Caustic法による静的応力拡大係数の測定*

橋高弘幸**・内山秀敏***・坂倉慧悟****
佐野幸雄***・西岡俊久*****

A Measurement of Static Stress Intensity
Factors by the Method of Caustics

By Hiroyuki Kittaka, Hidetoshi Uchiyama, Keigo Sakakura,
Yukio Sano, Toshihisa Nishioka

There are various experimental methods for the measurement of stress intensity factors. However, generally speaking, most of these methods are rather tedious.

The method of Caustic has proven to be a powerful optical technique to measure stress intensity factors in static and dynamic fracture mechanics. This method was introduced first by Manogg in 1964 who analyzed for a stationary crack under mode-I-loading. After that, this method was further developed and extended by Theocaris and Kalthoff who applied to elastodynamic crack problems, inelastic crack problems and so on. This technique has high accuracy of the measurement, still it is easy to make a experiment. Besides the usual equipment for photography, only a point light source is required.

The method of Caustic utilizes the information from the stress-strain-field within a small region very close to the crack tip. So, any knowledge about external loading and geometric boundary conditions is not necessary.

In this paper, the outline of this method, especially in measuring the static stress intensity factors under mode-I-loading is shown and the applicability of this method is clarified.

On the experiment, optical transmission arrangement with the 5mW He-Ne laser and optical isotropic specimen made of acrylic resin is used. Moreover, several problems concerning this method are investigated.

1. ま え が き

破壊力学は従来の材料力学と異なり、部材にき裂が存在することを前提として、構造物や大規模機器の安全性を評価するものである。破壊力学のうち、部材の強度や変形を弾性論に基づいて取扱う線形破壊力学では、安全性評価のパラメータとして応力拡大係数やエネルギー解放率が用いられている。

従来より応力拡大係数を実験的に求める方法として光弾性法、モアレ法、ホログラフィー法、Caustic法などがある。このうちCaustic法は光学的な手法であり、応力拡大係数の測定に種々の利点を有している。

本研究では静的応力拡大係数の測定にCaustic法を用いることとし、後述の混合モードにこの方法を適用する場合の詳細な検討を行った。また実験としては、モー

ドIについて(i)試験片の板厚、(ii)き裂長さ、(iii)試験片にかかる荷重が測定にどのような影響をおよぼすか調べてみた。実験には試験片としてアクリル板を使用し、光源としては一般の白色光源よりも精度の高い実験ができるレーザを用いた。

その結果、Caustic法による静的応力拡大係数の測定についての有用性を確認し、かつ正確な測定に関する上記3項目の制限条件を明らかにした。

2. 線形破壊力学の基本事項

き裂先端に原点を持つ直交座標系を図1のようにとると、原点付近のき裂の両面の相対変位は x 方向、 y 方向、 z 方向の三つに分けられる。したがってき裂先端近傍の応力、変位もこれら三つの基本変形に対する変形様式を組み合わせたと考えることができる。この三つの変形様式は図2に示すように、モードI（開口形）、モードII（面内せん断形）、モードIII（面外せん断形）である。混合モードはモードIとモードIIを組み合わせたものであり、その場合のき裂先端近傍における応力成分および変位は次式で表わされる^{1), 2)}。

* 原稿受付 昭和61年12月8日

昭和61年秋季学術講演(昭和61年10月29日)

** 正会員 海技大学校(芦屋市西蔵町12-24)

*** 神戸商船大学大学院(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**** 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

図1 き裂先端近傍の直交座標系

モード I

モード II

モード III

図2 変形様式

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} (2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{2G\sqrt{\frac{r}{2\pi}}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} (\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \\ \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) \end{Bmatrix} + \frac{K_{II}}{2G\sqrt{\frac{r}{2\pi}}} \begin{Bmatrix} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) \\ -\cos \frac{\theta}{2} (\kappa - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 G は横弾性係数である。またポアソン比を ν とすると κ は次のようにあらわされる。

$$\kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{平面ひずみ} \\ (3 - \nu)/(1 + \nu) & \text{平面応力} \end{cases} \quad (3)$$

