

高速進展き裂コウスティックのホログラフィ記録*

鈴木新一*¹, 細田康司*²

Holographic Recording of Caustic Light Beams of Fast Propagating Cracks

Shinichi SUZUKI and Yasuzi HOSODA

A pulsed holographic technique is described which records and reconstructs caustic light beams of fast propagating cracks in polymethylmethacrylate (PMMA). A caustic light beam of a fast propagating crack is recorded as a hologram at an instant during its propagation with a pulsed holographic recording system. Illuminated with reconstruction light, the hologram reconstructs the caustic light beam, and diameters of caustics at various distances from the specimen are measured from the reconstructed caustic light beam. Values of dynamic stress intensity factor K_I and initial curve radii are calculated from the caustic diameters. The initial curve radius at which calculated K_I values deviate from the real K_I value gives the scale of the three-dimensional stress field which appears around the fast propagating crack tip. In the case of cracks propagating through specimens 3 mm in thickness, the 3-D stress field spreads as far as the distance of half of the specimen's thickness from the tip.

Key Words: Fracture, Measurement, Optical Engineering, Holography, Caustic, Dynamic Fracture, Three-Dimensional Stress Field

1. ま え が き

板厚 t の無限平板中の半無限き裂において、き裂先端からある程度離れた場所には、 $1/\sqrt{r}$ (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^{(1)~(4)}。しかし、き裂先端近傍では、三次元応力場が支配的となってくる^{(5)~(13)}(図1参照)。この三次元応力場がき裂先端からどの程度の距離まで広がっているかは、き裂先端部の応力場を理解するうえで重要な問題である。

Yang and Freund⁽¹²⁾は、静止き裂において、三次元応力場の成立する範囲は、き裂先端から板厚の半分程度までであることを理論的に示した。また Rosakis and Ravi-Chandar⁽¹³⁾は、静止き裂にコウスティック法^{(14)~(17)}を適用することにより、上記の理論結果を支持する実験結果を得た。それより以前に、島田・佐々木⁽¹⁰⁾、Shimizuら⁽¹¹⁾は、コウスティック法を用いた応力拡大係数の測定における測定誤差の要因の一つと

して三次元応力場の影響を調べており、彼らの実験結果は Rosakis and Ravi-Chandar の実験結果と良く一致している。これらの研究から、静止き裂においては、三次元応力場の成立する範囲は、き裂先端から板厚の半分程度であると言える。しかしながら、数百 m/s の高速で進展しているき裂先端部の、三次元応力場が、き裂先端からどの程度の距離まで広がっているかは、いまだ未知の問題である。本研究は、この問題に対して実験的解答を与える能力を有するパルスホログラフィ法に関するものである。

パルスホログラフィは、これまで海中微生物の観

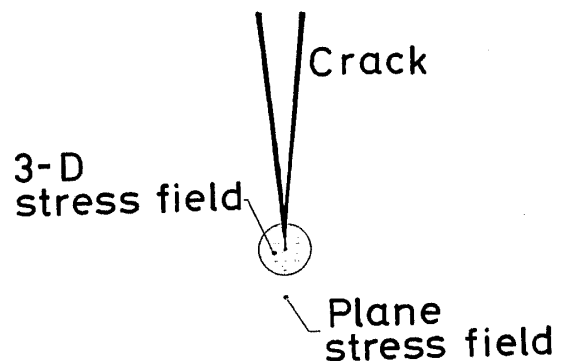


図1 き裂先端付近の応力場

* 昭和63年11月16日 第954回講演会において講演, 原稿受付 昭和63年12月28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 学生, 豊橋技術科学大学大学院.

