

高速進展開始直後における き裂先端応力場に現れる高次項の影響について*

(光干渉法による測定)

鈴木新一^{*1}, 宮崎文嘉^{*2}, 野崎康則^{*3}

Effect of Higher Order Terms on Near-Tip Field of Cracks Immediately after Beginning of Rapid Propagation (Measurement by Interferometry)

Shinichi SUZUKI, Fumiyoshi MIYAZAKI and Yasunori NOZAKI

A method of interferometry is applied to study the near-tip field of cracks which are propagating in PMMA specimens at a speed of about 550 m/s. The interference fringes around the cracks are photographed with a holographic optical system at 18 μ s or at 73 μ s after the crack initiation. The interference fringes are measured and analyzed in the directions of ± 72 degrees from the propagation direction of the crack in order to compare the measurement results obtained through interferometry with those through the caustic method. It is found that the effect of higher order terms appears in the near-tip field at 18 μ s after the crack initiation, but disappears at 73 μ s, and the singular field is developed as far as 9 mm from the tip. Consequently, it can be concluded that, in the directions of ± 72 degrees from the propagation direction, the effect of higher order terms appears within several tens of microseconds after the beginning of rapid crack propagation where crack speed is more than a few hundred m/s. These results are in good agreement with those obtained through the caustic method.

Key Words: Fracture Mechanics, Brittle Fracture, Impact Strength, Fracture Toughness, Crack Propagation, Material Testing, Interferometry, Caustic Method

1. ま え が き

高速進展き裂の動的応力拡大係数の測定は、主に光学的手法を用いて行われてきた。なかでもコースティック法⁽¹⁾は、他の光学的手法に比べて光学系が単純である利点を有しており、動的応力拡大係数の測定において中心的役割を果たしてきた。

しかし近年、以下に示すような場合には、コースティック法が正しい K 値を示さないのではないかとこの疑問が出されている^{(2)~(8)}。

(1) 静止き裂が極めて短い時間 [μ s] に衝撃的な荷重を受ける場合。

(2) き裂が数百 m/s 以上の高速で進展を開始した直後。

(3) き裂が大きな加速度を持つ場合。

コースティック法はき裂先端付近に特異平面応力場が成立していることを仮定している。しかし上記の場合においては、特異平面応力場が十分には発達しておら

ず、コースティック法が真の K 値を与えないのではないかと考えられている。

この問題に関しては、これまでいくつかの研究がなされている。Ma-Freund⁽²⁾は、き裂先端周辺に特異平面応力場が十分発達するにはある有限の時間が必要であることを理論的に示した。また青木ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾はコースティック法の数値シミュレーションにより、上記の理論結果を支持する結果を得た。これらの結果は、上記の三つの場合においては、特異平面応力場が厳密には成り立っておらず、応力場の高次項成分の影響がき裂先端付近にまで及んでいることを示唆している。さらに Freund-Rosakis⁽⁴⁾は、動的き裂先端付近の応力場を記述する新しい高次項理論を作り、それを高速進展開始直後のき裂の問題に適用した。その結果、高速進展開始直後のき裂においては、高次項成分の影響を無視できないことを示した。

上記のことを考慮した上で著者らは、高速進展開始直後のき裂先端応力場に現れる高次項成分の問題を取り上げ、パルスホログラフィ顕微鏡法とホログラフィ・コースティック法を用いた実験的研究を行った⁽⁹⁾。そして次のような結果を得た。

(1) 高速進展開始から 18 μ s の時刻では、コースティック法を用いた動的応力拡大係数の測定に、高次

* 原稿受付 1994年12月22日。

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

^{*2} 准員, トヨタ名古屋整備学園 (〒452 愛知県西春日井郡春日町落合一番割)。

^{*3} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院。

項成分の影響が強く現れる。

(2) しかし、高速進展開始から 73 μs の時刻では高次項成分の影響はなく、コースティック法は正しい K 値を与える。

問題の重要性を考えると、上記の実験結果を、コースティック法以外の手法を用いて確認することが必要である。本研究は、コースティック法に現れた高次項成分の影響を、光干渉法⁽¹⁰⁾を用いて測定しようとするものである。測定時刻は、上と同様に、き裂進展開始から 18 μs 後と 73 μs 後である。またコースティック法との比較のために、き裂進行方向から 72 度の方向で干渉じま測定を行う。その結果、光干渉法による測定は、コースティック法による測定結果と一致することが示される。

