

Determination of the Stress Intensity Factor by the Method of Surface Reflected Caustics

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/46431

表面反射形 Caustics 法による応力拡大係数の測定*

島田 平 八**, 佐々木 敏彦***
Heihachi SHIMADA, Toshihiko SASAKI

Key Words: Experimental Stress Analysis, Method of Caustics, Stress Intensity Factor, Surface Reflection, Acrylic Resin

1. ま え が き

比較的簡単な光学装置を用いる Caustics 法^{(1)~(8)}は、応力集中部の解析に適した応力測定法であり、とくに、き裂の先端部の破壊力学パラメータの測定に適している。本法は、静的な状態に対する測定とともに、動的な場合に対しても測定可能である^{(4)~(7)}。

本法は、応力集中部における光の屈折あるいは反射によって形成される caustic 像を解析する方法であるが、caustic 像を得る方法には次の3方法がある。

(1) 透過法⁽¹⁾: 材料の内部を透過した光を利用する方法であり、透明な材料を対象とする。

(2) 裏面反射法⁽²⁾: 材料の内部を通して裏面で反射し、再び材料の内部を通して外部に出て行く光を利用する方法であり、透明な材料を対象とする。

(3) 表面反射法^{(9)~(10)}: 材料の表面で反射した光を利用する方法であり、透明な材料と不透明な材料の両方に使用できる。

現在のところ、Caustics 法の最も代表的な利用法は、応力拡大係数 (K 値) の測定方法として用いることである。本法の K 値測定理論は、Manogg が透過法に対して提案したことにより (1964⁽¹⁾)、Theocaris による裏面反射法および表面反射法への拡張と続いた (1970⁽²⁾)。その後、透過法および裏面反射法に関しては、理論の検証⁽³⁾、測定方法の改善⁽¹¹⁾、破壊の研究への使用^{(5)~(9)}、および、 K 値測定以外への利用⁽⁶⁾など、多くの研究がなされている^{(12)~(16)}。これに対し、表面反射法では Theocaris⁽¹⁷⁾ および Kalthoff らによる研究例があるが、 K 値の測定例は板厚 10 mm の鋼材に対する Kalthoff らの研究⁽¹⁰⁾が唯一のようである。このように、表面反射法による K 値測定に関する研究例は少なく、しかも、測定値の精度に関する検討などの基礎検討は現在でも行われてい

いたため、測定値の信頼性は低い状態である。

本研究は、表面反射法を使用して精度良く K 値測定を行うための方法を確立することを目的としている。このための検討事項として、光学系の設定条件、切欠き先端形状、材料の板厚、あるいは、荷重段階等の変化が測定値の精度に与える影響についてアクリル板を用いて実験的に検討した。本研究の結果、従来の測定理論は不正確な測定値を与える可能性があり、とくに、板厚 10 mm 以上の材料に対する測定値は信頼できないなど、本法の従来の測定理論の適用限界が明らかとなった。測定誤差は、caustic 像を形成する反射光が材料面上で反射する位置 (理論的に想定した半径 r_0 の円周上) に対応しており、 r_0 の値を適正範囲に調整することにより正確な測定値が得られること、および、測定値と r_0 との関係を利用する測定値の補正法が実用的に便利であることなどが判明した。

2. 表面反射法の原理^{(18)~(19)}

表面反射法による K 値測定は、通常、材料の背後に焦点が位置するような点光源 (収束光) を使用する。ここでは、このような場合に対する従来の理論の概要を述べる。まず、反射光の光路、次に caustic 像の形状を計算し、最後に K 値測定法を示す。

試験片上の一点 $P(r, \theta)$ で反射する収束光の光路について考える。図1のように、試験片と平行な位置にスクリーンを置き、互いの距離を z_0 とする。P 点の

