

動的破壊靱性値の新しい計測法*

(パルスホログラフィ顕微鏡法を用いた高速進展き裂の COD 計測)

鈴木 新一^{*1}, 末富 泰志^{*2}
本間 寛臣^{*1}, 草鹿 履一郎^{*3}

A New Method for Dynamic Fracture Toughness Measurement (COD Measurement of Fast Propagating Crack by means of Pulsed Holographic Microscopy)

Shinichi SUZUKI, Yasushi SUETOMI,
Hiroomi HOMMA, and Riichiro KUSAKA

Pulsed holographic microscopy is applied to take an instantaneous microscopic photograph of the neighborhood of a crack tip propagating in a PMMA plate specimen at a speed of several hundred meters per second. From the photograph, crack opening displacements (COD) are measured in the vicinity of the crack tip, and the dynamic fracture toughness K_{ID} is calculated through the formula of COD in the singular stress field of a propagating crack. Two types of optical systems are used for holographic recording of cracks. The values of K_{ID} obtained through one optical system are in agreement with those obtained through the other. One of the holographic optical systems can simultaneously record the caustic of a fast propagating crack at a moment when the crack tip is recorded as a hologram. The value of K_{ID} calculated from COD measurement is roughly in agreement with that from the caustic method.

Key Words: Fracture, Pulsed Holographic Microscopy, COD, Dynamic Fracture Toughness, Fast Propagating Crack

1. ま え が き

材料の動的破壊靱性値⁽¹⁾⁽²⁾を求める光学の実験手法に、光弾性法⁽³⁾⁽⁴⁾、コウステック(Caustic)法^{(5)(6)~(10)}、ホログラフィ干渉法⁽¹¹⁾がある。なかでも、コウステック法は装置の構成要素が比較的少ない利点があり、動的破壊力学における代表的な実験手法となっている。これらの光学的手法では、高速進展き裂先端付近の応力場を知り、そこから動的破壊靱性値を得ることができる。本研究は、上記の手法に比べて極高い解像力を持つ光学的手法を用いた、新しい動的破壊靱性値計測法を提示しようとするものである。

最近、著者らはパルスホログラフィ顕微鏡法を用いたモード I 形(開口形)高速進展き裂先端部の瞬間顕微鏡撮影法を開発した⁽¹²⁾。得られた写真から、き裂先端部(例えば、き裂先端から 2 mm 以内)のき裂形状を知ることができる。ここでは、パルスホログラフィ顕微鏡法を用いて撮影された高速進展き裂先端部の瞬間

顕微鏡写真からき裂開口変位(COD)を測定し、動的破壊靱性値 K_{ID} を求める手法を確立する。

従来の手法はき裂先端付近での試験片表面の変形や光学定数の変化を測定することにより動的破壊靱性値を求めている。それに対して本手法はき裂先端近傍におけるき裂形状の直接観察から動的破壊靱性値を求めることを特徴としている。

2. 計 測 手 法

パルスホログラフィ顕微鏡法を用いた高速進展き裂の瞬間顕微鏡撮影技術の詳細に関しては、すでに報告している⁽¹²⁾。ここでは、動的破壊靱性値の計測に焦点を絞り、その概要を説明する。

2.1 試験片 本研究で用いた試験片を図 1 に示す。試験片の寸法は縦 120 mm, 横 100 mm, 厚さ 3 mm であり、材質は PMMA (市販の透明アクリル) である。試験片表面は十分滑らかであり、鏡面とみなせる。試験片には長さ 25 mm の切欠が設けてある。高速進展き裂はこの切欠先端部で発生し、観測領域に向かって進行する。き裂が数百メートル/s の速度で観測領域の中を進行している間にパルスレーザを発射し、以下に示すホログラフィ光学系を用いて、そのき裂をホログラムとして記録する。観測領域の上端と下端には

* 昭和 62 年 11 月 21 日 第 949 回講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 3 月 26 日。

*¹ 正員、豊橋技術科学大学 (〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1)。

*² 豊橋技術科学大学大学院 (現在 東レ)。

*³ 豊橋技術科学大学。

導電塗料が塗ってあり、それらがき裂先端によって切断される時の信号を用いてき裂速度を測定する。

2・2 パルスホログラフィ顕微鏡法 高速進展き裂先端部の写真撮影を行うために二つの光学系を用いた。ひとつはき裂進展に伴って発生したき裂新生面からの散乱光を物体光として記録する光学系であり、もうひとつは試験片表面からの鏡面反射光を物体光として記録する光学系である。後者はホログラムの記録と同時に、そのき裂のコウスティックをも記録する。