干渉じまの撮影は、文献(9)においてき裂開口変位(COD)測定のために撮影されたき裂のホログラムから、干渉じまを再生することにより行われる。すなわち本論文では、文献(9)に報告されたき裂の応力場を、光干渉法を用いて測定する。その意味で本論文は、文献(9)と対を成すものである。

2. 試験片

本研究で用いられた試験片を図1に示す。試験片は 250×190×3 mm の PMMA 平板であり、長さ 70 mm の切欠きを有する。き裂は切欠先端で発生し、約 550 m/s の一定速度で進展する。き裂の干渉じまは、き裂先端が切欠先端から 10 mm の所(観測領域 A)または、40 mm の所(観測領域 B)を通過したときに撮影される。したがって、き裂が進展を開始してから撮影を行うまでの時間は、観測領域 A では 18 μs、観測領域 B では 73 μs である。撮影された干渉じまからき裂先端周辺の応力場を求める。

高速き裂の発生、進展時には、き裂面に直角方向に

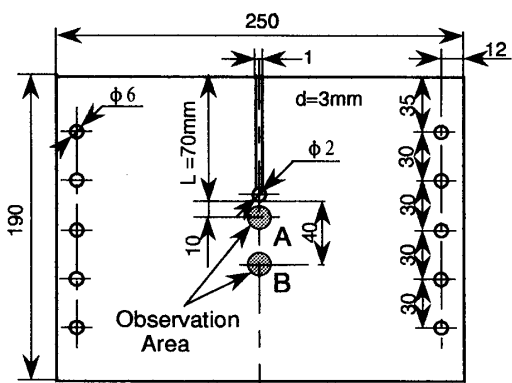


図1 PMMA 試験片

強い応力波(縦波)が発生する。この応力波は試験片端面で反射した後、き裂に向かって戻ってくる。本研究では、この応力波がき裂に衝突する前に観測が終了するように十分な試験片を用いている。その意味で、試験片は無限平板とみなすことができる。

3. 光干渉法による応力場測定の原理⁽¹⁰⁾

光干渉法の原理を図2に示す。き裂は透明試験片中を紙面に垂直な方向に進行する。試験片表面に、レーザからの平行光線を入射する。入射した光は、二つの試験片表面 A, B でそれぞれ反射される。二つの反射光 E_A, E_B は互いに干渉し、干渉じまを形成する(図3参照)。この干渉じまに沿って、試験片の板厚と屈折率は一定である。PMMA のような光学的等方性媒質の場合、干渉じまのしま次数 m は主応力和 ($\sigma_x + \sigma_y$) のみに依存し、

$$m = 2 \frac{d_0}{\lambda_0} \frac{A - \nu n_0}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる(図4参照)。ここで、 d_0 と n_0 は応力が零の状態での試験片の板厚と屈折率、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 λ_0 は真空中の光の波長、 A/E は応力光係数である。したがって干渉じま m を測定することにより、主応力和 ($\sigma_x + \sigma_y$) を知ることができる。

高速進展き裂先端部に現れる特異平面応力場では、主応力和は次式で与えられる。

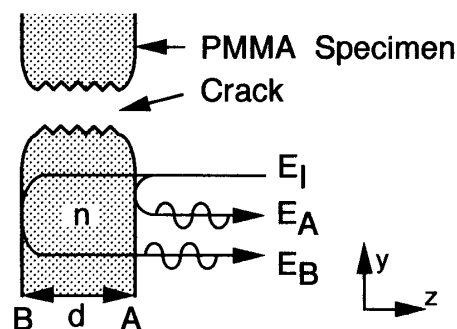


図2 光干渉法の原理

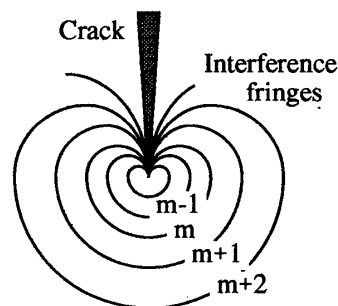


図3 き裂周辺の干渉じまの模式図

$$\sigma_x + \sigma_y = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{K_I(v)}{\sqrt{r}} \cos \frac{\theta_1}{2} \times F(v)(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)f_1(\theta) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$$\tan \theta_1 = \alpha_1 \tan \theta$$

