laser Inducing Technique for Fast Propagating Cracks in PMMA, *Dynamic Fracture Mechanics For the 1990's*, ASME PVK-Vol. 160, (1989), 79.
- (16) Smith, H. M., *Principles of Holography*, 2nd ed., (1975), 48, Wiley, New York.
- (17) 文献(16)の143ページ.
- (18) Born, M. and Wolf, E., *Principles of Optics*, (1975), 38, Pergamon Press.
- (19) Manogg, P., Schattenoptische Messung der Spezifischen Bruchenergie Während des Bruchvorgangs Bei Plexiglas, *Proc. Int. Con. Physics Non-Crystalline Solids, Delft, The Netherlands*, (1964), 481.
- (20) Beinert, J., ほか2名, Neuere Ergebnisse zur Anwendung des Schattenfleckverfahrens auf stehende und schnell-laufende Brüche, *Proc. 6th Int. Con. Exp. Stress Anal., VDI-Report*, No.313, (1978), 791.
- (21) Rosakis, A. J., Analysis of the Optical Method of Caustics for Dynamic Crack Propagation, *Eng. Fract. Mech.*, **13**(1980), 331.
- (22) Theocaris, P. S., Dependence of Stress-Optical Coefficients on the Mechanical and Optical Properties of Polymers, *J. Strain Analysis*, **8**-4(1973), 267.
- (23) Raftopoulos, D. D., ほか2名, Static and dynamic mechanical and optical behaviour of high polymers, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **9**(1976), 869.

討 論

〔質問〕 清水 紘 治〔関東学院大学工学部〕

(1) き裂前縁のなす角度 α, β が一定しないとあるが、ルビーレーザーでき裂を進展させるときにレーザーが当たった片側表面から先にき裂が入り、非対称になるという影響はないか。

(2) アクリル板のき裂前縁のなす角度を Bežant らの数値計算の結果と比較しているが、材料特性の影響についてはいかがか。特に金属材料との比較について資料をお持ちだったら、お教え願いたい。

(3) 式(8)は平面応力としたときのものであるが、図1にもあるようにき裂先端では平面ひずみに近いわけだから、平面ひずみの条件で示したほうがよいのではないか。質問者のコースティックス法に関する実験においても三次元応力の影響は大きく、厚さ減少度と厚さ方向応力を考慮しないといけないわけだが、本実験では厚さ方向応力だけを考えればよいことになる。式(8)の x, y を平板の面内座標とすれば、光の進む方向と直角な σ_z を考慮することになるかと思う。

〔回答〕 (1) き裂前縁が非対称になることに関しては岸本先生からも同様の質問をいただいているので、そこで詳しく答えさせていただきます。

(2) き裂前縁が試験片表面と成す角(き裂前縁角)は無次元量であるため、これを支配する物理量は無次元量でなければならない。進行き裂先端部の構造を支配する無次元量は複数個存在するが、脆性材料中のき裂において最も重要な量はポアソン比である。Bažant-Estenssoro の計算結果もき裂前縁角がポアソン比に依存することを示しており、き裂速度が小さい場合には、き裂前縁角はポアソン比に支配される。したがって、高分子材料、金属材料を問わず、ポアソン比が同じであれば、き裂前縁角は同じになると言える。もちろん、き裂速度が大きくなれば、ポアソン比以外に、き裂速度の影響が現れてくる。

文献(7)の“Addendum to the paper”の中で、Bažant-Estenssoro の数値結果は Rolfe が構造用鋼材で行った実験と比較されている。そこでは、き裂が停止したときのき裂前縁角が数値結果と比較されているが、比較的よく一致したようである。

(3) ご指摘のとおり、き裂先端付近の試験片内部では、式(8)を平面応力よりも平面ひずみの条件で表したほうが適切かもしれない。その場合には式(8)は

$$\Delta n = A(1+\nu)(\sigma_x + \sigma_y)$$

と書き直される。ここで、 ν は PMMA のポアソン比

(0.39)である。すなわち、平面ひずみ場での屈折率変化 Δn は平面応力場での屈折率変化に比べて約40%大きいことになる。

しかし、著者が3・6節で行おうとしたのはオーダの見積もりである。すなわち、き裂先端付近で起こる屈折率変化が、観察されるき裂前縁にどの程度のひずみをもたらすのかを大ざっぱに知ることである。たしかに平面ひずみの条件のもとで計算すれば、上記のように、屈折率変化は40%ほど大きく見積もられることになる。しかし、それはけた違いの変化をもたらすわけではなく、き裂前縁角の測定においてはき裂先端付近の屈折率変化の影響は無視できるという結論に、変わりはない。

〔質問〕 岸本 喜久雄〔東京工業大学〕

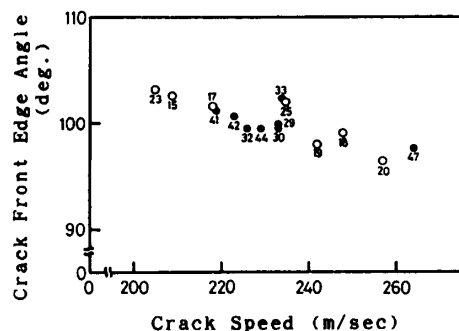
高速で進展するき裂に対して新しい計測法を開発されたことに敬意を表す。以下の点についてご教示願いたい。

(1) き裂前縁形状が非対称となっているのは、き裂を進展させる際に図3のように片側からレーザー光を当てているためと考えられないか。

(2) き裂進展速度と α, β の間になんらかの関係が認められたか。

〔回答〕 (1) き裂発生用パルスレーザー光を試験片の片側から入射していることと、き裂前縁の非対称性とは、関係がないものと考えられる。

パルスレーザー光を用いたき裂の発生は、レーザー光の焦点付近に欠陥が発生することを利用してしている。すなわち、レーザー光が直接き裂を発生させるわけではなく、レーザー照射による焦点付近の温度上昇、高温高圧プラズマの発生、それによる貝殻状の微小欠陥の発生により、破壊が誘起される。したがってレーザー光が試験片のどちら側から入射したかは問題ではなく、本質的に



付図1 き裂前縁角とき裂速度との関係

は、欠陥が板厚方向のどの位置に発生したかが問題となる。

ところが、レーザー照射により発生する欠陥の位置とき裂前縁の非対称性との間には、相関が認められない。したがって、パルスレーザー照射によるき裂の発生とき裂前縁の非対称性とは関係がないと考えられる。

著者らは、き裂前縁の非対称性の最も有力な原因として、試験片に発生する面外曲げを考えている。図2に示したような切欠きを有する試験片の上端に引張力を加えると、試験片には面外曲げが発生する。この曲げは、試験片面のどちら側に凸になるかは決まってお

らず、試験片ごとに変化する。そのためにき裂前縁の非対称性も試験片ごとに変化するのではないかと考えられる。このことを確かめるためには、面外曲げの発生しない試験片、すなわち、切欠きを持たない平板試験片中を伝ばするき裂を観察するのがいちばん良いだろう。近いうちに試みる予定である。

(2) き裂前縁角(α, β)とき裂速度との間には関係がある。き裂速度の増加に伴い、き裂前縁角は直角に近づいていく傾向が認められる(付図1)。この点に関しては、近いうちに(1年以内)、あらためて詳しく報告させていただく。