察⁽¹⁸⁾、振動解析⁽¹⁹⁾、流れの可視化⁽¹⁹⁾、微粒子挙動の解明⁽¹⁹⁾、高速進展き裂先端部の顕微鏡撮影⁽²⁰⁾等に用いられてきた。ホログラフィは、基本的には、光の波面再生法であり^{(21)~(23)}、物体光を1枚のホログラムとして記録し、再生する手法である。

清水・島田⁽⁹⁾、島田・佐々木⁽¹⁰⁾、Shimizuら⁽¹¹⁾、Rosakis and Ravi-Chandar⁽¹³⁾は、静止き裂のコウスティック径^{(14)~(16)}をイニシャルカーブ半径を変えて測定することにより、三次元応力場の大きさを明らかにした。同様の手法を高速進展き裂に適用するためには、進行するき裂の、ある瞬間におけるコウスティック径を、試験片からの距離を変えて同時に測定する必要がある。光の波面再生法であるホログラフィは、これを可能にする最も有力な手法である。以下にパルスレーザを光源に用いた、高速進展き裂コウスティックの、ホログラフィ記録に関して述べる。

2. 三次元応力場の成立する範囲の測定原理⁽¹³⁾

本研究では試験片に、光学的に等方な透明 PMMA 平板(住友化学工業製, スミベックス E)を用いる。PMMA 試験片中の、開口形き裂の応力拡大係数を、透過形コウスティック法を用いて測定する場合、次のようになる(図2参照)。試験片面に対して垂直に平行光線を入射させる。き裂先端周辺での試験片板厚の変化と屈折率の変化によって、光は外側に曲げられ、試験片面から Z_0 の位置にあるスクリーンに到達する。その結果スクリーンに、光の到達しない影の領域(シャドウスポット)が、そしてその外側に光の集中する

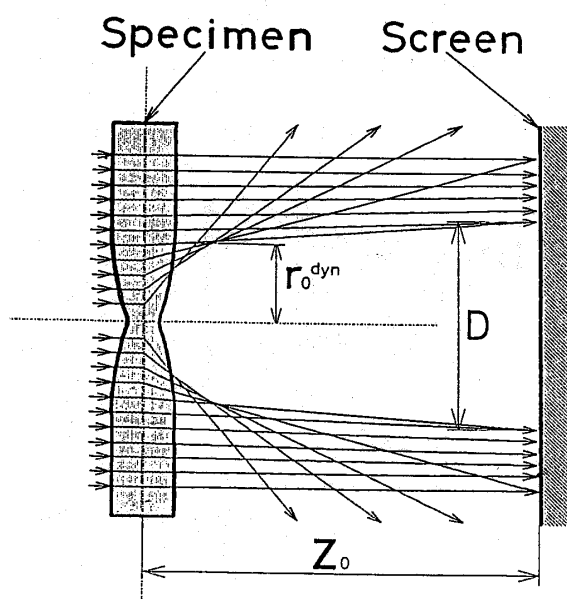


図2 コウスティック法を用いた応力拡大係数の測定

コウスティックが形成される。コウスティック径 D (き裂と直角方向の最大径)は、 Z_0 の $5/2$ 乗に比例する⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

$$D = \alpha Z_0^{5/2} \dots\dots\dots (1)$$

コウスティック上の一点から、光の来た道筋を逆にたどると試験片面上の一点に到達する。このようなことを、コウスティック上のあらゆる点について行くと、試験片面上に1本の曲線を描くことができる。これがイニシャルカーブである。静止き裂の場合、イニシャルカーブは円になる。また高速進展き裂においても、良い近似で円とみなすことができる⁽¹⁵⁾。PMMA 試験片の場合コウスティック径 D とイニシャルカーブ半径 r_0^{dyn} との関係は

$$D = 3.17 r_0^{dyn} \dots\dots\dots (2)$$

と書ける⁽¹⁵⁾。試験片からスクリーンまでの距離を小さくすれば、コウスティック径 D は小さくなり、イニシャルカーブ半径 r_0^{dyn} もそれにつれて小さくなる。またコウスティック法では、コウスティック径 D を測定することにより、動的応力拡大係数 K_I^{EXP} を求めることができる^{(14)~(16)}。

$$K_I^{EXP} = \beta \frac{1}{F(v)} D^{5/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで β は、試験片材料や試験片からスクリーンまでの距離で決まる比例定数、 $F(v)$ は、き裂進展速度の影響を表す関数である。