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

$$\alpha_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_1}\right)^2}, \alpha_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_2}\right)^2}$$

$$f_1(\theta) = \left[1 - \left(\frac{v}{c_1}\right)^2 \sin^2 \theta\right]^{-1/4}$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{2G_1(1-\nu_1)}{\rho(1-2\nu_1)}}, c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\nu_1 = \frac{\nu}{1+\nu}$$

ρ : 密度

G : 横弾性係数

v : き裂速度

ν : ポアソン比

したがって、特異平面応力場内で干渉じまのしま次数 m を知ることができれば、式(1), (2)より、き裂の動的応力拡大係数 $K_I(v)$ を求めることができる。しかし一般に、干渉じまのしま次数 m を決定することは不可能であり、しま次数の微係数 $\partial m/\partial r$ から $K_I(v)$ を求める。すなわち、

$$K_I(v) = -\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\lambda_0}{d_0} \frac{E}{A - \nu n_0} r^{3/2} \frac{\partial m}{\partial r} \times \left[\cos \frac{\theta_1}{2} F(v)(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)f_1(\theta) \right]^{-1} \dots\dots\dots(3)$$

干渉じまの測定を特異平面応力場が成立している領域中で行えば、式(3)は真の K 値を与える。したがって、特異平面応力場中で $\partial m/\partial r$ を測定する限り、式(3)は、 r や θ によらず一定の K 値を与える。それに対して $\partial m/\partial r$ を、応力場の高次項の影響が現れる領域で測定した場合には、式(3)で与えられる K 値は一定値を示さず、 r や θ に依存することになる。このことを逆に利用すれば、き裂先端周辺で特異平面応力場が成立しているか否かを判定することができる。すなわち、

(1) き裂先端からの距離 r を変えながら $\partial m/\partial r$ を測定し、式(3)から K 値を求める。

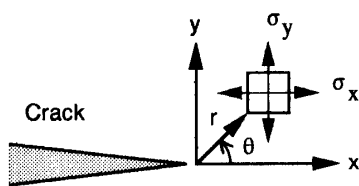


図4 き裂、座標系、応力場

(2) 得られた K 値が r, θ によらず一定値を示す領域では、特異平面応力場が成立している。

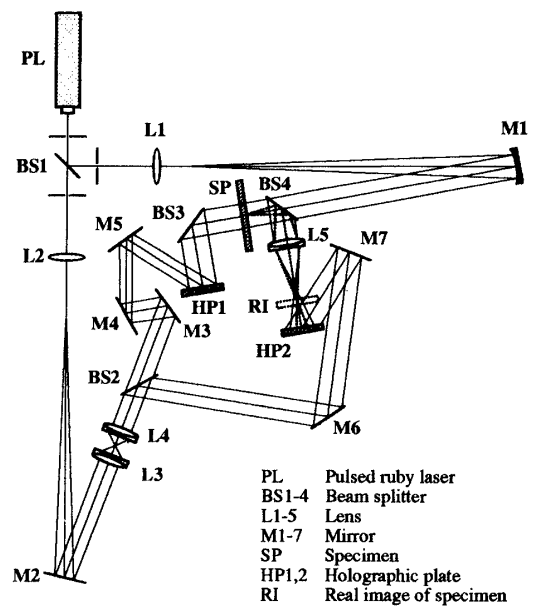
(3) しかし得られた K 値が一定値を示さず r, θ に依存する領域では、高次項の影響が現れていると言える。

このように、光干渉法を用いることにより、き裂先端周辺に特異平面応力場が成立しているか否かを知ることができる。

4. 測定方法

干渉じまの撮影に用いたホログラフィ光学系を図5に示す。き裂は試験片 SP 中を紙面に垂直に進行する。き裂が観測領域 A または B を進行しているときに、パルスレーザー PL を発振させる。パルスレーザー光は、ビームスプリッタ BS1 で二つに分けられる。BS1 で反射した光は平行光線になり、ビームスプリッタ BS4 を透過して試験片表面に垂直に入射する。試験片の表面と裏面で反射した光は互いに干渉し、干渉じまを作る。試験片で反射した光は、ビームスプリッタ BS4 で反射し、レンズ L5 を通過してホログラフィ乾板 HP2 に入射する。これが干渉じまをホログラフィ記録するときの物体光である。レンズ L5 はき裂と干渉じまの実像 RI を HP2 の手前に形成する。この物体光は、COD 測定用の物体光と全く同じものである⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。したがってホログラム HP2 からは、き裂の COD と干渉じまの両方を再生できる。

