

パルスホログラフィー顕微鏡法を用いた
4340 鋼中高速進展き裂先端部の撮影*鈴木新一*¹, 布施壽則*²
中島卓郎*³, 草鹿履一郎*⁴Photographing of Fast Propagating Cracks in AISI 4340 Steel Specimens
by Means of Pulsed Holographic MicroscopyShinichi SUZUKI, Hisanori FUSE,
Takurou NAKAJIMA, and Riichiro KUSAKA

Pulsed holographic microscopy is applied to take instantaneous microscopic photographs of the neighborhoods of crack tips propagating through AISI 4340 steel specimens at a speed of about 300m/s. We use a holographic optical system with a Q-switched ruby laser which records scattered light from crack edges and from specimen surfaces as object light. A method for breaking the specimens is devised to synchronize the laser oscillation with the generation and propagation of a crack. Two microscopic photographs are obtained. From each photograph, the crack opening displacement (COD) is measured along the crack within 10 mm of the crack tip. The COD is of the order of ten to one hundred micrometers, and is proportional to the square root of the distance from the crack tip. Dynamic fracture toughness $K_{I\dot{D}}$ is calculated through the formula of COD in the singular stress field of a propagating crack.

Key Words: Fracture, Measurement, Pulsed Holographic Microscopy, COD, Dynamic Fracture Toughness

1. ま え が き

高強度鋼板が脆性破壊を起こす際、数百 m/s の速度で進行する高速進展き裂が生じることがある。この高速進展き裂の先端部の瞬間顕微鏡写真を得ることは高強度鋼板の動的破壊問題に興味深い知見をもたらすであろう（例えば、き裂に沿っての開口変位 COD, き裂先端開口変位 CTOD, 主き裂先端付近に発生する微小き裂など）^{(1)~(6)(9)(10)}。しかし、高速進展き裂先端部の瞬間顕微鏡写真を撮影することは、以下に示すいくつかの技術的困難を伴う。

(1) 破壊現象は本来偶発的であり、き裂発生時刻を正確に予測することができない。

(2) 撮影対象が高速で移動する（数百 m/s）。

(3) 撮影対象が微小である（数十 μm 程度）。

(4) 破壊の際に材料表面が振動するため、カメラの焦点を正確に合せることができない。

Zimmermann-Schonert⁽⁷⁾は顕微鏡とイメージコンバ

ータカメラとを用いて、PMMA 試験中の高速進展き裂の注意深い撮影をおこなった。それに対して、パルスホログラフィー顕微鏡法は、上記の技術的困難を根本的に解決し得る能力を持っている。鈴木らはパルスホログラフィー顕微鏡法を用いて PMMA 試験片中の高速進展き裂先端部の撮影を行った^{(8)~(10)}。本研究では、このパルスホログラフィー顕微鏡法を AISI 4340 鋼中の高速進展き裂に適用し、その先端部の瞬間顕微鏡写真を撮影する。これにより、パルスホログラフィー顕微鏡法が金属材料中の高速進展き裂にも適用できることを実証する。

パルスホログラフィー顕微鏡法を用いて高速進展き裂先端部の撮影を行う際には、レーザ発振をき裂の発生、進展に同期させる技術が重要な役割を果たす⁽⁸⁾。特に、4340 鋼のような高強度鋼板においては、同期技術が撮影の成否のかぎを握ることになる。PMMA 試験片においては、衝撃力による破壊の手法を用いてレーザ発振をき裂の発生、進展に同期させた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかしながら現在のところ、あらゆる材料に適用できる一般的な同期手法はない。本研究の一部は他の文献⁽¹⁰⁾にも掲載されているが、そこでは PMMA と 4340 鋼の両方の問題を取り扱ったために、簡潔性の観点から、4340 鋼中の高速進展き裂の撮影手法に関しては最小

* 平成元年 3 月 10 日 東海支部第 38 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 5 月 25 日。

*¹ 正員、豊橋技術科学エネルギー工学系 (〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

*² 豊橋技術科学大学大学院 [現在 島津製作所]。

*³ 豊橋技術科学大学大学院 [現在 石川島播磨重工業]。

*⁴ 豊橋技術科学大学エネルギー工学系。

表 1 試験片材料の成分分析値

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
Weight percent	0.38	0.26	0.71	0.016	0.004	1.84	0.85	0.26	0.036
	0.39			0.017	0.005		0.86	0.27	