2・2・1 光学系1 き裂新生面からの散乱光を物体光として記録するホログラフィ光学系を図2に示す。き裂は試験片S上を紙面に垂直な方向に進行する。パルスレーザ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, L2を通過後平行光線となる。この平行光線は鏡M1, M2, M3で反射された後ホログラム乾板に入射する参照光である。BS1を通過した光はレンズL3で広げられビームスプリッタBS2で二つに分けられる。分けられた二つの光はそれぞれ鏡M4, M5で反射された後試験片Sを照明する。本実験では透明材料を試験片に用いたので、き裂の進行によって生じたき裂新生面のみが明るく照明されることになる。き裂新生面で散乱された光はカメラレンズL4を通過し、ホログラム乾板に入射する物体光となる。L4は3倍に拡大されたき裂の実像を形成し、ホログラム乾板はこの実像を記録する。

2・2・2 光学系2 試験片表面からの鏡面反射光を物体光として記録し、同時にき裂のコウスティックをも記録する光学系を図3に示す。パルスレーザから出た光はレンズL1で広げられ、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L2, L3を通過した後平行光線となる。この光は、鏡M1で反射した後ホログラム乾板に入射する参照

光である。BS1を透過した光はレンズL4を通過して平行光線になる。この平行光線は鏡M2で反射し、ビームスプリッタBS2を透過して、試験片表面に垂直に入射する。試験片表面で鏡面反射された光の一部はBS2で反射され、レンズL5を通過してホログラム乾板に入射する物体光となる。レンズL5は2.5倍に拡大された試験片表面の実像を形成し、ホログラム乾板はこの実像を記録する。試験片表面に入射する光のうち、き裂に入射する光はき裂新生面によって散乱されるが、それ以外の所に入射した光は試験片表面で鏡面反射される。き裂新生面から散乱してホログラム乾板に入る散乱光強度は、試験片表面から鏡面反射してホログラム乾板に入る光強度に比べてはるかに小さい。したがって、形成される実像は、試験片表面が明るく、き裂が暗い影のように見える実像である。

試験片表面に入射した光の一部は試験片を透過し、写真乾板に到達する。写真乾板にはき裂先端部の応力場によって生じるコウスティックが記録される。

上記のようにこの光学系は、き裂先端部のホログラムとコウスティックとを同時に記録できる。この点は、この光学系の大きな特長である。

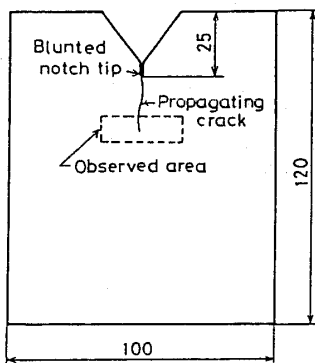


図1 PMMA試験片(高速進展き裂は切欠先端部で発生し観測領域に向かって進行する)

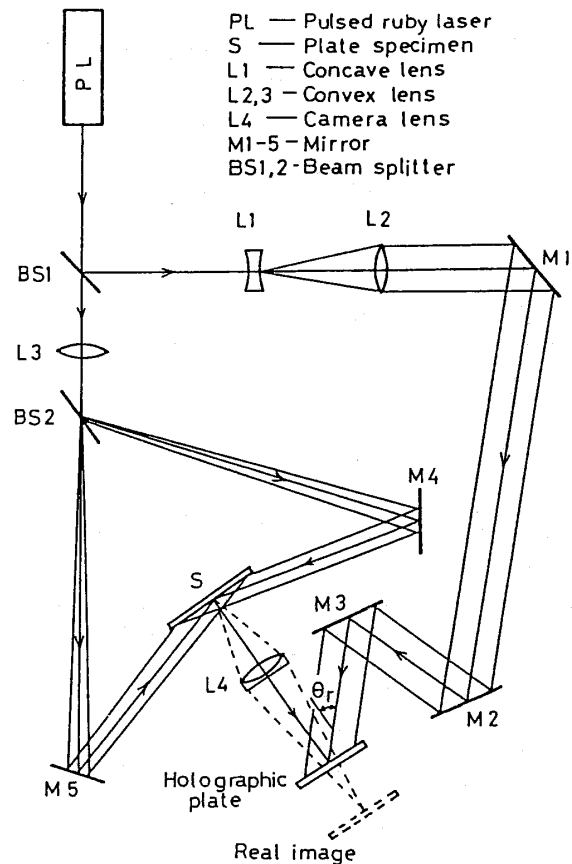


図2 ホログラフィ光学系1(き裂新生面から散乱された光を物体光として記録する)