コウスティック法では、き裂先端近傍で、 $1/\sqrt{r}$ の特異性を持つ平面応力場が成立していることを仮定しており、イニシャルカーブがその平面応力場の範囲内であれば、式(3)は常に真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} を与える ($K_I^{EXP} = K_I^{2D}$)。しかしイニシャルカーブが三次元応力場の中にある場合には、式(3)から算出される動的応力拡大係数 K_I^{EXP} は、真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} からずれることになる^{(9)~(11)(13)}。

このことを逆に利用して、コウスティック法によって計算された動的応力拡大係数 K_I^{EXP} と真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} とのずれから、三次元応力場がき裂先端からどの程度の距離まで支配的であるかを知ることができる。すなわち、試験片からスクリーンまでの距離 Z_0 を減少させながらコウスティック径 D を測定し、式(3)でそれぞれの K_I^{EXP} を計算する。その K_I^{EXP} が、真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} からずれ始めるところのイニシャルカーブ半径が、三次元応力場の広がりを与える。Rosakis and Ravi-Chandar⁽¹³⁾は、上記の測定原理を静止き裂に対して適用し、き裂先端部に発生する三次元応力場の大きさが試験片板厚の $1/2$ 程度であることを示した。本研究ではコウスティックのパル

スホログラフィ記録を用いることにより、上記の測定原理を高速進展き裂に対して適用する。

3. コウスティックの ホログラフィ記録および再生

高速進展き裂コウスティックのホログラフィ記録に用いた光学系を図3に示す。試験片SPには、モードI形の引張荷重がかけられている。破壊が誘起され、き裂が観測領域に入ったときに、パルスレーザPLが一度発振する。観測領域内には導電性塗料が塗布されており、それらが切断されるときに信号を用いて、き裂速度が測定される⁽²⁰⁾。パルスレーザから出た光は、凹レンズL1で広げられた後、ビームスプリッタBSで二方向に分けられる。ビームスプリッタで反射した光は、カメラレンズL4、L5を通して平行光線にされる。この光は試験片を透過した後、ホログラフィ乾板HPに垂直に入射する。これが物体光である。すなわち、高速進展き裂のコウスティック光が物体光となる。試験片からホログラフィ乾板までの距離 Z_h は150mmである。一方ビームスプリッタを透過した光は、カメラレンズL2、L3で平行光線にされ、ホログラフィ乾板に物体光と θ の角をなして入射する。これが参照光である。このようにして、物体光を干渉縞の形でホログラフィ乾板に記録する。

現像処理されたホログラフィ乾板(ホログラム)に、記録時と同じ波長の光(再生光)を照射して、物体光を再生する。以下に物体光の再生、およびコウスティック

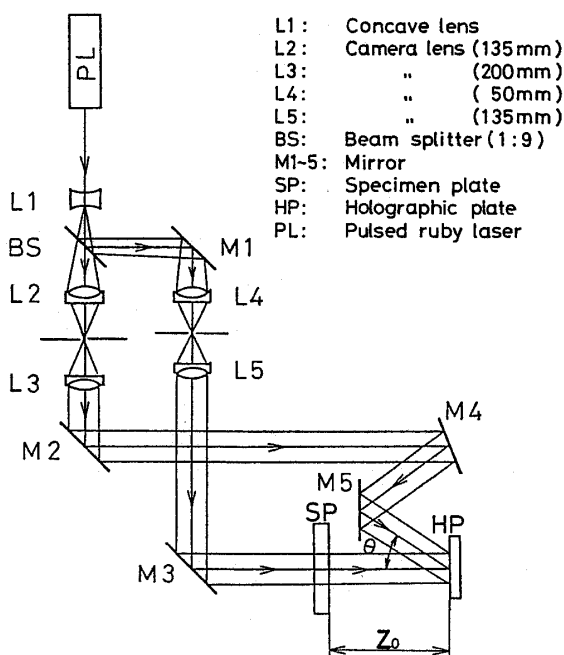
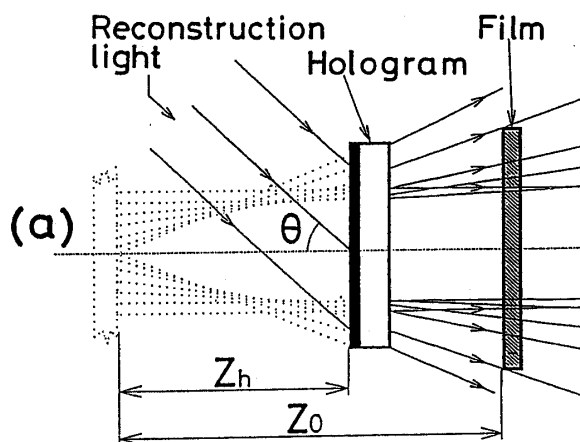