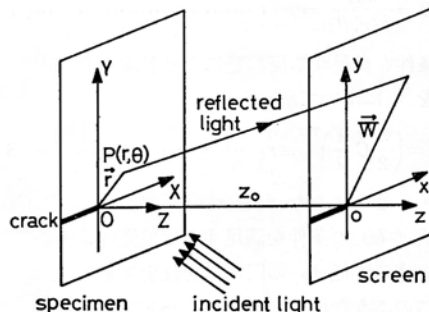


図1 反射光の光路

* 昭和55年10月25日 東北支部仙台地方講演会において講演、原稿受付 昭和56年10月5日。

** 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*** 正員、職業訓練大学校 (〒229 神奈川県相模原市相原 1960)。

位置ベクトルを $\vec{r}$ とし、スクリーン上における反射光の位置ベクトルを $\vec{W}$ とすると、

$$\vec{W} = -\lambda \vec{r} + \vec{\omega} \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。 $\vec{\omega}$ は、P 点に入射した平行光が反射により受ける光路の偏りを表す。 λ は、入射光の収束の程度(倍率)を表す値であり、

$$\lambda = (z_0 - z_i) / z_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。 z_i は、収束光の焦点の位置と試験片との距離である。試験片がモード I の変形を受ける場合、板厚方向の変位 Δt は、き裂先端近傍において $1/\sqrt{r}$ の形の応力の特異性が存在し、かつ、平面応力状態にあるとき、

$$\Delta t = -\frac{1}{2} \frac{\nu}{E} t (\sigma_x + \sigma_y) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

また、

ν : ポアソン比

E : ヤング係数

t : 材料の板厚

である。このとき、 $\vec{\omega}$ は、

$$\vec{\omega} = -2z_0 \text{ grad } \Delta t \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。以上より、

$$\begin{aligned} \vec{W} = & \left(-\lambda r \cos \theta - C r^{-3/2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \mathbf{i} \\ & + \left(-\lambda r \sin \theta - C r^{-3/2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \mathbf{j} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、

$$C = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z_0 t \frac{\nu}{E} K_I \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。式(5)で表される反射光のうち caustic 像を特徴づける明るい包絡線は、

ヤコビアン

$$D = \frac{\partial \vec{W}}{\partial (r, \theta)} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる条件を満足する反射光により形成される⁽¹⁸⁾。式(7)を r について解くと、

$$r = \left(\frac{3}{2} C \frac{1}{\lambda} \right)^{2/5} \equiv r_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。このような r を r_0 と定義する。式(8)より、式(7)の条件を満足する反射光は、き裂先端を中心とする半径 r_0 の円周上を反射することがわかる。このような反射光がスクリーン上に形成する像の形状は、式(5)、(8)より、

$$\left. \begin{aligned} x &= -\lambda r_0 \left(\cos \theta + \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ y &= -\lambda r_0 \left(\sin \theta + \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。図2は、 $-\pi \leq \theta \leq \pi$ の範囲について式(9)より得られる像である。これが caustic 像である。図のように、 x 軸方向の最大直径を D_x 、 y 軸方向の最大直径を D_y とすると、

$$r_0 = \frac{1}{3.17} \frac{D_x}{\lambda} = \frac{1}{3.01} \frac{D_y}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が得られる。式(6)、(8)、(10)より、

$$K_I = A \left(\frac{D_x}{3.17} \right)^{5/2} = A \left(\frac{D_y}{3.01} \right)^{5/2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

$$A = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3} \frac{E}{z_0 t \nu} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。caustic 像の直径 D_x 、 D_y よりただちに K_I 値が得られることがわかる。以上が、従来より提唱されている表面反射法の K 値測定理論の概要である。

3. 従来の測定理論の実験検証

2章で述べた K 値測定理論に及ぼす測定条件の影響について実験的に検討した。検討を行った事項は、(1) 収束光の焦点の位置とスクリーンとの距離 (z_i)、(2) 荷重段階、(3) 切欠き先端形状、および(4) 材料の板厚、等の変化による式(11)の測定値への影響である。(1)、(2)および(3)については板厚 2 mm のアクリル板を用いており、この結果について以下に述べ、(4)については4章で述べる。