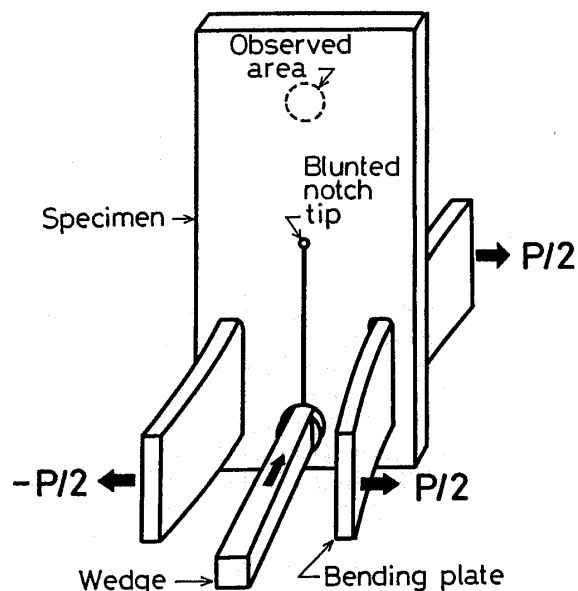
限の記述にとどめた。そのため、おもりを用いたき裂速度の制御、実際に用いられたホログラフィー光学系に関して記述されていない。前述のように、高速進展き裂の発生、進展に同期させてパルスレーザーを発振させる一般的な同期手法はなく、個々の材料の特徴を把握したうえで同期技術を考案しなければならない。このような現状では、個々の材料において考案された同期技術の積み重ねが重要であり、その意味において、4340 鋼中高速進展き裂撮影用に開発された同期技術および撮影手法に関する完全な報告が必要である。本報告はそれを目的とする。

2. 撮影手法

2.1 試験片および破壊手法 パルスレーザーの発振を高速進展き裂の発生、進展に同期させる技術は、試験片の材質、形状、大きさ、破壊手法と密接に関連している⁽⁶⁾。以下に示す試験片形状および破壊手法は後に示す同期手法との関連の中から考案、決定されたものである。

本研究で用いた 4340 鋼試験片とその破壊手法の概略を図 1 に示す。試験片は不透明であり、その表面は粗面である。試験片は縦 400 mm、横 220 mm、厚さ 12 mm であり、長さ 210 mm の切込みを持っている。4340 鋼は新日鐵第一技術研究所において造られたものである。材料は真空溶解の後、12 mm の厚さに圧延され、熱処理が行われる。熱処理は、まず 1113 K {840°C} で 30 min 間オーステナイト化され、油冷された後、478 K {205°C} で 1 h 間焼き戻され、空冷される。材料の硬さはロックウェル C スケールで 51 である。材料の化学成分分析結果を表 1 に示す。試験片はこの材料から切り出される。

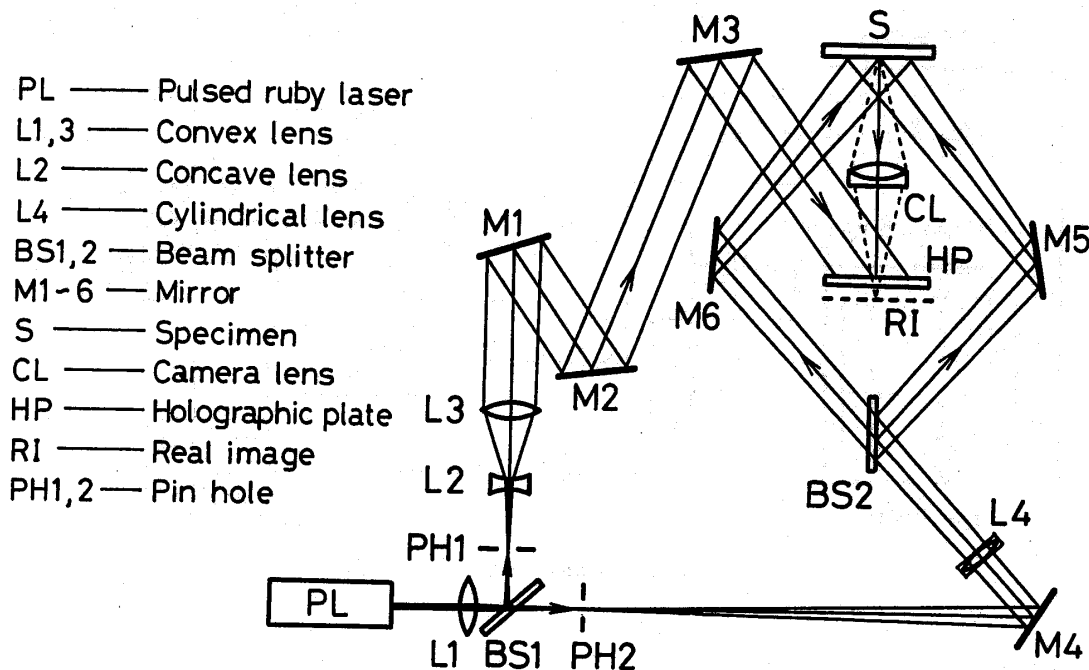
試験片の破壊は次の手順で行われる。2 枚の曲げ板 (360×96×17 mm) を通して試験片に引張力 P がかけられる。この曲げ板には、き裂を試験片端まで伝ばさせるのに十分なエネルギー (約 1 kJ) が蓄えられる。その張力 P は切込み先端にき裂を発生させるのに必要な張力の約 90% の大きさである。次に、くさびが試験片の中に押し込まれ、切込み先端部にき裂が発生する。そのき裂は、最初、比較的ゆっくり進行し、進展に伴って加速し、観測領域の中かその付近で最大の速度