図3 コウスティック光のホログラフィ記録用光学系

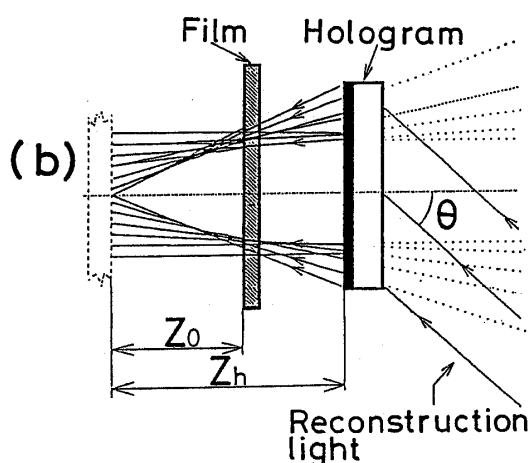
ク像の撮影方法について述べる。

図4(a)は、試験片から見て乾板よりも遠い位置($Z_0 > Z_h$)での物体光の再生と、コウスティック像の撮影方法について示したものである。再生には、記録時と同じ光学系を用いる。ホログラムに参照光と同じ角度 θ で同じ方向から再生光を入射させると、ホログラムから、記録時と全く同じ物体光が再生される。このとき、乾板のあった位置よりも遠方($Z_0 > Z_h$)にフィルムを置き、その位置でのコウスティック像を撮影する。

試験片と乾板の間($Z_0 < Z_h$)の物体光の再生と、コウスティック像の撮影方法を図4(b)に示す。参照光と同じ角度 θ で参照光とは逆の方向から再生光を入射させる。すなわち、参照光の共役光を再生光に使う。するとホログラムから試験片があった方向へ、物体光と同じ光が、逆向きに再生される。つまり、ホログラフィ記録された物体光の共役光が再生される。したがって、試験片とホログラムの間の位置にフィルムを置けば、



(a) 乾板より遠方のコウスティック光の再生方法



(b) 試験片と乾板の間のコウスティック光の再生

図4 コウスティック光の再生方法

試験片とホログラムの間のコウスティック像を撮影することができる。実際には、記録時と同じ光学系を用い、ホログラムを裏返しにして再生を行った。

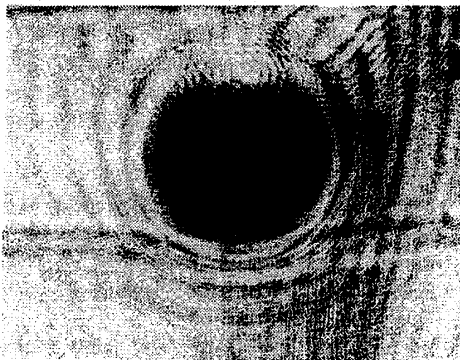
以上のような手法で、フィルムの置く位置を次々と変えることにより、高速進展き裂の瞬間的なコウスティック像を、あらゆる Z_0 について撮影することができる。

4. 実験結果および考察

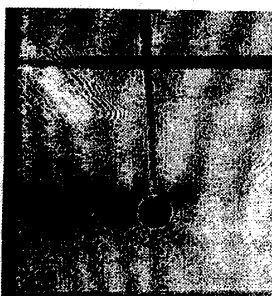
図5は、板厚3mmの試験片を601m/sの速度で進行するき裂のコウスティックの、ホログラフィ再生像である。(a)は試験片面からの距離 Z_0 が1200mmの位置での写真であり、 $Z_0 > Z_h$ の場合のコウスティック像の一例である。 $Z_0 < Z_h$ の場合のコウスティック像の写真の一例を(b)に示す。試験片面からの距離 Z_0 は25mmである。試験片に近いほうの像も遠い像も鮮明なコウスティックが得られている。このような写真からコウスティック径 D を測り、イニシャルカーブ半径 r_0^{dyn} および動的応力拡大係数 K_I^{EXP} を求める。