3.1 試験片 試験片は、板厚 2 mm のアクリル板から切り出し、図3の形状に加工した片側縁ノッチ (SEN) 試験片と片側縁き裂 (SEC) 試験片の2種類である。ノッチは、高速切断器を使用し長さ約 10 mm、

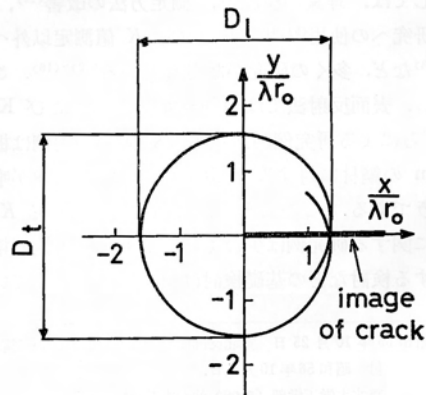


図2 caustic 像の理論的形状

幅約 0.2 mm, 先端部の曲率半径約 0.1 mm に加工した。き裂は、ノッチの場合と同様な方法で長さ約 7 mm のノッチを入れた後、ノッチ先端より約 3 mm の疲労き裂を入れた。続いて、試験片の片面を銀蒸着した。試験片の最終形状を表 1 に示す。

3.2 実験装置 図 4 に、本研究で使用した光学系の模式図を示す。光源は、出力 1 mW の He-Ne ガスレーザを用いた。レーザ光は、いったんコリメータを通して直径 100 mm の平行光となり、次に、焦点距離 1000 mm の凸レンズにより収束光となって試験片に入射する。入射光は、材料の表面で反射してスクリーン上に caustic 像を形成する。スクリーンには円形のすりガラスを使用し、すり面をカメラ側に置くとともに、すり面上には 10 mm 間隔の平行線を引き像の直径の測定に際しての標準距離として利用した⁽³⁾。スクリーン上の caustic 像は、カメラにより

35 mm フィルムに撮影し、得られたネガフィルムを光電式マイクロメータ（最小目盛り 0.001 mm, デジタルカウンタ式）付き拡大投影器により測定し、像の直径を得た。なお、光学系の設定精度の向上およびレンズの正確な移動を期す目的で、独自のレンズ移動装置を作製した。本装置は、光路と平行な方向に 510 mm, 水平方向 (x 軸方向) に 30 mm, 上下 (y 軸方向) に 180 mm の移動が可能であり、今回とくに重要である光路方向の移動は 0.01 mm の精度が得られる。

3.3 実験方法 引張試験機を所定の荷重値で停止させた状態で、レンズの位置を光路に沿って移動し各位置における caustic 像を撮影する。ネガより像の直径 D_i および D_t を測定し、式 (11) を用いて各直径に対応する K 値を計算し、その平均値を測定値 (K_{exp}) とした。また、試験片の切欠き長さおよび外部荷重とから文献 (20) の解析結果を用いて K 値を計算し、この値を理論値 (K_{th}) とした。なお、 K_{th} の計算式は、

$$K_{th} = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \dots \dots \dots (13)$$

ここに、

σ : 負荷応力

a : 切欠き長さ

W : 試験片の板幅

f : 有限板に対する補正係数で、

$\xi = a/W$ とするとき、

$$f(\xi) = 1.12 - 0.231\xi + 10.55\xi^2$$

$$- 21.72\xi^3 + 30.39\xi^4$$

である⁽²⁰⁾。以上により、 z_i が変化した場合の測定値と理論値との関係について検討した。このような実験を SEN 試験片および SEC 試験片を用いて行い、測定値に与える切欠き先端形状の影響を検討した。さらに、荷重段階を変えて同様な実験を行い、測定値に与える荷重段階の影響を検討した。