図 1 4340 鋼試験片とその破壊手法⁽¹⁰⁾

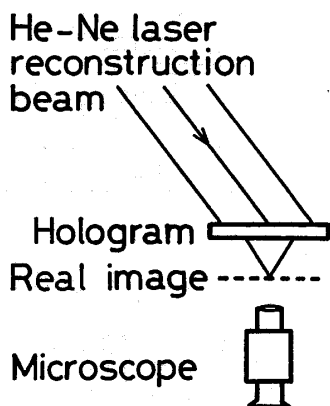
を持つ (約 300 m/s)。き裂が観測領域の中を進行している間に、以下に示すホログラフィー光学系を用いて、き裂のホログラフィー撮影が行われる。

2.2 ホログラフィー光学系⁽¹¹⁾ 高速進展き裂のホログラフィー撮影は、高速進展き裂のある一瞬をホログラムとして記録すること、そして、そのホログラムからき裂の実像を再生することの二つの段階から成る。

4340 鋼中高速進展き裂の記録に用いたパルスホログラフィー光学系を図 2 (a) に示す (平面図)。き裂は試験片中を紙面に垂直に伝ばする。き裂が観測領域の中を進行しているときに、パルスレーザーから一発のパルスレーザー光 (出力 20 mJ, パルス幅 30 ns) が発射される。そのレーザー光はビームスプリッター BS 1 で二つに分けられる。BS 1 で反射した光はレンズ L 2, L 3 を通過して平行光線となり、鏡 M 1, M 2, M 3 で反射した後、ホログラフィー乾板 HP に入射する。この光は参照光である。ビームスプリッター BS 1 を透過した光はビームスプリッター BS 2 で再び二つに分けられ、試験片表面を二つの別々の方向から照明する。その照明光は、き裂自身やき裂の回りに現れる塑性領域によって、拡散反射される。拡散反射された光の一部はレンズ CL を通過し、ホログラフィー乾板 HP に入



(a) 4340 鋼中高速進展き裂記録用ホログラフィー光学系



(b) 再生用光学系
図 2

射する。この光が物体光である。物体光はホログラフィー乾板の後ろに試験片の実像 RI を作る。試験片の実像は試験片そのものと同じ大きさに作られる。ホログラフィー乾板はこの実像をホログラムとして記録する。

ホログラフィー再生用光学系を図 2 (b) に示す。現像処理の後、ホログラムは He-Ne レーザ (波長 633 nm, 出力 15 mW) の平行光線で照明され、記録用光学系で記録された試験片表面の実像を再生する。この実像を顕微鏡拡大し、写真撮影を行う。これにより高速進展き裂の瞬間顕微鏡写真が得られる。詳細に関しては、文献(8)を参照されたい。

2.3 同期手法とき裂速度制御 き裂の発生、進

展とレーザ発振との同期手法およびき裂速度測定法を図 3 に示す。試験片表面には 7 本の導電性塗料が塗布されており、これらの導電性塗料が切断されるとききの信号を用いてき裂速度を測定する。切込み先端部で発生したき裂はまず導電性塗料 1 を切断する。このときの信号により、ルビーレーザ⁽¹²⁾内の Xe フラッシュランプが発光を開始し、約 1.5 ms の間発光を継続する。ルビーレーザがフラッシュランプの光を吸収し、レーザ発振に必要なエネルギーを蓄えるのに約 700 μ s の時間を要する。したがって、レーザ発振が可能なのは後半の 800 μ s である。き裂が観測領域内の導電性塗料 5 を切断したときの信号がルビーレーザの Q スイッチを起動し、レーザ発振が起こる。前述したホログラフィー光学系を用いて高速進展き裂先端部をホログラムとして記録する。破壊装置の曲げ板の形状と試験片長さは、き裂が導電性塗料 1 を切断してから導電性塗料 5 を切断するまでの時間が 500~1500 μ s となるように、決定された。また、試験片の切込み先端と観測領域との間、かつ、き裂経路の両側におもりを取付け(図 5)、き裂進展速度の制御を行った。