上記成分以外の応力は、平面応力状態ではすべて0となり平面ひずみ状態では

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (4)$$

となる。

式(1)、(2)の K_I 、 K_{II} がそれぞれモードI、IIにおける応力拡大係数である。また応力拡大係数は材料およびき裂の形状、寸法、境界条件のみによって決まるパラメータである。小規模降伏状態において、破壊はこの応力拡大係数が材料のもつ限界値(破壊じん性 K_{IC})に達したとき起こる。したがってその条件は次式のように表わされる。

$$K \geq K_{IC} \quad (5)$$

3. Caustic 法

3.1 Caustic 法の原理 Caustic 法は主に応力拡大係数を測定する方法として、1964年にManoggにより提案された^{3), 4)}。Theocarisは1970年以来この方法を発展させ反射型、動的破壊問題を含む極めて広い範囲に適用している^{5)~8)}。この方法の特徴には次のようなことがあげられる。

- (1) 実験装置が簡単である。
- (2) 非接触で実験を行うことができる。
- (3) スクリーン上に結像するCaustic像の直径を測定することにより、容易に応力拡大係数が求められる。

る。

- (4) き裂先端近傍の情報から直接応力拡大係数を求めるので誤差が少ない。
- (5) 透明材料の場合は、光弾性感度の有無にかかわらず適用できる。また金属などの不透明材料の場合は、現在のところ直接応力拡大係数を測定できる数少ない方法のひとつである。
- (6) 静的、動的荷重にかかわらず実験ができる。

Caustic 法は大別して透過型と反射型に分けることができる。透過型はアクリル、ポリカーボネイトなど透明材料の場合に用いられ、反射型は金属などの不透明材料あるいは透明材料に銀蒸着を行って使用する場合に用いられる。

図3に透過型の場合の原理図を示す⁵⁾。き裂を有する試験片に引張り応力 σ をかけた場合、き裂先端近傍の応

力集中によって先端部分の板厚および屈折率が変化する。そこに光が入射すると、試験片が凹レンズと同様な働きをし光路が偏向する。その結果試験片から Z_0 離れたスクリーン上に光が全く入射しない部分ができ、またその周囲に明るい縁が結像する。この明るい縁をCausticといい、き裂と垂直な方向の最大直径を知ることにより応力拡大係数を求めることができる。

またCaustic 法は実験目的によって図4のような平行光、発散光、収束光の光学系を利用することができる⁹⁾。なお(d)の反射型のものでは、試験片表面を鏡面状にみがいておく必要がある。この場合はき裂先端が凹面鏡と同様な働きをしてCaustic 像を結像する。

3.2 透過型Caustic 像の形成理論 図5のようにP点に入射した光は屈折しなければスクリーン上のP'点に到達するが、実際は負荷によって光が屈折しQ'

図3 Caustic 法の原理

図4 光源による分類

点に到達する。ここで P 点の位置ベクトルを $\vec{r}$ とするとスクリーン上の Q' 点の位置ベクトル $\vec{W}$ は

$$\vec{W} = \vec{r} + \vec{w} \quad (6)$$

で示される。 $\vec{w}$ は入射した光の偏りを表わし、これは幾何学的解析により

$$\vec{w} = -Z_0 \text{grad } \Delta S \quad (7)$$

で示される。ここで Z_0 は試験片とスクリーンとの距離、 ΔS は光が無負荷時の試験片を透過する距離と負荷によって板厚および屈折率が変化した試験片を透過する距離との差（光路程差）である。光路程差 ΔS は一般に次式で示される^{9),10)}。

$$\Delta S = (n-1) \Delta t + \Delta n t \quad (8)$$

ここで t , n はそれぞれ無負荷時の板厚、屈折率、 Δt , Δn はそれぞれ負荷時における変化量である。 Δt , Δn は応力によって記述できる。実験に用いたアクリル板のように光学的等方性材料の場合、 ΔS は文献(10)によると

$$\Delta S = C_0 t (\sigma_x + \sigma_y) \quad (9)$$

で表わされる。ここで C_0 は材料によって決まる光学定数である。また式(1)より

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{2K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{2K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