2.2.3 再生 上記の光学系で記録されたホログラムを He-Ne レーザ光で照明し、き裂の実像を再生する。再生された実像は顕微鏡で拡大され写真撮影される。

3. 結果と検討

3.1 高速進展き裂先端部の再生像 高速進展き裂先端部のホログラフィ再生像の顕微鏡写真を図 4(a), (b) に示す。顕微鏡の焦点は試験片 (ホログラフィ再生像) の表面 (記録時に照明される側) に合わせている。(a) は光学系 1 を用いて、き裂新生面からの散乱光を物体光として記録したホログラムからの再生像である。き裂の進行速度は 500 m/s である。試験片表面での二つのき裂新生面の間が明るく写っている。(b) は、光学系 2 を用いて試験片表面からの鏡面反射光を物体光とした場合の再生像である。き裂の進行速度は 313 m/s である。試験片表面での二つのき裂新生面の間が暗く写っている。写真には進行中き裂以外に多くの干渉縞が写っている。この干渉縞は、照明された側の試験片表面で反射した光とそれと反対側の試験片表面で反射した光とが干渉した結果生じる。し

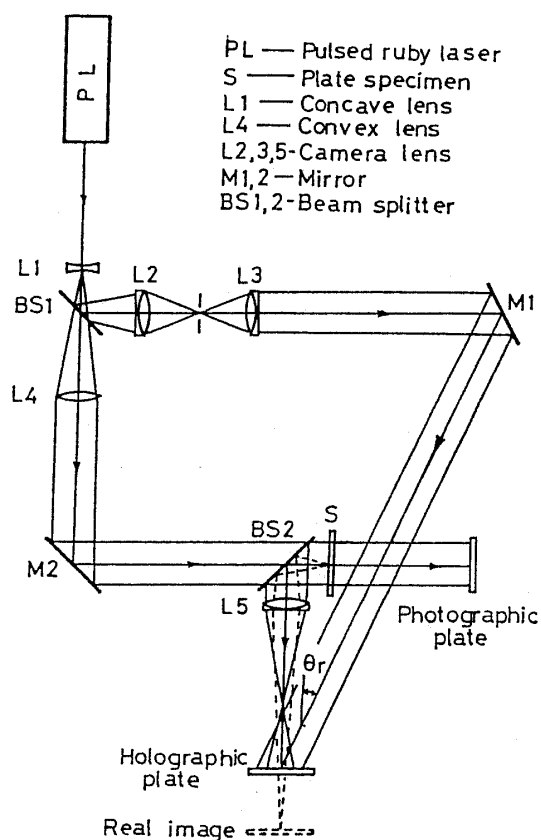
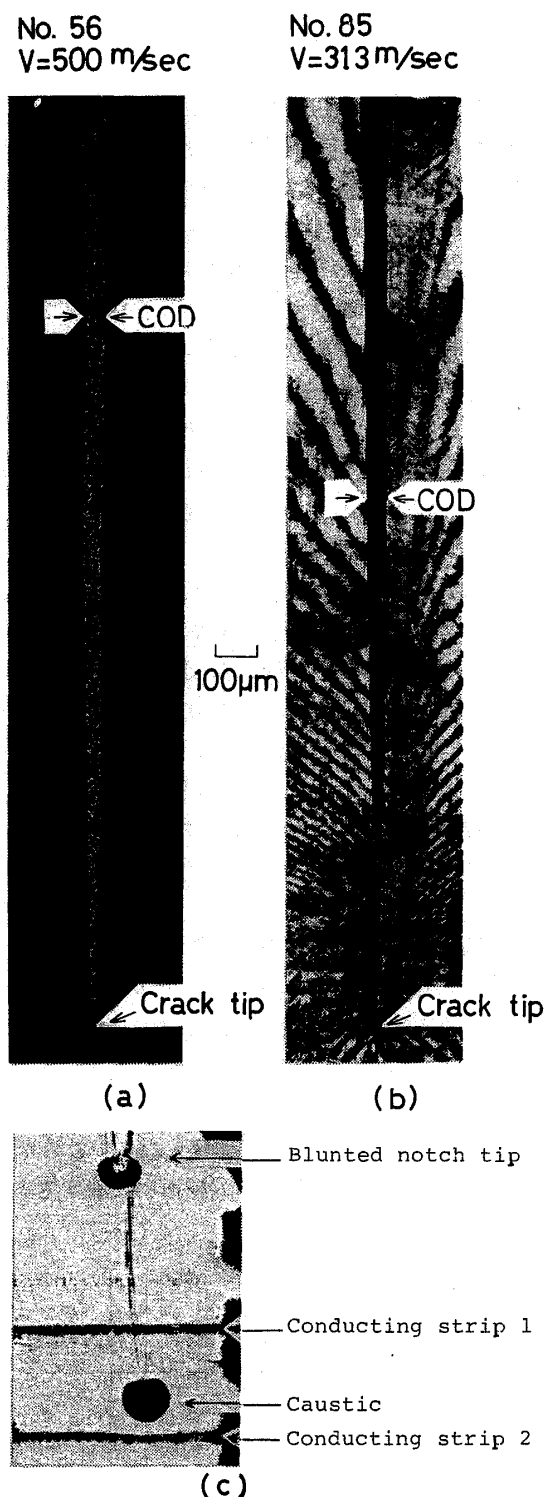