本研究で用いた試験片中を伝ばするき裂の速度と切込み先端から測ったき裂長さとの関係を図 4 に示す。図 4 (a) は試験片におもりを取付けない場合のき裂速度とき裂長さとの関係を示している。き裂速度はき裂の進展に伴って増加し、き裂長さが 120 mm の所で最大に達し、その後減少する。図 4 (b) はき裂経路の両

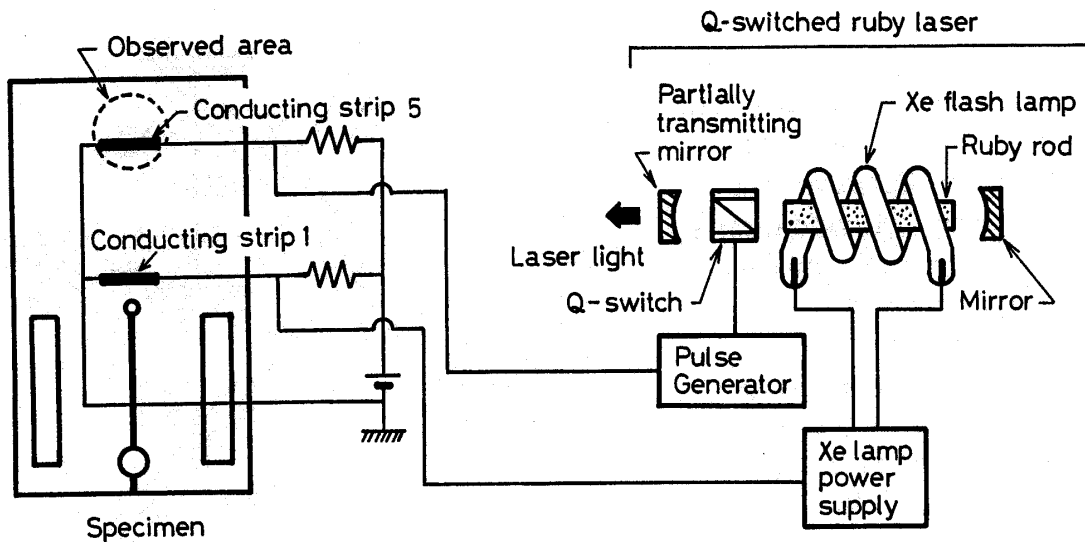


図3 き裂の発生、進展とレーザ発振との同期手法

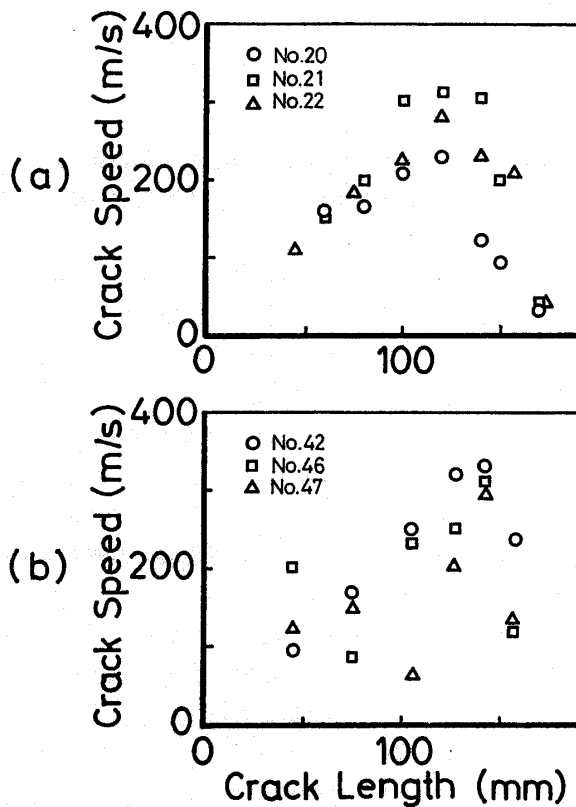


図4 き裂長さとき裂速度との関係

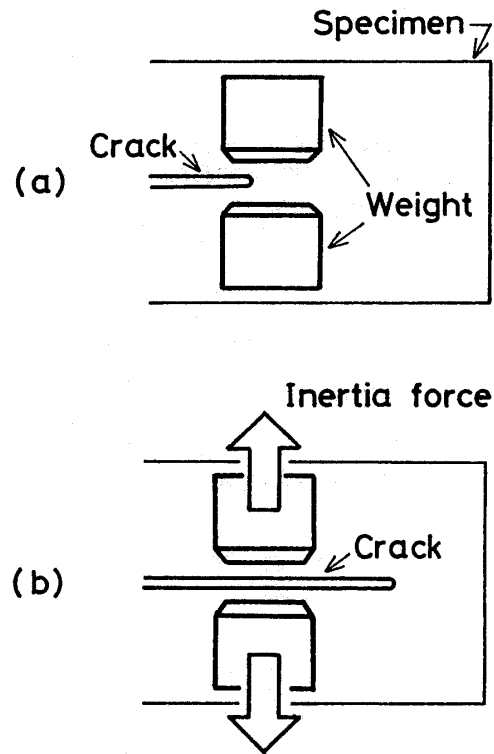


図5 試験片表面に取付けたおもりがき裂進展に及ぼす影響

側に、それぞれ、4.76 kgのおもりを取付けたときのき裂速度を示している。き裂速度が最大に達する位置はき裂長さが140 mmの所であり、おもりのない場合と比較して20 mm長くなっている。また、最大速度に達する前に、一度、き裂速度が減少することがある(No.46, 47)。おもりを付けた場合、多数の試験片の平均としては、最大速度に達する前のき裂速度はおもり

のない場合に比べて小さくなっている。

これらの現象は次のように理解される(図5)。き裂の進展に伴って試験片中のひずみエネルギーは破壊に消費されると同時に、余分なひずみエネルギーが試験片の運動エネルギーに変換される⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。ひずみエネルギーがなくなってしまった後は運動エネルギーがき裂の進展に寄与する。おもりを取付けた場合も取付けた

い場合も、初めに蓄えられるひずみエネルギーは同じである。おもりを取付けた場合、余分なエネルギーは試験片とおもりの運動エネルギーになる。そのため、おもりを付けない場合と比べて試験片が持つ運動エネルギーは減少する。すなわち、き裂がおもりのある所を通過するときには、おもりの慣性が試験片の動きを制限することになる。その結果、き裂速度は減少する。それに対してき裂がおもりのある所を通過した後は、おもりが持つ運動エネルギーがき裂進展に使用される。すなわち、おもりの慣性力がき裂を開くように作用し、き裂速度は増加することになる。