であるから、これを式(7)に代入し、 $\vec{w}$ の計算をする

$$\vec{w} = Cr^{-\frac{3}{2}} \left\{ (K_I \cos \frac{3}{2}\theta - K_{II} \sin \frac{3}{2}\theta) \vec{i} + (K_I \sin \frac{3}{2}\theta + K_{II} \cos \frac{3}{2}\theta) \vec{j} \right\} \quad (11)$$

ここで $\vec{i}$, $\vec{j}$ は x , y 方向の単位ベクトル、 C は次式であらわされる定数である。

$$C = \frac{Z_0 t |C_0|}{\sqrt{2\pi}} \quad (12)$$

よって $\vec{W}$ は式(6)より次式で表わされる。

$$\vec{W} = \{ r \cos \theta + Cr^{-\frac{3}{2}} (K_I \cos \frac{3}{2}\theta - K_{II} \sin \frac{3}{2}\theta) \} \vec{i} + \{ r \sin \theta + Cr^{-\frac{3}{2}} (K_I \sin \frac{3}{2}\theta + K_{II} \cos \frac{3}{2}\theta) \} \vec{j} \quad (13)$$

入射光線は凹レンズと同様な作用によって発散するが、その発散する割合は板厚および屈折率の変化量に依存している。すなわちき裂先端に近い部分に入射した光線は大きく進路が変えられるが、先端から離れるにつれ進路変化は少なくなっていく。したがってスクリーン上で全く光の来ない中心部分には影ができ、複数の透過光線が重なるその周辺部分にはより明るく輝く Caustic 像ができる。この Caustic 像は式(14)によって示される Jacobian 関数が 0 になる位置の光によって形成される。

$$J = \frac{\partial x'}{\partial r} \frac{\partial y'}{\partial \theta} - \frac{\partial x'}{\partial \theta} \frac{\partial y'}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

これを解くと次式のような円を表わす式となる。

$$r = \left(\frac{3}{2} C \right)^{\frac{2}{3}} (K_I^2 + K_{II}^2)^{\frac{1}{3}} \equiv r_0 \quad (15)$$

r_0 は試験片のどの位置を透過した光によって Caustic 像が形成されるかを示しており、 r_0 の描く円を初期曲線という。また式(13)が描くスクリーン上の Caustic 像は式(15)を用いて

$$\begin{aligned} x' &= r_0 \left\{ \cos \theta + \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \cos \frac{3}{2}\theta - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \sin \frac{3}{2}\theta \right\} \\ y' &= r_0 \left\{ \sin \theta + \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \sin \frac{3}{2}\theta + \frac{2}{3} \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \cos \frac{3}{2}\theta \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

で示される。ここで $\mu = K_{II} / K_I$ を示している。

3.3 応力拡大係数の求め方 式(16)を用いて Caustic 像の形状を計算した結果を図6に示す。図は $\mu = 0.5$ のものである。これらの像から発散光、収束

図5 Caustic 像の形成理論

図6 Caustic の基本形状
($\mu = 0.5$)

光を含む一般的な K_I , K_{II} を求める式は

$$K_I = \frac{1.671}{Z_0 t |C_0|} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{D}{\delta}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (17)$$

$$K_{II} = \frac{1.671}{Z_0 t |C_0|} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{D}{\delta}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (18)$$

$$C = \frac{Z_0 t |C_0|}{\sqrt{2\pi} \lambda}$$

で表される¹¹⁾. ここで $\lambda = (Z_0 + Z_i)/Z_i$, Z_i は点光源から試験片までの距離, Z_0 は試験片からスクリーンまでの距離, λ は発散光, 収束光を用いたときの倍率を表わす.

K_I , K_{II} を求める方法には, Theocaris による方法^{12), 13)} と高橋・清水による方法¹¹⁾ がある. 高橋・清水の方法によると図6のCaustic像から3箇所の直径 $D_e^{\max}$, $D_e^{\min}$, D を測定する. 次に $(D_e^{\max} - D_e^{\min})/D_e^{\max}$ の値から予め理論計算によって求めておいた図7および図8を用いて μ および δ を求める. これらの値を式(17)に代入することにより K_I , K_{II} が求められる.