図 3 ホログラフィ光学系 2 (試験片表面で鏡面反射された光を物体光として記録する。同時に、高速進展き裂のコウスティックをも記録する)



(a) 光学系 1 を用いて撮影された高速進展き裂の瞬間顕微鏡写真 (き裂速度は 500 m/s)
(b) 光学系 2 を用いて撮影された高速進展き裂の瞬間顕微鏡写真 (き裂速度は 313 m/s)
(c) (b) に示された高速進展き裂のコウスティック

たがって応力場による材料の屈折率の変化を反映しており、干渉縞から応力場を推定することも可能であろう。しかし、ここではき裂開口変位 (COD) のみに着目する。

図 4(c) は (b) に示されたき裂のコスティックであり、光学系 2 によってき裂先端のホログラムと同時記録されたものである。撮影が二つの導電塗料間の観測領域で行われていることがわかる。

3.2 高速進展き裂開口変位 高速進展き裂先端付近の COD をき裂先端からの距離 r の関数として描いたのが図 5 である。(a) は図 4(a) に示されたき裂の COD をき裂先端からの距離 r の関数として示したものであり、(b) は図 4(b) に示されたき裂の COD を示したものである。次節に示すように、線形破壊力学では COD はき裂先端からの距離 r の $1/2$ 乗に比例することが理論的に予測されている⁽¹³⁾。すなわち、

$$COD = a(v)\sqrt{r} \dots\dots\dots (1)$$

図 5(a) は、COD の測定点が、き裂先端からの距離が $100\mu\text{m}$ から 2.0mm の範囲内で、 \sqrt{r} の直線に乗っていることを示している。また、図 5(b) は、COD の測定点が $400\mu\text{m}$ から 2.5mm の範囲内で、 \sqrt{r} の直線に乗っていることを示している。すなわち、き裂先端から少なくとも $100\mu\text{m}$ から 2.5mm 程度の範囲内では $1/\sqrt{r}$ の特異性を持つ応力場が存在していることがわかる。したがって、COD を r の関数として測定することにより、式 (1) から比例定数 $a(v)$ を求めることができる。図 5(a) のき裂では $a(v)$ は $1.27(\sqrt{\mu\text{m}})$ 、(b) のき裂では $1.21(\sqrt{\mu\text{m}})$ である。