試験片を透過した光はコースティック光となり、ホログラフィ乾板 HP1 に入射する。これはコースティ



- PL Pulsed ruby laser
- BS1-4 Beam splitter
- L1-5 Lens
- M1-7 Mirror
- SP Specimen
- HP1,2 Holographic plate
- RI Real image of specimen

図5 ホログラフィ記録用光学系

ック光のホログラフィ記録における物体光である。

ビームスプリッタ BS 1 を透過した光は平行光線になり、ビームスプリッタ BS 2 で二つに分けられた後、ホログラフィ乾板 HP 1, HP 2 にそれぞれ入射する。これらが参照光である。このようにして、ホログラフィ乾板 HP 2 にはき裂の COD と干渉じまが、HP 1 にはコースティック光が、同時にホログラフィ記録される。

干渉じまの再生方法を図 6 に示す。現像処理の後、ホログラム HP 2 を c.w. He-Ne レーザで照明し、き裂の実像と干渉じまを再生する。再生された干渉じまを、通常のカメラで写真撮影する。このとき、カメラの代わりに顕微鏡を用いて撮影すれば、COD 測定が可能な高倍率の写真が得られる。COD 測定とコースティック光の再生方法は、文献(9)を参照されたい。

図 5 の光学系は、元々は、高速進展き裂の COD とコースティックの同時測定用に開発された光学系である⁽⁹⁾。しかし上記のように、COD 測定用のホログラムからはき裂先端周辺の干渉じまをも再生することができる。したがってこの光学系は、COD 測定、干渉法に

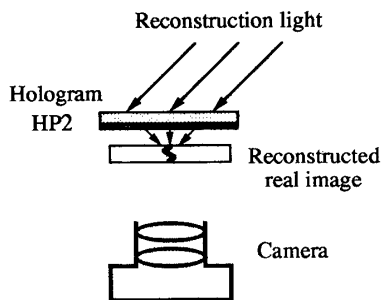


図 6 干渉じま再生・撮影用光学系

よる応力場測定、コースティック法による K 値の測定の三つの測定を同時に行うことができる光学系である。

5. 結果と検討

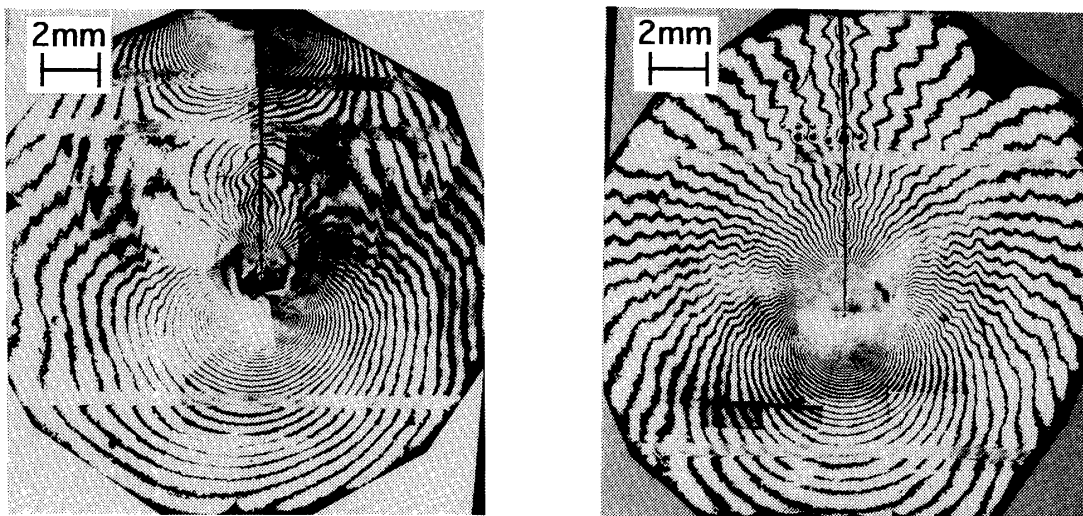
5.1 干渉じま写真 上記の手順で撮影された干渉じまの写真を図 7 に示す。(a)は、き裂進展開始から $18 \mu\text{s}$ 後に観測領域 A で記録されたき裂であり、(b)は $73 \mu\text{s}$ 後に観測領域 B で記録されたものである。き裂速度は約 550 m/s である。き裂の周りに干渉じまが現れている。前述のように、これらの写真からしま次数 m を決定することはできない。したがって、 $\partial m/\partial r$ から K 値を求める。