なお高橋・清水の方法では3箇所の直径として図6の $D_e^{\max}$, $D_e^{\min}$, D をとるのに対し, Theocarisの方法では図6の x' , y' 軸上の直径 $Dx^{\max}$, $Dx^{\min}$, Dy をとっている. 後者の方法を用いる場合は図7, 図8も計算し直さなければならず, その結果は図9, 図10のようになる. 図10で著者らが計算した実線に比べ, Theocarisの結果と一部分異なった箇所(点線部分)があるのが判明した. Caustic像の直径は図6をみても明らかなように x' , y' 軸上で最大とはならず, また実際上写真か

ら x' , y' 軸を求めることは困難(最大直径の位置は単に写真から判定すればよい)である. したがって Theocarisの方法は高橋・清水の方法に比べ, 応力拡大係数の測定が困難と考えられる.

モードIのみのときの応力拡大係数は, 式(17), 図7および図8から

$$K_I = \frac{1.671}{Z_0 t |C_0|} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{D}{3.17}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (19)$$

で表われ, Caustic像は図11のようになる. なお式(19)の3.17は種々の文献^{9), 13), 14)}によって異なっており, 今回再検討を行ったものである. その結果では, 図11の y' 軸上の直径 D_y で K_I を求める場合は3.16, 最大直径 D で求める場合は3.17となった. この差はわずかであるが, 測定値の計算にあたって1%程度の誤差を生じるのでどちらの直径によって K_I を計算するか注意を要する.

図7 $(D_e^{\max} - D_e^{\min})/D_e^{\max}$ と μ の関係
(最大直径を測る方法)

図8 μ と δ の関係
(最大直径を測る方法)

図9 $(D_x^{\max} - D_x^{\min}) / D_x^{\max}$ と μ の関係
(き裂先端より測る方法)

図10 μ と δ の関係
(き裂先端より測る方法)

図11 Caustic の基本形状
($\mu = 0$)

4. 実験装置および実験方法

4.1 試験片の形状 試験片としてアクリル板(光学定数 $C_0 = -1.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{kg}^9$) を使用し図12の形状に加工した。き裂としては高速切断機によって幅約 0.3 mm の切欠をもうけた。板幅 W は理論式が有効 ($a/W \leq 0.6$) となるよう十分な寸法をとった。また支点間距離 L は $L = 3W$ にとり、ピンにかかる負荷の影響がき裂におよばないように考慮した。

4.2 実験装置 図13に実験装置の配置図を示す。これは透過型で発散光を用いたときの配置で、光源は出力 5 mW の He-Ne レーザを用いた。レーザ光はコリメータ前方で収束し、そこから発散光となりある大きさをもって試験片に入射する。次に試験片を通過したレーザ光によって Caustic 像をスクリーン上に投影させる。スクリーンにはすりガラスを使用し、すり面をカメラ側におくとともに、すり面上には 10 mm 間隔の目盛を描き像の直径の測定に際し基準寸法として利用する。スクリーン上の Caustic 像は 35 mm カメラにより撮影し、得られた像を読み取り顕微鏡によって $1/100 \text{ mm}$ の精度で測定して Caustic の直径を得る。

また荷重装置としては、図14のものを使用した。試験片は取り付け金具に 4 本のピンによって固定し、レバーの右端に重りを下げて、この原理を応用して荷重をかけるようになっている。

4.3 実験方法 実験は試験片のき裂に対し垂直方向にモード I の引張り荷重をかけ透過型 Caustic 法で行った。荷重は試験片の限界荷重の 80% 以下とした。撮影した各ネガより得られた Caustic 像の最大直径 D から式 (19) によって K_I を計算し、その値を測定値 (K_{exp}) とした。一方、試験片の形状と荷重から Brown らの解析結果¹⁵⁾ によって K_I を計算し、この値を理論値 (K_{th}) とした。

$$K_{th} = \sigma \sqrt{\pi a f(a/W)} \quad (20)$$

ここに σ は負荷応力 ($\sigma = P/(W \times t)$)、 P は荷重、

図12 試験片の形状

図13 実験装置配置図

図14 荷重装置

W は試験片の板幅, t は板厚, $f(a/W)$ は有限板に対する補正係数で, 実験に用いた試験片形状では

$$f(a/W) = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \quad (21)$$

となる.

実験においては次の項目について種々の検討を行った.