本研究で行った COD 計測では、 $20\mu\text{m}$ 以下の COD の測定において、十分な測定精度が得られていない。そのため、 $1/\sqrt{r}$ の応力場がき裂先端にどの程度近い所まで成り立っているのかはわからない。また、き裂先端から 2.5mm 以上離れたところでの COD を測定していないため、 $1/\sqrt{r}$ の応力場がき裂先端からどの程度遠くまで成り立っているのかは、現在のところ、わからない。しかし、図 5 は、き裂先端から少なくとも $100\mu\text{m}$ から 2.5mm 程度の範囲内では $1/\sqrt{r}$ の特異性を持つ応力場が存在していることを示している。 $1/\sqrt{r}$ の応力場がどの程度の範囲内で存在しているかを明らかにすることは今後に残された課題である。

3.3 動的破壊靱性値 K_{ID} 上記のように、高速進展き裂先端近くの COD 計測から、比例定数 $a(v)$ を知ることができる。これにより、試験片材料の動的

破壊靱性値 K_{ID} を求めることができる。

モード I 形高速進展き裂先端部の COD は次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$COD = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{K_I(v)}{G} (1 - \nu_1) L(v) \sqrt{r} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$L(v) = \frac{2\alpha_1(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)}{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{1 - (v/c_1)^2}, \quad \alpha_2 = \sqrt{1 - (v/c_2)^2}$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{2G(1 - \nu_1)}{\rho(1 - 2\nu_1)}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\nu_1 = \begin{cases} \nu & \text{平面ひずみ} \\ \nu/(1 + \nu) & \text{平面応力} \end{cases}$$

v ; き裂速度, G ; 横弾性係数, ρ ; 密度

ν ; ポアソン比, $K_I(v)$; 動的応力拡大係数

となる。係数 $L(v)$ はき裂の動的効果を表す係数である。き裂速度 v が零の時、 $L(v)$ は 1 となり、静止き裂の COD を表す式と一致する。進行き裂に対して、動的応力拡大係数 $K_I(v)$ と動的破壊靱性値 K_{ID} とが等しいと仮定し、式 (1) と (2) を比較することにより次式を得る。

$$K_{ID} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{G}{1 - \nu_1} \frac{1}{L(v)} a(v)$$

この式を用いることにより、き裂速度 v と比例定数 $a(v)$ とをパルスホログラフィ顕微鏡法を用いた実験から定めれば、動的破壊靱性値 K_{ID} を求めることができる。ここで、係数 $1/L(v)$ はき裂速度 v が増加するに

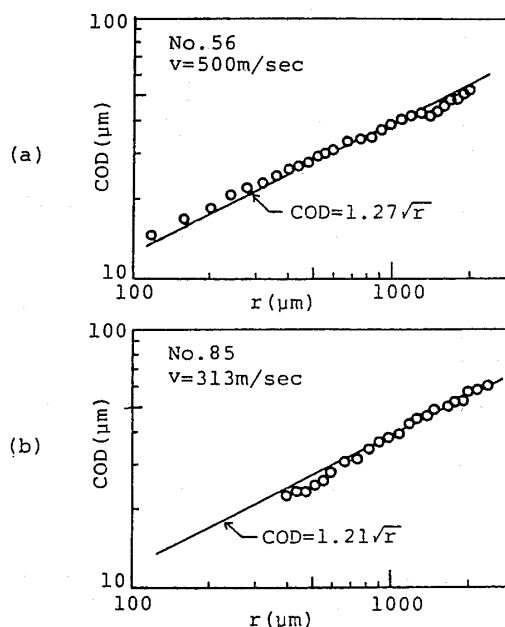


図 5 高速進展き裂の COD (き裂先端からの距離 r の関数として示してある)

つれて単調に減少し、 v がレイリー波の速度に等しくなったところで零となる性質を持つ。

動的破壊靱性値は同時記録されたコウスティックからも次式によって求められる⁽⁸⁾。

$$K_{ID} = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\pi}}{Z_0 c d} \left[\frac{D}{3.17} \right]^{5/3} \frac{4\alpha_1 \alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)(1 + \alpha_2^2)}$$

ここで、 Z_0 は試験片から写真乾板までの距離（光学系 2）、 c は試験片の光学定数、 d は試験片厚さ、 D はき裂に対して垂直方向のコウスティックの最大直径である。静的き裂においては、係数

$$F = \frac{4\alpha_1 \alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)(1 + \alpha_2^2)}$$