上記の現象は、き裂が観測領域に進入するのに同期させてパルスレーザを発振させるうえで、有用である。前述したように、レーザ発振に必要なエネルギーをルビーロッド内に蓄えるのに 700 μ s 前後の時間を要する。したがって、き裂が発生してからルビーロッドの励起を開始する手法では、き裂が観測領域に到達するまでに 700 μ s 以上の時間をかけて比較的ゆっくり進行し、観測領域の手前で急激に加速する必要がある。また、き裂の観測領域を切込み先端から極力遠い所に設ける必要がある。おもりを試験片に付加してき裂速度を制御する方法は、これをある程度可能にするものである。本研究においては、おもりを用いたき裂速度の制御は非常に有効であった。以下に示す二つのき裂の顕微鏡写真は、この手法を用いて、切込み先端から 140 mm の位置で撮影されたものである。

3. 結果と検討

3.1 4340 鋼中高速進展き裂先端部 パルスホログラフィー顕微鏡法を用いて撮影された AISI 4340 鋼中高速進展き裂先端部の瞬間顕微鏡写真を図 6 に示す。き裂りょうが明るく写っている。No.47 のき裂は進展の途中でき裂経路を大きく変えている。これは試験片表面近くのシアリップのでき方が変化したためである。すなわち、図 6 (b) に示すように、シアリップのできる角度が (i) から (ii) へ変化したためである。

これらの写真からき裂開口部変位 (COD) を、き裂先端からの距離の関数として、測定することができる。No.47 の写真の上部において、左側のき裂りょうと平行に、明るい帯状の領域が存在する。これはき裂開口部の一部分が明るく写っているものである。図 6 (c) に示すように試験片表面は二つの照明光で照明される。COD は a-c 間である。照明光 2 はき裂のシアリップと平行に近い角度で入射するため、き裂新生面から強い散乱光が反射してくることはない。それに対して照明光 1 は b-c 間のき裂新生面を明るく照明する。そ