図6は、板厚3mmの試験片中を進行するき裂の、コウスティック径から求めたイニシャルカーブ半径と、動的応力拡大係数の関係を示したものである。 Z_0

N O. 23 $V = 601 \text{ m/s}$



(a) $Z_0 = 1200 \text{ mm}$



(b) $Z_0 = 25 \text{ mm}$

図5 高速進展き裂コウスティックのホログラフィ再生像

=25mmから3200mmまでの16点でコウスティック径を測定した。横軸は、イニシャルカーブ半径 r_0^{dyn} を板厚 t で割って無次元化したもの、縦軸は、コウスティック法で得られた動的応力拡大係数 K_I^{EXP} を真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} で無次元化したものである。

この図からイニシャルカーブ半径 r_0^{dyn} が試験片板厚の1/2より大きい所では、コウスティック法で得られた K_I^{EXP} は一定の値を示している。したがってこの領域では、イニシャルカーブは平面応力場の中にあると考えられ、得られた K_I^{EXP} は、真の動的応力拡大係数 K_I^{2D} を与える。図6の縦軸の無次元化には、この値を用いた。

一方 r_0^{dyn} が板厚の1/2よりも小さい所では、コウスティック法で得られた K_I^{EXP} は、真の応力拡大係数 K_I^{2D} よりも小さな値を示している。このことは、き裂先端からの距離が試験片板厚の1/2以下の所では、応力場は平面応力状態から逸脱し、三次元応力場が支配的となっていることを示している。この結果は、島田・佐々木⁽¹⁰⁾、Shimizuら⁽¹¹⁾、Rosakis and Ravi-Chandar⁽¹³⁾が静止き裂で得た結果と一致する。すなわち、本研究で取扱われた高速進展き裂では、三次元応力場の広がりに対するき裂速度の影響は小さいと言える。この理由として、以下のことが考えられる。

(1) PMMA中の横波速度は998m/sであり、本研究で対象とされたき裂の速度は最高で601m/sである。すなわち、き裂速度は横波速度の約60%である。この速度では、き裂が進行しているために生じる応力場の変化は静止き裂の応力場の30%程度⁽⁴⁾であるため、三次元応力場の広がりを極端に変化させるものではない。

(2) き裂先端からある程度離れた所では平面応力状態が実現している。また、材料内部でき裂先端のご

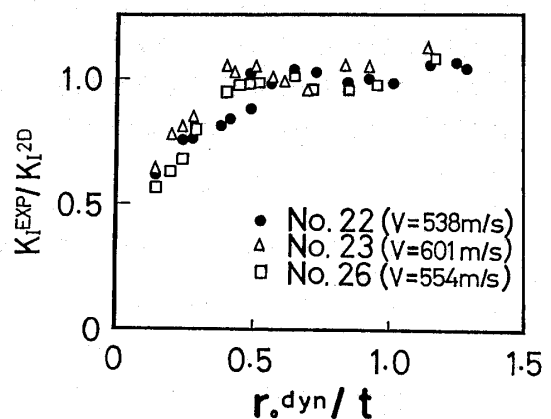


図6 コウスティック法から得られる動的応力拡大係数とイニシャルカーブ半径の関係

く近傍では平面ひずみ状態が実現している。き裂先端近傍の三次元応力場はこの平面応力場と平面ひずみ場との境界領域に現れる。平面ひずみ場に対するき裂速度の効果と平面応力場に対するそれとは同じようなものであり⁽⁴⁾、したがって、三次元応力場の広がりなき裂速度に対して鈍感である。