- (1) 初期曲線 r_0 が応力拡大係数の測定値 K_{exp} におよぼす影響を調べるために板厚約 2, 3, 4, 5, 6, 10 mm の試験片について荷重一定で Z_i, Z_0 を変化させる.
- (2) き裂長さ a が K_{exp} におよぼす影響を調べるために板厚約 2, 4 mm の試験片について荷重, Z_i, Z_0 一定でき裂長さのみ変化させる.
- (3) 荷重 P が K_{exp} におよぼす影響を調べるために板厚約 2, 4 mm の試験片について Z_i, Z_0, a 一定で荷重のみ変化させる.

5. 実験結果

5.1 初期曲線の影響 3節で述べたように Caustic 像を形成する光の位置は試験片における初期曲線 r_0 に依存し, K は r_0 の影響を受けることになる. この r_0 の位置は式 (12), (15), (18) からわかるように荷重を一定とすれば Z_i, Z_0 を調整することによって変えることができる. 各試験片について荷重一定で Z_0 を 0.5 m ~ 17 m, Z_i を 0.5 m ~ 16 m の範囲で変化 (このとき λ は約 2 となる) させて r_0 が応力拡大係数の測定値 K_{exp} にどのような影響をおよぼすか調べてみた. この実験で用いた試験片寸法を表 1 に示す.

図 15 の (a) ~ (f) がそれぞれ板厚約 2, 3, 4, 5,

表 1 試験片寸法 (初期曲線の影響)

No	W (mm)	t (mm)	a (mm)	L (mm)
1	59.80	2.10	18.09	180
2	60.10	3.00	16.92	180
3	60.30	3.85	17.69	180
4	60.00	4.95	18.99	180
5	59.80	6.00	17.36	180
6	60.00	9.80	18.04	180

6, 10 mm の場合の実験結果を示している. 縦軸は式 (19) で求めた測定値と式 (20) で求めた理論値との比で, 横軸は r_0 と板厚 t との比で示してある. 図から板厚の薄い (a) ~ (b) のものは全範囲にわたってよく一致をみているが, 以下 (c) ~ (f) にみられるように板厚が厚くなるにしたがい r_0/t の小さい範囲で測定値は理論値より小さくなっていくことがわかる. この限界は板厚の 1/2 位の大きさの r_0 に相当している. これは板厚が厚い場合, r_0 の小さい範囲では, 三次元応力状態の影響あるいはき裂先端の曲率の影響がでてくるためと考えられる. 計算結果の一例として板厚 2.10 mm のものを表 2 に示す.

以上より正確な測定を行う際に r_0 に明確な制限があることがわかる.

実験より得られた Caustic 像の一例を図 16 に示す. この図は試験片の一部分を写真に撮ったもので, 不明瞭ながら左端からき裂が延びその先端部分に Caustic 像が明瞭に現われているのがわかる. また黒い線はスクリーンにつけた基準線で間隔が 10 mm である. Theocaris は図 11 の x' 軸上での直径で応力拡大係数を求める方法も述べている. しかし, 図 16 をみても明らかなように実際の Caustic 像は左端の交差部 (x' 軸上の負側) が不明瞭となり, 測定に誤差が出てくると考えられるので本研究では採用しなかった.

5.2 き裂長さの影響 Caustic 法における理論ではき裂先端における応力状態が平面応力状態にあると仮定している. 平面応力状態が成立するためには板厚が他の試験片寸法 (き裂長さ, 板幅, き裂のリガメントなど) に比べて十分小さいことが必要である. このため板厚が約 2, 4 mm の試験片について実験条件を $Z_0=13m$, $Z_i=13m$ とし, き裂長さ a を 6 mm から 30 mm まで 5 段階に変化させ実験を行った. 試験片の寸法を表 3 に示す.