のため、b-c 間から強い散乱光が反射されてくることがあり、b-c 間のき裂新生面が明るく写ることになる。このことは、a-b 間を COD とみなすという間違いを起こす可能性がある。しかしながら b-c 間からの散乱光に比べ、き裂りょう a と c からの散乱光強度は一般に大きい。したがって注意深い写真撮影により、き裂りょうを識別できる写真を得ることができる。上記のことは、静止き裂の観察と写真撮影によっても確認された。

き裂先端の位置は、左右のき裂りょうが連結する位置として、写真上で決定される。き裂先端付近に、明るい微細なしま模様が見れている。この微細模様はき裂先端付近の塑性変形領域による複雑な光散乱によるものである。No.46 のき裂では、写真上でき裂先端の位置を決定することは可能であるが、No.47 のき裂では、この微細模様がき裂先端位置の正確な決定を妨げており、約 300 μ m のあいまいさを生じている。本研究では図 2 (a) に示すようなホログラフィー光学系を用いてき裂の撮影を行ったが、き裂の照明方法を改良すれば、き裂先端位置の正確な決定および COD のより正確な測定が可能になるであろう。

3.2 き裂開口変位と動的破壊靱性値 図 6 の写真から測定された COD をき裂先端からの距離 r の関数として図 7 に示す。No.46 の場合、 $r > 5$ mm, $r < 0.5$ mm の領域で、COD が \sqrt{r} からわずかに外れているが、No.46, 47 両方において、測定領域内で COD が \sqrt{r} に比例していることがわかる。これは測定領域内で $1/\sqrt{r}$ 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。特に No.47 において、シアリップの変化によるき裂経路の大きな変化が生じているが、そのようなき裂経路の変化があっても、COD は同一の \sqrt{r} に従うことがわかる。

高速進展き裂の COD 計測から、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⁽⁹⁾。モード I 形高速進展き裂先端部の COD は、線形破壊力学から、次式で与えられる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

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

ここで、

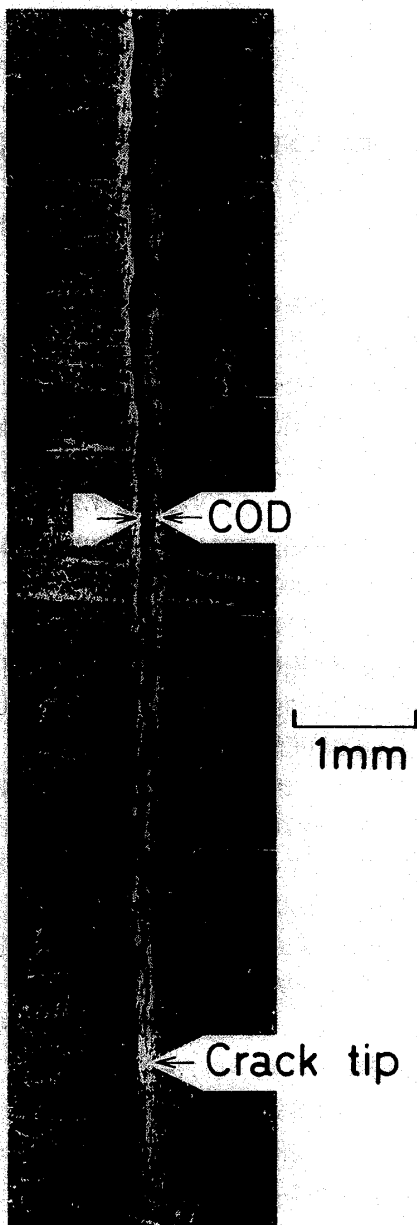
$$L(v) = \frac{2\alpha_1(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)}{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}$$

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

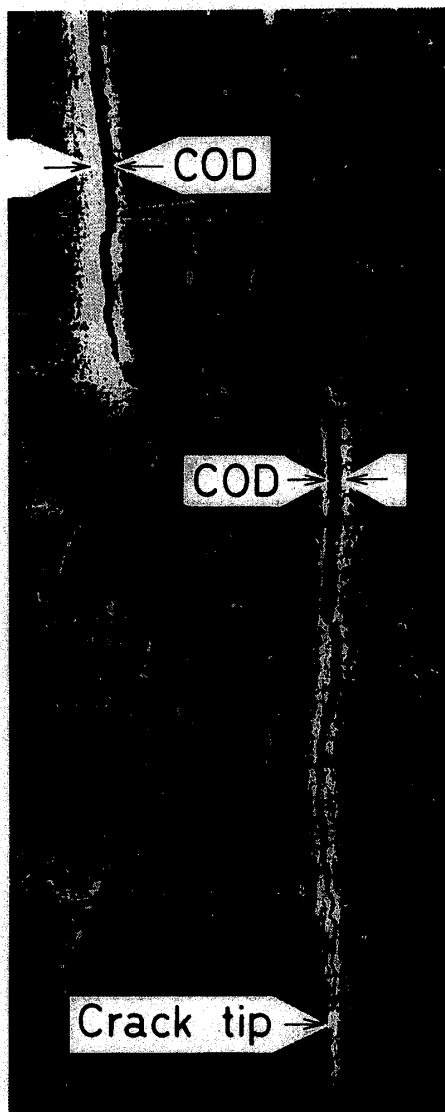
$$c_1 = \sqrt{\frac{2G(1 - \nu_1)}{\rho(1 - 2\nu_1)}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