(3) コウスティック径を測定して求められる三次元応力場の広がり、き裂の進行方向から72°の角度を成す方向での広がりを意味する。高速進展き裂前方の応力場はき裂速度の影響を最も大きく受けるが、き裂の進行方向から72°の方向では、それに比べて、き裂速度の影響は小さい^{(15)~(17)}。

上記のうち、どれか一つが支配的なのか(そうだとするなら、それはどれか)、それともいくつか複合的に起こっているのか、現在のところ、不明である。

本研究で用いた試験片板厚(3 mm)よりも厚い板厚の試験片を用いて、三次元応力場の広がりに対する板厚の効果測定するには、本研究でコウスティック光用に使用した平行光線よりも平行度の良い光を用いる必要がある。例えば板厚5 mmの試験片を用いて、図6と同じ様に、 $v_0^{dyn}/t=1.3$ までの K_I^{EXP} を測定するには、 $Z_0=11$ mの所までコウスティック径を測定する必要がある。本研究でコウスティック光用に使用した光は、 $Z_0=3.2$ mの所までは平行光線とみなされる。しかし Z_0 がそれより大きいところではレンズの収差とレンズ外縁での光の回折の影響が現れてくる。このため板厚5 mmの試験片を用いた実験では十分な精度でのコウスティック径の測定がなされなかった。より高い平行度を持つ光を用いた板厚効果に関する実験は、次の機会に報告されるであろう。

5. 結 論

パルスレーザを用いた高速進展き裂コウスティックのホログラフィ記録は、き裂先端近傍の三次元応力場の成立する範囲を測定するうえで有効な手法である。本研究の実施にあたり、本学学生、福地信吾君、加藤宗寿君の多大な協力を得た。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) Dudderar, T. D. and O'Regan, R., Measurement of the Strain Field Near a Crack Tip in Polymethylmethacrylate by Holographic Interferometry, *Exp. Mech.*, 11 (1971), 49.
- (6) Folias, E. S., On the Three-Dimensional Theory of Cracked Plates, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.* 42 (1975), 663.
- (7) 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.
- (8) Bažant, Z. P. and Estenssoro, L. F., Surface Singularity and Crack Propagation, *Int. J. Solids Struct.*, 15 (1979), 405.
- (9) 清水・島田, Caustics(Shadow)法による応力拡大係数の測定について, 非破壊検査, 27-7(1978), 399.
- (10) 島田・佐々木, 表面反射形 Caustics法による応力拡大係数の測定, 機論, 49-441, (1983), 579.
- (11) Shimizu, K., ほか2名, Some Propositions on Caustics and an Application to the Biaxial-Fracture Problem, *Exp. Mech.*, 25-2(1985), 154.
- (12) Yang, W. and Freund, L. B., Transverse Shear Effects for Through-Cracks in an Elastic Plate, *Int. J. Solids Struct.*, 21-9(1985), 977.
- (13) 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.
- (14) Manogg, P., Schattenoptische Messung der Spezifischen Bruchenergie Während des Bruchvorgangs bei Plexiglas, *Proc. Int. Con. Physics Non-Crystalline Solids, Delft, The Netherlands*, (1964), 481.
- (15) 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.
- (16) Rosakis, A. J., Analysis of the Optical Method of Caustics for Dynamic Crack Propagation, *Eng. Fract. Mech.*, 13(1980), 331.
- (17) 西岡・橋高, 混合モード高速進展き裂のコウスティック法理論(第1報, 面内混合モード理論), 機論, 54-501, (1988), 1061.
- (18) Knox, C., Holographic Microscopy as a Technique for Recording Dynamic Microscopic Subjects, *Science*, 153 (1966), 989.
- (19) Koechner, W. (Stitch, M. L. 編), Pulsed Holography, *Laser Handbook 3* North-Holland, (1979), 577.
- (20) 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.
- (21) Gabor, D., a new Microscopic Principle, *Nature*, 161-4098(1948), 777.
- (22) Leith, E. N. and Upatnieks, J., Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects, *J. Opt. Soc. Am.*, 54-11(1964), 1295.
- (23) Smith, H. M., *Principles of Holography* (2nd edn), Wiley, New York, (1975).