なお、実験を行った z_i の値の範囲は、20 mm から 520 mm まで 20 mm 間隔に 26 点、および $z_i = 530$ mm の合計 27 点である。実験を行った荷重段階は、SEN 試験片については一様部の応力が約 0.5 MPa 間隔で 3.5 MPa まで、 K 値に換算して約 0.16 MPa $\cdot$ m^{1/2} 間隔で 1.09 MPa $\cdot$ m^{1/2} までの合計 7 段階である。SEC 試験片では、一様部の応力が約 0.25 MPa 間隔で 1.75 MPa まで、 K 値にして約 0.08 MPa $\cdot$ m^{1/2} 間隔で 0.54 MPa $\cdot$ m^{1/2} までの合計 7 段階について実験した。また、 $z_0 = 681$ mm であり、実験温度は 23°C であった。式 (11)

表 1 試験片寸法および実験条件 (1)

(単位: mm)

試験片	板幅	板厚	ノッチ長さ	き裂長さ	z_0	z_i の範囲
SEN	31.1	2.00	9.96	—	681	20~530
SEC	31.2	2.00	7.18	2.64	681	20~530

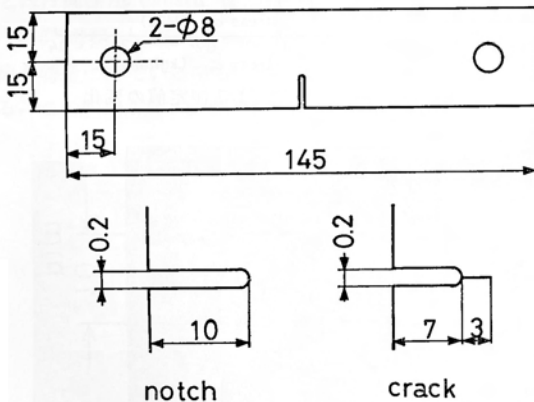


図 3 試験片形状

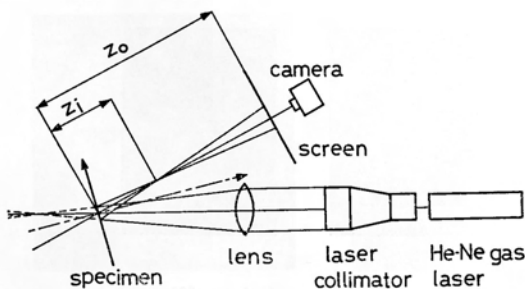


図 4 光学装置の模式図

の計算に必要な E および ν の値は、それぞれ、2890 MPa, 0.37 を使用した⁽²¹⁾。

3.4 実験結果

3.4.1 z_i の影響 図5の●印は、応力が約 1.5 MPa のときの SEN 試験片より得られた測定値と、 z_i との関係を表している。図中の破線は、理論値である。この結果、ほぼ $z_i \geq 300$ mm の範囲では測定値は理論値と一致しているが、 $z_i < 300$ mm の範囲では一致しておらず z_i の減少とともに測定値は理論値より小さい値を示している。たとえば、 $z_i = 20$ mm のときの測定値は理論値のほぼ 1/5 以下であり、非常に小さい値を示している。このように、従来の測定理論は、 z_i に対して明確な適用限界を示すことが判明した。

図6は、応力が約 1.5 MPa のときの SEN 試験片より得られた caustic 像である。このように、 z_i の

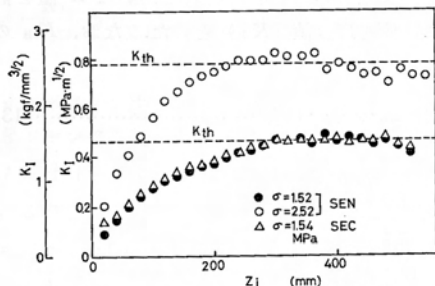


図5 z_i による測定値の変化

値が減少する程 caustic 像は大きくなる。このうち、(a), (b) および (c) の caustic 像は、いずれも $z_i < 300$ mm の範囲にあり、対応する測定値 (K_{exp}) は理論値と一致していない。