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

No.46 V=310m/s



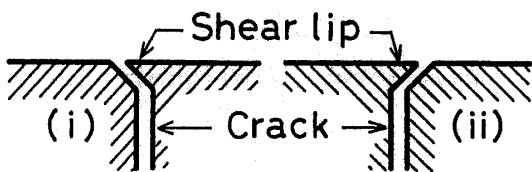
No.47 V=300m/s



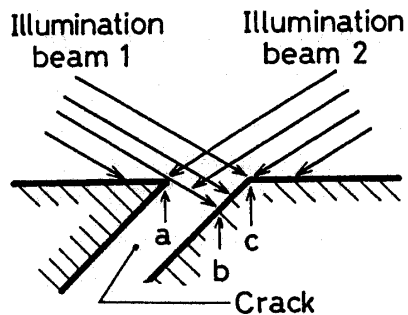
(a-1)

(a-2)

(a) AISI 4340 鋼中高速進展き裂ホログラフィー再生像の顕微鏡写真⁽¹⁰⁾



(b) 試験片断面図 (き裂は紙面に垂直に伝ばする)



(c) き裂開口部の照明 (試験片断面図) (図中 a-c 間がき裂の COD である)

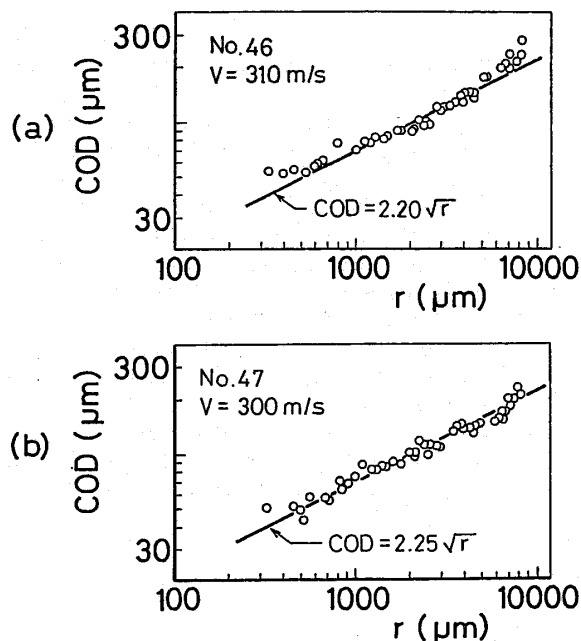


図7 4340鋼中高速進展き裂の開口変位 COD⁽¹⁰⁾
(CODは $0.5 < r < 5\text{mm}$ の範囲内で \sqrt{r} に比例する)

v : き裂速度, G : 横弾性係数, ρ : 密度

ν : ポアソン比, $K_1(v)$: 動的応力拡大係数

である。係数 $L(v)$ はき裂の動的効果を表す係数である。したがって、パルスホログラフィー顕微鏡法を用いてき裂先端からの距離 r の関数として COD を測定し、同時にき裂速度をも測定すれば、上式を用いて動的応力拡大係数を求めることができる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。進展き裂に関して、動的応力拡大係数と動的破壊靱性値とが等しいと仮定すれば、上記の計算により動的破壊靱性値 K_{ID} を知るようになる。得られた K_{ID} 値は、No.46 において $158 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、No.47 において $161 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。これらの値はコウスティック法^{(16)~(18)}を用いて Rosakis ら⁽¹⁹⁾によって求められた値の 2.3 倍の値である。この違いの原因として、材料製造工程の違い、き裂先端付近での塑性変形が COD に及ぼす影響、試験片形状の違い、 K_{ID} 測定時でのき裂長さの違い、き裂と応力波との相互作用、などが考えられる〔詳しい議論は文献(10)参照〕。しかし現在のところ、なぜこのように大きな K_{ID} 値が得られたのか明確な説明を与えることができない。これは今後に残された課題である。