は 1 である。したがって動的破壊靱性値は、係数 F を乗ずることにより、静的な応力拡大係数と D との校正曲線から求められる。平面応力状態を仮定したときの F の値は、平面ひずみ状態を仮定したときの F の値と少し異なる。しかし、光学系 2 を用いて記録されたき裂の進展速度の範囲内では、その差は 1.6 % 以内であり、大きな差は生じない。

このようにして得られた動的破壊靱性値 K_{ID} とき裂速度との関係を図 6 に示す。ここで、□と◇は光学系 1 を用いた COD 計測から得られた K_{ID} であり、そ

れぞれ平面ひずみ、平面応力を仮定して計算された値である。また、△、▽、●は光学系 2 を用いた COD - コウスティック同時計測から得られた K_{ID} である。△と▽は、それぞれ、COD 計測から平面ひずみ、平面応力を仮定して計算された値であり、●はコウスティックから計算された値である。各実験値の横に付してある数字は実験番号である。

き裂先端からの距離 r と COD との読取り誤差から生じる K_{ID} の誤差を小さくするために、 K_{ID} の計算には、き裂先端からの距離 r が 400 μm 以上の領域で測定された COD を用いた。COD と r の読取り誤差から生じる K_{ID} の誤差の標準偏差は約 6 % である。図 6 に示された K_{ID} は 6 % 以上のバラつきを示しているが、これには二つの原因が推測される。ひとつは試験片材料の力学的性質のバラつきである。もうひとつはき裂と応力波との干渉である。本研究ではき裂を発生させるのに衝撃荷重を用いており、その時発生した応力波が試験片端面で反射した後き裂と干渉する。この干渉は各撮影ごとに異なっており、これが K_{ID} のバラつきを生じさせていると考えられる。光学系 1 と光学系 2 を用いた COD 計測から計算された K_{ID} は、このバラつきの範囲内で、互いに良く一致している。