3.4.2 荷重段階の影響 図5の○印は、応力が約 2.5 MPa のときの SEN 試験片より得られた測定値と、 z_i との関係を表している。その結果、測定値が理論値と一致する範囲はほぼ $z_i \geq 220$ mm であり、応力が約 1.5 MPa のときの実験結果と比較すると、より広い範囲となっている。

図7は、 z_i の値がそれぞれ 420, 220, および 20 mm のときの、測定値と荷重段階との関係を表している。図中の実線は、理論値である。この結果、 $z_i =$

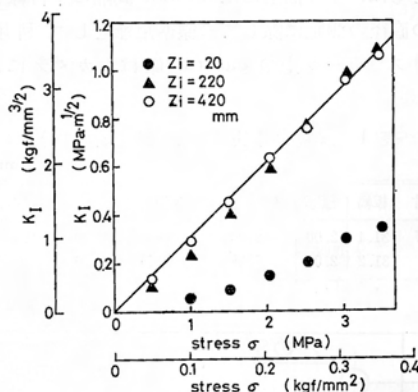
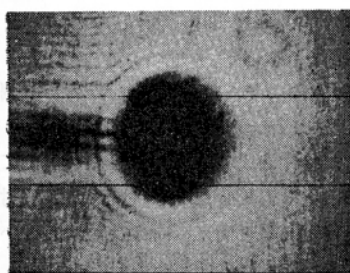
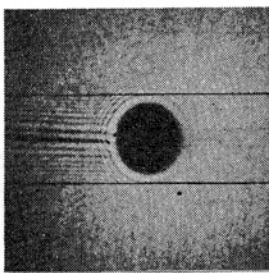


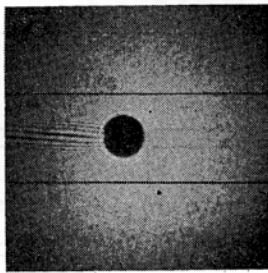
図7 荷重応力による測定値の変化



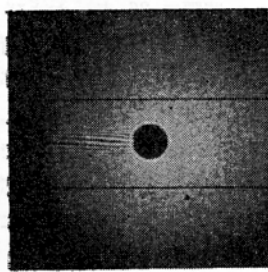
(a) $z_i = 20$ mm



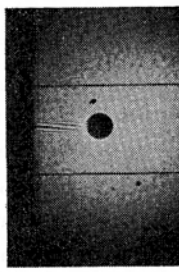
(b) $z_i = 100$ mm



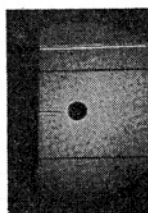
(c) $z_i = 240$ mm



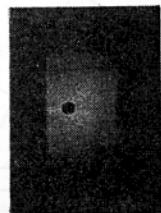
(d) $z_i = 300$ mm



(e) $z_i = 380$ mm



(f) $z_i = 460$ mm



(g) $z_i = 530$ mm

図6 SEN 試験片の caustic 像 ($\sigma = 1.52$ MPa, $z_0 = 681$ mm)

420 mm の場合には実験を行った全荷重範囲で測定値はほぼ理論値と一致している。 $z_i=220$ mm の場合には、応力が約 2.5 MPa 以上の範囲では測定値と理論値はほぼ一致しているが、それ以下の応力範囲では測定値は理論値よりわずかに小さい値を示している。 $z_i=20$ mm の場合には、全荷重範囲について測定値は理論値より小さい値を示している。

以上より、低荷重段階あるいは z_i が小さい場合に測定誤差は大きくなり、 z_i の影響は荷重段階によって異なっていることがわかる。

3.4.3 切欠き先端形状の影響 図5の△印は、応力が約 1.5 MPa のときの SEC 試験片より得られた測定値と、 z_i との関係を表している。両者の関係は、応力が約 1.5 MPa のときの SEN 試験片の結果(●印)と同様な傾向を示しており、測定値と理論値はほぼ $z_i \geq 300$ mm の範囲において一致している。このことから、切欠き先端形状の相違は、測定値と z_i との関係に対して全く影響を与えていないことが判明する。この結果は、Theocaris の予測⁽²²⁾と一致している。