図 17 にその結果を示す. 横軸はき裂長さ a と板幅 W の比で示してある. 図よりき裂長さが短いとき, き裂先端近傍は平面応力状態とみなすことができず理論値からはずれる傾向があることがわかる. 以上より正確な測定を

図15 初期曲線の影響

$t = 3.85 \text{ mm}$ $a = 17.69 \text{ mm}$ $P = 21 \text{ kgf}$

図16 Caustic 像の一例

行う際にき裂長さ a に明確な制限があることがわかる。一例として板厚 2.10 mm, 4.18 mm の場合の Caustic 像を図18に示す。

5.3 荷重の影響 この節では Z_i , Z_o 一定で荷重のおよぼす影響について調べてみた。実験は $Z_i = 13 \text{ m}$, $Z_o = 13 \text{ m}$ で、引張り応力 σ を 0.02 kgf/mm^2 (0.196 MPa) から 0.3 kgf/mm^2 (2.94 MPa) まで変えていき、試験片は板厚がそれぞれ約 2 mm と 4 mm で $a/W = 0.3$ のものを使用した。試験片の寸法を表4に示す。

図19にその結果を示す。図中の実線は Brown らの解析結果による試験片形状と荷重から求めた理論値 K_{th} を示したものである。実験結果は、理論値の線上的にのっており、今回実施した引張り応力 σ の範囲では K_{exp} にほとんど影響を与えていないことがわかる。しかしより低い引張り応力では前節で述べたように r_o の影響がでると考えられる。一例として板厚 3.85 mm の場合の Caustic 像を図20に示す。

6. 結 論

試験片にアクリル板を用い、透過型 Caustic 法によって静的応力拡大係数の測定を行った。試験片の形状および荷重から求めた理論値と実験により得られた測定値を比較し、試験片の板厚、き裂長さおよび試験片にかかる荷重が測定値にどのような影響をおよぼすか検討して

表3 試験片寸法 (き裂長さの影響)

No.	W (mm)	t (mm)	L (mm)
1	59.80	2.10	180
2	59.80	4.18	180

表2 計 算 結 果

Zi (mm)	Zo (mm)	K_{exp} (kg/mm ^{3/2})	K_{th} (kg/mm ^{3/2})	ro (mm)	K_{exp}/K_{th}
500	500	3.418	3.554	1.041	0.926
1,000	1,000	3.854	3.554	1.441	1.084
2,000	2,000	3.574	3.554	1.845	1.004
3,000	3,000	3.615	3.554	2.180	1.017
4,000	4,000	3.449	3.554	2.415	0.984
6,000	6,000	3.560	3.554	2.859	1.001
8,000	8,000	3.497	3.554	3.185	0.984
10,000	11,000	3.722	3.554	3.638	1.047
16,000	17,000	3.582	3.554	4.295	1.008

(a) $t = 2.10 \text{ mm}$

(b) $t = 4.18 \text{ mm}$

図17 き裂長さの影響

図18 Caustic 像 (き裂長さの影響)

みた、実験より得られた主な知見は次のようなものである。

- (1) 応力拡大係数の測定値は、初期曲線の大きさを板厚の $1/2$ 以上にとって測定すれば理論値とよく一致する。
- (2) き裂長さが短くなると、き裂先端近傍は平面応力状態とみなすことができなくなり、測定値は理論値より高い値を示すようになる。

表4 試験片寸法 (荷重の影響)

No.	W (mm)	t (mm)	a (mm)	L (mm)
1	59.80	2.10	18.09	180
2	60.30	3.85	17.69	180

(a) $t = 2.10 \text{ mm}$

(b) $t = 3.85 \text{ mm}$

図19 荷重の影響

$\sigma = 0.16 \text{ kgf/mm}^2$

$\sigma = 0.28 \text{ kgf/mm}^2$

図20 Caustic 像 (荷重の影響)

- (3) 今回行った実験範囲内では、試験片にかかる荷重は測定値にほとんど影響をおよぼしていない。

以上から応力拡大係数の測定に関し、透過型Caustic法の有用性が確認された。今後の課題としては、理論で述べた混合モードの問題、金属材料におけるき裂の塑性域の解析および動的破壊問題などがある。