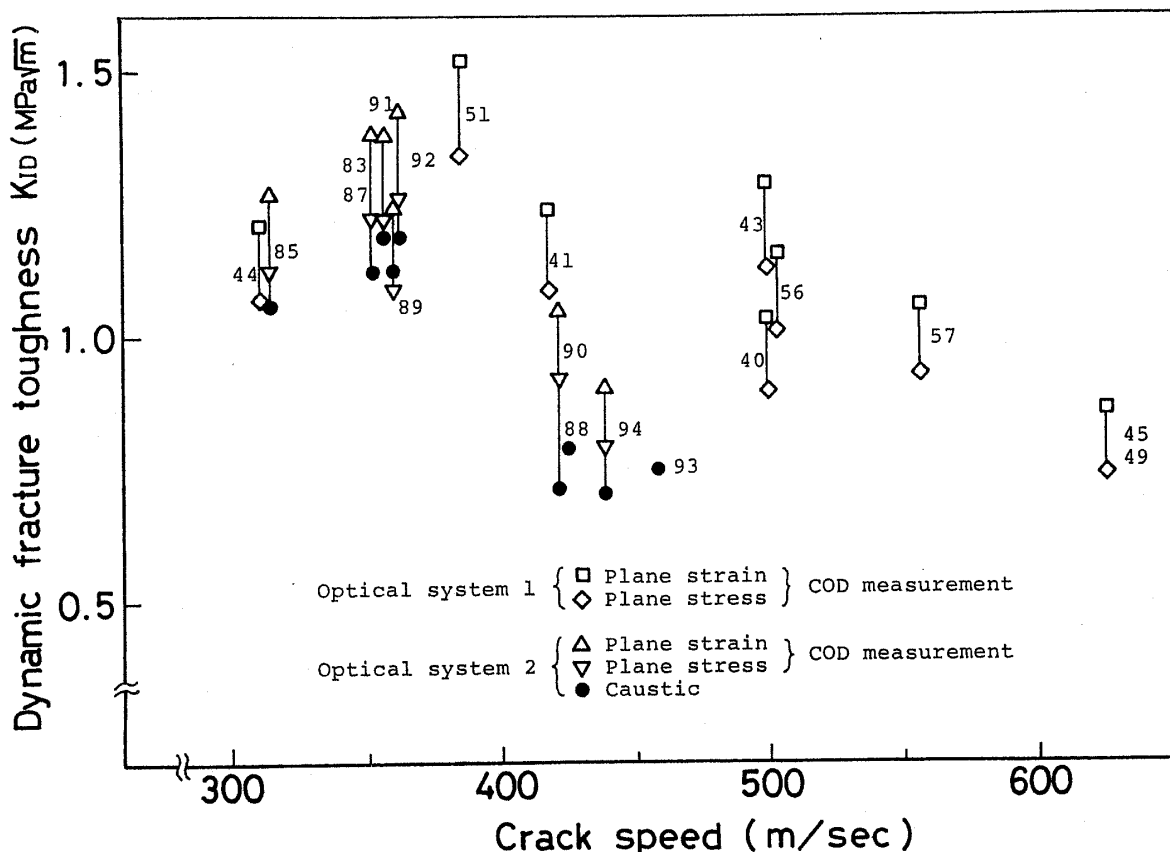


図 6 動的破壊靱性値 K_{ID} とき裂速度との関係

コウスティックの最大直径の読取り誤差から生じる K_{ID} の誤差の標準偏差は、本研究では、約 12% であった。コウスティックから得られた K_{ID} は COD 計測から平面応力を仮定して求めた K_{ID} 値と、これら標準偏差の範囲内で、ほとんどの場合一致する（実験番号 90 に関しては標準偏差以上の差が現れている）。また、ここで注目すべき点は、コウスティック法から得られた K_{ID} が COD 計測から得られた K_{ID} よりも、ほとんどの場合、低めの値を示す傾向が認められることである。実験番号 90 を除くすべての場合その差は K_{ID} の誤差の標準偏差内であり、この傾向が有意なものであるとは、現在のところ、断言はできない。しかし、COD 計測から得られる K_{ID} とコウスティック法から得られる K_{ID} とが完全に一致するものか否かは重要な問題であり、この点に関しては今後検討を要する。

PMMA の K_{ID} は、き裂速度の増加に伴って、増加することが報告されているが⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾、図 6 は K_{ID} がき裂速度の増加に伴ってなだらかに減少する傾向を示している。き裂速度の増加に伴う K_{ID} の増加は、き裂速度が増加するにつれて主き裂面の付近に局所的なき裂の分岐や微小なき裂が生じるためである、と考えられている⁽²⁾。本研究で顕微鏡写真撮影されたき裂では局所的なき裂の分岐や微小なき裂は発生しておらず、そのため K_{ID} のき裂速度に伴う増加が起こらなかったものと考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) パルスホログラフィ顕微鏡法により撮影された高速進展き裂先端部の瞬間顕微鏡写真から COD を測定することにより、高速進展き裂に対する材料の動的破壊靱性値 K_{ID} を求めることができる。すなわち、パルスホログラフィ顕微鏡法による高速進展き裂先端部の瞬間写真撮影技術は動的破壊靱性値 K_{ID} の新しい計測法になり得る。この計測法は、き裂先端から 2.5 mm 以内の微小な領域での COD 測定より K_{ID} を求めることを特徴としている。

(2) 高速進展き裂のき裂新生面から散乱される光を記録するホログラフィ光学系と試験片表面からの鏡面反射光を記録するホログラフィ光学系とを用いて K_{ID} の計測を行った。その結果、二つの光学系を用いて得られた K_{ID} は、互いに一致する。

(3) 高速進展き裂の COD とコウスティックとの同時計測を行った。その結果、COD 計測から平面応力

を仮定して求めた K_{ID} とコウスティック法から求めた K_{ID} とは、ほとんどの場合、測定誤差の範囲内で一致する。

(4) 基本的には、パルスホログラフィ顕微鏡法による動的破壊靱性値の測定は、不透明材料にも適用できる。また、試験片表面が鏡面であっても粗面であっても適用できる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、本学大学院生、伊藤昭久君の多大な協力を得た。ここに感謝する。