図8は、応力が約 1.5 MPa のときの SEC 試験片より得られた caustic 像である。SEN 試験片の場合とはほぼ同様な caustic 像が得られている。

3.5 考察 2章で述べたように、測定値は caustic 像を特徴づけている明るい包絡線の直径から計算される。この包絡線は、理論上試験片表面における、切欠

き先端を原点とし、式(8)の r_0 を半径にもつ円周上の近傍を反射した光によって形成される。したがって、本法の測定値は、試験片におけるこの円周の近傍の変形状態に大きく影響されることが予想できる。ここでは、3.4 節の実験結果を用いて、測定値と r_0 との関係について考察する。

図9は、SEN 試験片の実験結果のうち、応力が約 1.5, 2.5, 3.5 MPa の場合の、測定値と r_0 との関係を表している。この結果、測定値と理論値とが一致する範囲は、ほぼ $r_0 \geq 1.1$ mm の場合であり、この範囲は各荷重段階ともほぼ等しい。したがって式(11)を

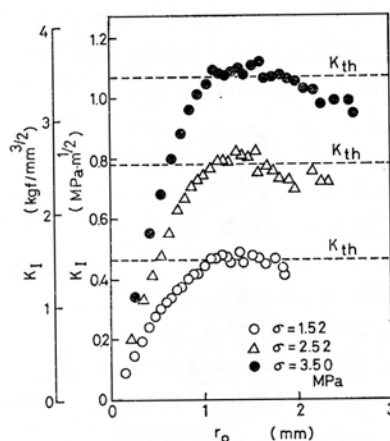


図9 r_0 による測定値の変化 (SEN 試験片)

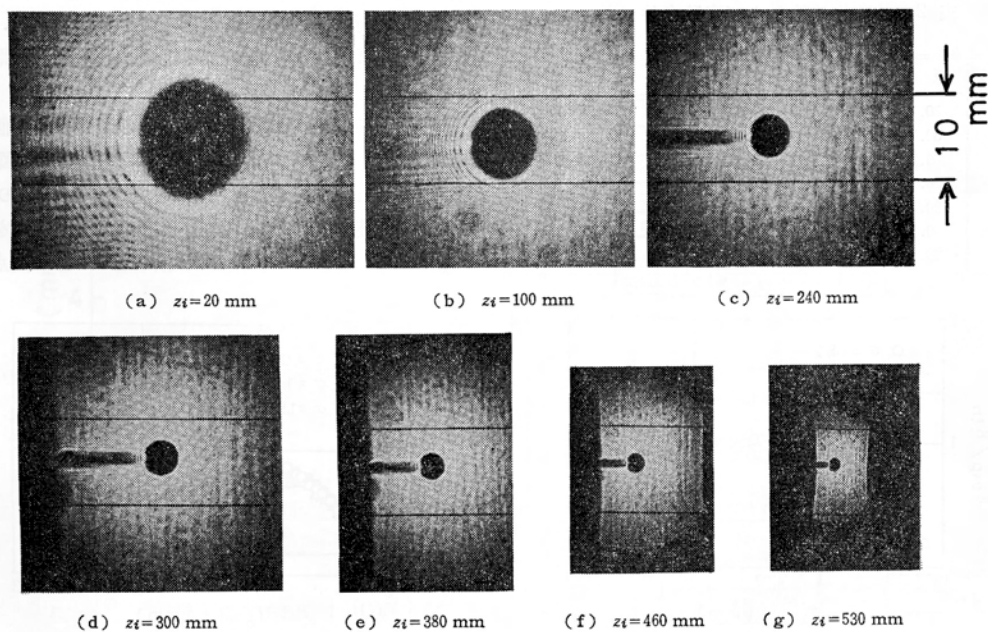


図8 SEC 試験片の caustic 像 ($\sigma=1.54$ MPa, $z_0=681$ mm)