文 献

- 1) 岡村, 線形破壊力学入門, 昭51, 培風館.
- 2) 村上・大南, 破壊力学入門, 昭54, オーム社.
- 3) Mannog, P., Physics of Noncrystalline Solids, 1965, 481-490, North-Holland Publ.
- 4) Mannog, P., Glastechnische Berichte, 39-7 (1966), 323-329.
- 5) Theocaris, P. S., Trans. ASME, Ser. E, 37-2 (1970), 409-415.
- 6) Theocaris, P. S. and Stassinakis, C. A., Intern. J. Fracture, 13-1 (1977), 13-26.
- 7) Theocaris, P. S. and Gdoutsos, E. E., Intern. J. Fracture, 10-4 (1974), 549-565.
- 8) Theocaris, P. S., J. Strain Analysis, 9-3 (1974), 197-205.
- 9) 高橋, 清水, 機械の研究, 37-4 (1985), 485-490.
- 10) Beinert, J. and Kalthoff, J. F., Mechanics of Fracture (Ed. G. C. Sih), Vol. 7, 1981, 281-330, Sijthoff and Noordhoff.
- 11) 高橋, 清水, 機械の研究, 37-5 (1985), 621-626.
- 12) Theocaris, P. S. and Gdoutsos, E. E., Trans. ASME, Ser. E, 39-1 (1972), 91-97.
- 13) Theocaris, P. S., Mechanics of Fracture (Ed. G. C. Sih), Vol. 7, 1981, 189-252, Sijthoff and Noordhoff.
- 14) 島田・佐々木, 機論, A編, 49-441 (昭58), 579-588.
- 15) Brown, W. F. Jr. and Srawley, ASTM STP., 410.

〔質 疑 応 答〕

質問者 日立造船(株)事業開発センター 高尾 武

〔質問〕 図10の $\mu \cdot \delta$ の関係においてTheocarisの結果と一部分異なった箇所があるとの記述があるが、図8

も同様に参考文献(10)の結果と異なっているように思える。これらの差異は何に起因するのか。

〔解答〕 図7から図10は正確な値をとるために原図の値を細かくとった。したがって参考文献の図とは多少異なっているようにみえるが、全体的な傾向(例えば図9で $\mu=\infty$ のとき、 $(Dx^{\max}-Dx^{\min})/Dx^{\max}$ の値が0.44になるということがTheocarissの論文に記述されており、図9の計算結果も同じになった)は合っているものと考えている。

またTheocarissの結果との違いは、計算にあたって μ の分割数が違うためと考えている。図10では μ を0.25刻みに計算した結果、 μ が0から1の間で図のような傾向が得られた。Theocarissがどのような μ の分割によって計算したかは不明であるが、例えば μ を1刻みにとったとすると図10のような傾向は得られないことになる。さらに縦軸の値をどの程度細かくとったかも影響しているのではないと思われる。図10では小数点以下3桁までとって作図した。しかし、これも粗くとれば図のような変化はあらわれないと思う。

質問者 日本海事協会 井野幸雄

〔質問〕 1. どちらかという高温環境での使用や、静定荷重の多い船用機関部品では、小規模降伏状態を満足する破壊じん性値 K_{IC} をクライテリアとする破壊は少ないと思う。どのような破壊を念頭においているのか。
2. 実用上の K 値評価では、二次元弾性解の重ね合わせで

十分な場合が多いと思う。Caustic法の利点にはどのようなものがあるのか。

〔解答〕 1. ご指摘のとおり高温環境の船用部品では、小規模降伏状態は満たされなくなる。しかし、海洋関係においても船体、海洋構造物などで小規模降伏状態(例えば寒冷地における船体構造物あるいはLNGタンクにき裂が発生した場合)が満足される場合も起り得ると考えられる。

この論文の範囲外であるが、小規模降伏状態が満たされない場合でも動的、静的を問わず破壊のパラメータとなりうる T^* 積分¹⁾をCaustic法によって追求していくことが一連の研究目的である。そのため今回は透明材料を用いて実験方法、測定精度の検討などを行ってみた。

2. 一般に二次元弾性解の重ね合わせで解が得られる場合は単純な場合である。Caustic法はき裂先端近傍の情報のみを用いるもので、光弾性実験法に比べ複雑な形状のものに対しても精度が良いとされている。さらに動的応力拡大係数の場合、解の重ね合わせ法は一般に成立せず、精密な実験手法または解析手法が必要となる。

文 献

- 1) Atluri, S.N., Nishioka, T., and Nakagaki, M., Engineering Fracture Mechanics, 20-2 (1984), 209-244.