図 7 の写真の干渉じまには、き裂先端を中心とした円形の乱れが現れている。これはき裂先端から放出されたレーリー波である。このレーリー波は、 K 値の測定に誤差をもたらす。レーリー波による測定値のばらつきを小さくするために、連続する五つの測定点、

$$(m_{i-2}, r_{i-2}) \sim (m_{i+2}, r_{i+2}); i \text{ は整数}$$

を二次曲線で近似し、それを微分することにより $\partial m/\partial r$ を求める⁽¹⁰⁾。

コースティック法は、き裂の進行方向から ± 72 度の方向 ($\theta = \pm 72^\circ$) の応力場を測定する手法である⁽¹¹⁾⁽⁹⁾。それに対して光干渉法は、 $\partial m/\partial r$ が精度良く求められる限りすべての位置で、式(3)から $K_I(v)$ を計算できる特長を持つ。しかし本研究では、コースティック法によって調べられた高次項成分の影響を、光干渉法を用いて検証することを目的としている。したがってここでは、 $\theta = \pm 72$ 度の方向で $\partial m/\partial r$ を測定し、式(3)



(a) き裂進展開始後 $18 \mu\text{s}$

(b) き裂進展開始後 $73 \mu\text{s}$

図 7 高速進展き裂周辺の干渉じま写真

から $K_I(r)$ を r の関数として求める。

図7に示された写真は、文献(9)の中で報告されたCOD測定において記録されたホログラムから、干渉計測定のために再生、撮影されたものである。したがって、文献(9)の中で測定されたコースティック法の結果と直接比較することができる。

5・2 K_I-r 上記の手順で得られた結果を図8(a), (b)に示す。横軸はき裂先端からの距離 r , 縦軸は干渉法またはコースティック法により得られた K 値をCOD測定から得られた K 値で規格化したものである。COD測定から得られる K 値は、 r に依らず一定の値を示すため、COD測定から得られる K 値を真の K 値とみなすことができる⁽⁹⁾。したがってここでは、COD測定から得られた K 値を用いて縦軸を規格化している。

図中の記号、 \odot , \diamond , \triangle 印は $\theta=+72$ 度方向、 \bullet , \blacklozenge , \blacktriangle 印は $\theta=-72$ 度方向の応力場を干渉法で測定した結果である。また、 \circ , \diamond , \triangle 印はコースティック法から得られた K 値であり、文献(9)の中で報告されたものである。

(a)はき裂進展開始から $18\mu\text{s}$ 後の結果である。干渉法から得られた K 値とコースティック法から得られた K 値は、互いによく一致している。 $r < 1.5\text{ mm}$ の領域では、得られた K 値は、真の K 値よりも小さい。これは、き裂先端近傍に現れる三次元応力場の影響である⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。この範囲では平面応力条件が成り立っていないため、式(2)が成立していない。そのため、式(3)を用いて得られた K 値は真の K 値より小さい値を示している。 $1.5\text{ mm} < r < 4\text{ mm}$ の範囲では、干渉計測定から得られた K 値は、COD測定から得られた真の K 値にデータのばらつきの範囲内で一致している。しかし $r > 4\text{ mm}$ の領域では、干渉法で得られた

K 値は一定値を示していない。この領域では、干渉法から得られた K 値は、 r が増加するにつれて増加し、COD測定から得られた真の K 値よりも大きな値を示している。これは応力場の高次項成分の影響が現れているためと考えられる。コースティック法から得られた K 値の増加は、干渉法から得られた K 値の増加とよく一致している。このことから、高速進展開始から $18\mu\text{s}$ 後におけるき裂先端周辺の応力場には、高次項成分の影響が強く現れることがわかる。