用いる従来の K 値測定理論は、荷重段階には無関係にほぼ $r_0 \geq 1.1$ mm の範囲において有効であることがわかる。一方、 $r_0 < 1.1$ mm の範囲では、従来の測定理論を用いると不正確な測定値が得られ、測定誤差は r_0 の減少とともに著しくなる。

図 10 は、SEN 試験片の実験結果より、測定値と理論値との比 (K_{exp}/K_{th}) と、 r_0 の値との関係について表している。応力が約 1.5, 2.5, 3.5 MPa の場合について示してあるが、 K_{exp}/K_{th} と r_0 との対応関係は、荷重段階の相違によらずほぼ一定の曲線関係を示すことが判明する。同図からは、従来の理論が正確な測定値を与える r_0 の範囲が、荷重段階によって変わらないことが明確にわかる。また、 r_0 は式 (10) より測定可能な値であることから、図 10 を使用すれば $r_0 < 1.1$ mm の範囲における測定値の誤差の推定が可能となる。

図 11 は、SEC 試験片の実験結果より、応力が約 1.0 および 1.5 MPa の場合について K_{exp}/K_{th} と r_0 との関係を示している。図中には、応力が約 1.5 MPa のときの SEN 試験片の実験結果が示されているが、SEC 試験片の場合と同様な関係であることがわかる。このように、 K_{exp}/K_{th} と r_0 との関係は、荷重段階によって変わらないとともに、切欠き先端の形状の相違によっても変わらないことが判明する。

なお、測定時に r_0 の値を適正な範囲に調整するためには、レンズあるいはスクリーンの位置を調節す

べ良く、この操作によって、 z_i あるいは z_0 が変わり式 (8) に従って r_0 の値が変わる。

4. 材料の板厚の影響

4.1 試験片および実験方法 試験片は、板厚がそれぞれ約 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, および、10 mm の図 3 と同一形状の合計 7 片の SEN 試験片をアクリル板より作製した。各試験片の最終形状を表 2 に示す。

各試験片について、3 章と同様な実験を行い、 K_{exp}/K_{th} と r_0 との関係に与える試験片の板厚の影響を検討した。実験を行った荷重段階は、 K_{th} の値が約 0.62 および 0.93 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ の 2 段階である。 z_i の移動範囲は、表 2 に示したとおりであり、この範囲を 50 mm 間隔に合計 11 点について測定した。 z_0 の値を表 2 に示す。式 (11) の計算に必要な E および ν の値はそれぞれ 2890 MPa, 0.37 であり⁽²¹⁾、実験温度は 23°C である。

4.2 実験結果 図 12 (a), (b) および (c) は、試験片の板厚がそれぞれ約 3, 6, 10 mm の実験から得られた K_{exp}/K_{th} と r_0 との関係を表している。両者の関係は、板厚の相違によって異なり、測定値と理論値とが一致する r_0 の範囲は、板厚 3 mm の試験片ではほぼ $r_0 \geq 1.8$ mm、板厚 6 mm の場合ではほぼ $r_0 \geq 4$ mm の範囲である。板厚 10 mm の場合は、得られた測定値はすべて理論値より小さい値を示している。このことから、従来の測定理論を使用した場合に、板厚が 10 mm を越える材料に対して正確な K 値の測定を行うことは困難であることが判明する。また、Kalthoff らの実験結果の精度に対しての疑問が生ずる。

測定値と理論値とが一致する r_0 の範囲の最小値を r_{0min} と定義し、この値と試験片板厚との関係を図 13 に示す。 r_{0min} の決定方法は、 $K_{exp}/K_{th} < 0.95$ の範囲にある測定値を、図 12 中の破線のように原点を通る直線に近似し、この直線と $K_{exp}/K_{th} = 1$ との交点に

表 2 試験片寸法および実験条件 (2)

(単位: mm)