4. 結 論

上記のように、パルスホログラフィー顕微鏡法を用いることにより、金属材料中高速進展き裂先端部の瞬

間顕微鏡写真を撮影することができる。撮影された写真から、き裂先端付近の COD をき裂先端からの距離の関数として測定することができ、それにより、動的破壊靱性値を知ることができる。しかしながら、本研究で得られた 4340 鋼の K_{ID} 値が Rosakis らによってコウスティック法を用いて測定された値よりもかなり大きいことは、今後に残された課題である。パルスホログラフィー顕微鏡法とコウスティック法とによる K_{ID} の同時計測⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾はこの問題の解決に有力な手がかりを与えてくれるであろう。

非線形材料にパルスホログラフィー顕微鏡法を適用する場合、COD 測定から K_{ID} 値を求めるよりも、き裂先端開口変位 (CTOD) を測定することのほうがより有意義であると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。現在のところ、き裂先端付近の塑性変形領域による複雑な光散乱がき裂先端位置や CTOD の正確な決定を妨げているが、これは試験片の照明方法の改良で十分解決できるものと予想される。パルスホログラフィー顕微鏡による高速進展き裂の CTOD の測定は非線形材料に関する重要な知見をもたらすであろう。それと同時に CTOD 測定は、パルスホログラフィー顕微鏡法が動的破壊力学における新しい計測手法として確立していくうえでの一つの到達目標ともなってくる。

本研究を進めるに当たり、本間寛臣教授(本学)との討論は非常に有益であった。破壊装置の油圧駆動部の設計においては日比昭教授(本学)から助言をいただいた。また、本学大学院生、故本田和人君、鈴木修一君(現本田技研)、内田義信君の多大な協力を得た。さらに、研究の実施において、新日鐵第一研究所から AISI 4340 鋼試験片の提供を受けた。ここに感謝する。

文 献

- (1) 國尾・ほか 11 名, (國尾・ほか 3 名編) 破壊力学実験法 (1984), 86 朝倉書店。
- (2) Shih, C. F., Relationships between the J-Integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks, *J. Mech. Phys. Solid*, 29-4 (1981), 305.
- (3) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: I. Crack Initiation and Arrest, *Int. J. Fract.* 25 (1984), 247.
- (4) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: II. Microstructural Aspects, *Int. J. Fract.* 26 (1984), 65.
- (5) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: III. On Steady-State Crack Propagation and Crack Branching, *Int. J. Fract.* 26 (1984), 141.
- (6) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G., An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: IV. On the Interaction of Stress Waves with Propagating Cracks, *Int.*

- J. Fract.* 26 (1984), 189.
- (7) Zimmermann, C. and Schönert, K., Microscopic Observation of the Tips of Fast Running Cracks in PMMA, *J. Mech. Phys. Solids*, 34-3 (1986), 319.
- (8) 鈴木・草鹿, パルスホログラフィー顕微鏡法を用いた高速進展き裂先端部の撮影技術, 計測自動制御学会論文集, 22-10 (1986), 1094.
- (9) 鈴木・ほか3名, 動的破壊靱性値の新しい計測法(パルスホログラフィー顕微鏡法を用いた高速進展き裂のCOD計測), 機論, 54-500, A (1988), 762.
- (10) 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.
- (11) Smith, H. M., *Principles of Holography*, 2nd ed., (1975), 13, John Wiley and Sons.
- (12) Yariv, A., *Optical Electronics*, 3rd Ed., (1985), 198, Holt, Rinehart and Winston.
- (13) Hahn, G. T., ほか5名, Crack Arrest Concepts and Applications, *Proc. 10th Symp. Naval Struct. Mecha.* (Washington), (1978), 205.
- (14) 青木, 動破壊力学と動的破壊じん性, 材料, 33-365 (1984), 229.
- (15) Achenbach, J. D. and Tolikas, P. K., Elastodynamic Effects on Crack Arrest, *ASTM Spec. Tech. Publ.* 627 (1977), 59.
- (16) Manogg, P., Schattenoptische Messung der Spezifischen Bruchenergie Während des Bruchvorgangs bei Plexiglas, *Proc. Int. Conf. Phys-Non-Crystalline Solids*, Delft, The Netherlands, (1964), 481.
- (17) Beinert, J., ほか2名, Neuere Ergebnisse zur Anwendung des Schattenfleckverfahrens auf stehende und schnell-laufende Brüche, *Proc. 6th Int. Conf. Exp. Stress Anal., VDI-Rep.* No. 313 (1978), 791.
- (18) Rosakis, A. J., Analysis of the Optical Method of Caustics for Dynamic Crack Propagation, *Eng. Fract. Mech.*, 13 (1980), 331.
- (19) 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.