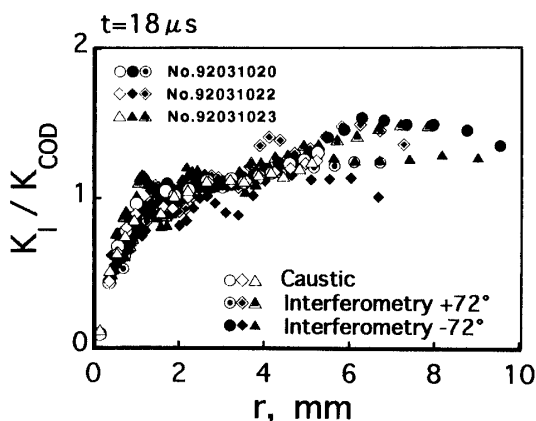
図8(b)は、高速進展開始から $73\mu\text{s}$ 後における測定結果である。(a)の場合と同様に、光干渉法から得られた K 値とコースティック法から得られた K 値とは、互いによく一致している。この時刻においては、 $1.5\text{ mm} < r < 9\text{ mm}$ の領域で、干渉法とコースティック法から得られた K 値は一定値を示している。またその値は、COD測定から得られた K 値と一致している。このことから、 $t=73\mu\text{s}$ においては、き裂先端からの距離 r が 1.5 mm から 9 mm の範囲で、応力場の高次項成分の影響が現れておらず、特異平面応力場が成立していることがわかる。

$r < 1.5\text{ mm}$ の領域で、干渉法で得られた K 値が真の K 値よりも小さな値を示しているのは、(a)の場合と同様に、三次元応力場の影響である。

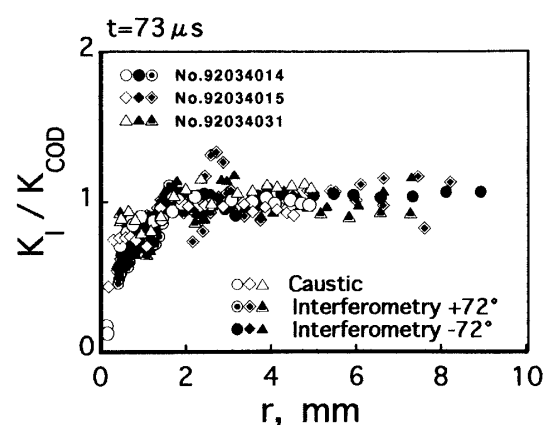
6. 結 論

高速進展開始直後のき裂先端応力場に現れる高次項成分の影響を光干渉法を用いて測定し、以下の結論を得た。

(1) 光干渉法を用いて、き裂進展方向から ± 72 度の方向で応力場に現れる高次項成分の影響を測定した結果は、コースティック法の測定結果とよく一致する。



(a) き裂進展開始後 $18\mu\text{s}$



(b) き裂進展開始後 $73\mu\text{s}$

図8 干渉法とコースティック法から求めた K_I 値

(2) 光干渉法を用いた測定においても、き裂進展開始から 18 μs の時刻において、応力場の高次項成分の影響が現れる。しかし 73 μs では、その影響はない。本研究は、文部省科学研究費、一般研究(C)[課題番号 05650079] の補助を受けた。ここに感謝する。

文 献

- (1) Kalthoff, J. F. (Kobayashi, A. S. 編, *Handbook on Experimental Mechanics*, (1987), 430, Society for Experimental Mechanics Inc.
- (2) Ma, C. C. and Freund, L. B., *J. Appl. Mech.*, **53** (1986), 303.
- (3) Tippur, H. V., Krishnaswamy, S. and Rosakis, A. J., *Int. J. Fract.*, **52** (1991), 91.
- (4) Freund, L. B. and Rosakis, A. J., *J. Mech. Phys. Solids*, **40-3** (1992), 699.
- (5) 青木・木村, 機論, **58-554**, A (1992), 1785.
- (6) 青木・野々山・天谷, 機論, **58-553**, A (1992), 1650.
- (7) Takahashi, K. and Arakawa, K., *Exp. Mech.*, **27** (1987), 195.
- (8) Suzuki, S. and Fukuchi, S. (Rossmannith, H. P. and Rosakis, A. J. 編), *Dynamic Failure of Materials*, (1991), 219, Elsevier.
- (9) 鈴木・中根, 機論, **59-565**, A (1993), 2113.
- (10) 鈴木・宮崎・中根, 材料, **43-495** (1994), 1622.
- (11) Suzuki, S., Homma, H. and Kusaka, R., *J. Mech. Phys. Solids*, **36-6** (1988), 631.
- (12) 鈴木・細田, 機論, **55-517**, A (1989), 1974.
- (13) Rosakis, A. J. and Ravi-Chandar, K., *Int. J. Solids Struct.*, **22-2** (1986), 121.
- (14) Yang, W. and Freund, L. B., *Int. J. Solids Struct.*, **21-9** (1985), 977.
- (15) 清水・島田, 非破壊検査, **27-7** (1978), 399.