文 献

- (1) Hahn, G. T., ほか 5 名, Crack Arrest Concepts and Applications, *Symposium on Naval Structural Mechanics*, 10th (Washington), (1978), 205.
- (2) 青木, 動破壊力学と動的破壊じん性, 材料, 33-365 (昭 59), 229.
- (3) Knauss, W. G. and Ravi-Chandar, K., Fundamental Considerations in Dynamic Fracture, *Eng. Fract. Mech.*, 23-1 (1986), 9.
- (4) Dally, J. W. and Shukla, A., Dynamic Crack Behavior at Initiation, *Mech. Res. Com.*, 6-4 (1979), 239.
- (5) Manogg, P., Schattenoptische Messung der Spezifischen Bruchenergie Während Des Bruchvorgangs bei Plexiglas, in *Proceedings, International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids*, Delft, The Netherlands, (1964), 481.
- (6) Kalthoff, J. F., ほか 3 名, Experimental Analysis of Dynamic Effects in Different Crack Arrest Test Specimens, *ASTM STP*, 711 (1980), 109.
- (7) Rosakis, A. J., Analysis of the Optical Method of Caustics for Dynamic Crack Propagation, *Eng. Fract. Mech.*, 13 (1980), 331.
- (8) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., Dynamic crack-tip stresses under stress wave loading—a comparison of theory and experiment, *Int. J. Fract.*, 20 (1982), 209.
- (9) Theocaris, P. S., Optical method of caustics in the study of dynamic problems of running cracks, *Opt. Eng.*, 21-4 (1982), 581.
- (10) Rosakis, A. J., ほか 2 名, The Determination of Dynamic Fracture Toughness of AISI 4340 Steel by the Shadow Spot Method, *J. Mech. Phys. Solids*, 32-4 (1984), 443.
- (11) Holloway, D. C., Application of holographic interferometry to stress wave and crack propagation problems, *Opt. Eng.*, 21-3 (1982), 468.
- (12) 鈴木・草鹿, パルスホログラフィ顕微鏡法を用いた高速進展中き裂先端部の撮影技術, 計測自動制御学会論文集, 22-10 (昭 61), 1094.
- (13) Achenbach, J. D. and Tolikas, P. K., Elastodynamic Effects on Crack Arrest, *ASTM STP*, 627 (1977), 59.
- (14) Cangleton, J. and Denton, B. K., Measurement of Fast Crack Growth in Metals and Nonmetals, 文献(13)の 336 ページ.

討 論

〔質問〕 吉 村 忍〔東京大学工学部〕

パルスホログラフィ法を用いて高速進展き裂の COD を計測するという非常に有意義な研究をなされたことに対し敬意を表す。以下の点についてご教示願いたい。

ここでは、線形材料への適用を述べておられるが、この手法は非線形材料へも拡張可能か。また、その場合、問題点があるとしたらどのような点かお聞かせ願いたい。

〔回答〕 パルスホログラフィ顕微鏡法による高速進展き裂の COD 計測を非線形材料へ拡張することは十分可能であり、特に、以下の三点に関して触れておきたい。

(1) 要求される解像力について： パルスホログラフィ顕微鏡法には、高速進展き裂先端付近での微小な COD を計測しうる高い解像力が要求される。非線形材料中を進展するき裂先端部には、線形材料中を進展するき裂に比べて、大きな塑性域が生じるため、き裂先端付近での COD は線形材料中のき裂のそれよりも大きくなる。したがって、パルスホログラフィ顕微鏡法に要求される解像力は、むしろ、緩和されるものと予想される。

(2) パルスレーザの発振をき裂発生と同期させる手法について： パルスホログラフィ用光源として

最も広く用いられているルビーレーザでは、レーザ媒質であるルビーロッドを励起するのに 800 μ s 前後の時間を要する。線形材料中ではき裂速度が速いため、き裂発生を検知してからルビーロッドを励起し始めたのでは、レーザ発振に必要なエネルギーを蓄える間にき裂はかなり長い距離進行してしまう（例えば、500 m/s で進行するき裂ではその距離は 40 cm にも達する）。これは、大形の試験片を用いて同期をとるか、き裂発生以前にルビーロッドの励起を開始できるよう工夫された同期手法を用いるかのいずれかであることを意味する。特に高強度金属材料に適用する場合には、同期手法が撮影の成否の鍵を握ることになる。それに対して非線形材料では一般にき裂速度は遅いため、同期手法に課せられる要求はかなり緩和されることになる。したがってレーザ発振をき裂発生に同期させることは、非線形材料では、かなり容易になるであろう。

(3) 試験片厚さの変化と照明方法について： 非線形材料では線形材料に比べて塑性変形が大きいので、き裂先端付近での板厚の減少が大きい。このことは、き裂を照明する際、照明光の入射方向に制限を加えるかもしれない。しかしこれはあまり本質的な問題ではない。光学系の設計の範囲内で十分解決できる問題である。