番号	板幅	板厚	ノッチ長さ	z_0	z_i の範囲
1	30.1	1.57	10.01	650	32~532
2	30.1	2.04	10.01	649	33~533
3	30.1	2.95	10.01	647	33~533
4	30.1	3.97	10.01	647	33~533
5	30.1	5.02	10.01	647	35~535
6	30.1	6.18	10.01	644	36~536
7	30.3	9.80	10.06	640	39~539

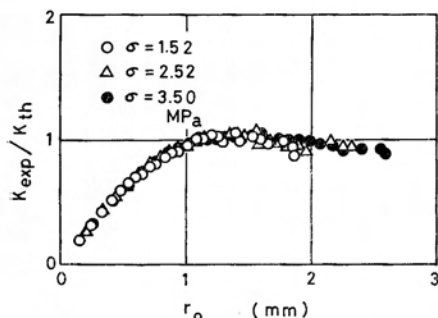


図 10 K_{exp}/K_{th} と r_0 の関係 (SEN 試験片)

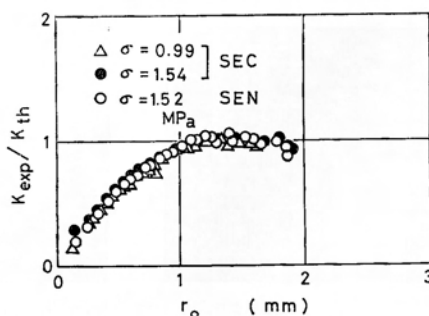
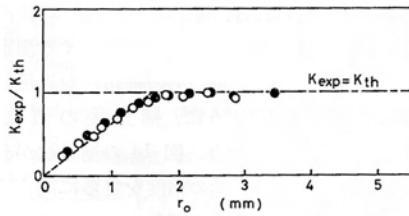


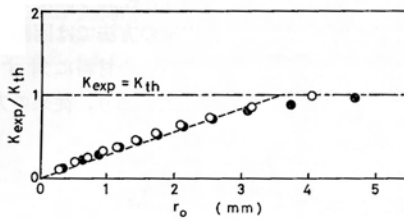
図 11 K_{exp}/K_{th} と r_0 の関係

おける r_0 の値を r_{0min} とした。図のように、 r_{0min} と板厚 t とはほぼ直線関係を示しており、

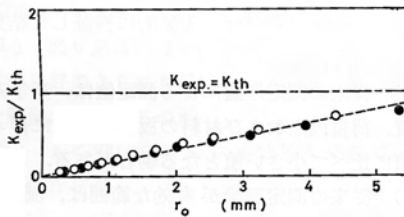
$$r_{0min} = 0.65t - 0.37 \quad \dots\dots\dots(14)$$



(a) $t = 2.95$ mm



(b) $t = 6.18$ mm



(c) $t = 9.80$ mm

○: $K_{th} = 0.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ●: $K_{th} = 0.93 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

図 12 板厚によると K_{exp}/K_{th} と r_0 の関係の変化

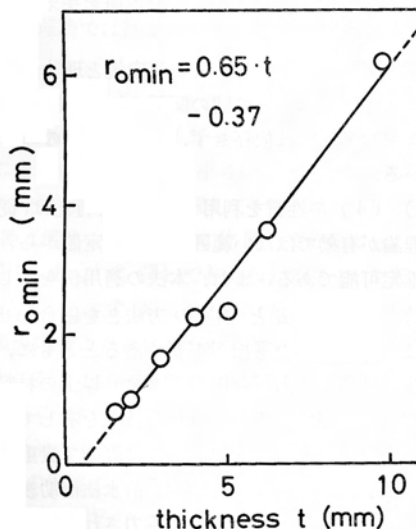


図 13 板厚による r_{0min} の値の変化

なる実験式が得られた。式 (14) から被測定材料の r_{0min} を求め、 $r_0 \geq r_{0min}$ の範囲で測定することにより、板厚が変化した場合においても式 (11) により正確な K 値が得られる。ただし、式 (14) は板厚 10 mm 以下の場合に有効な式であり、板厚 10 mm 以上の場合に対しては使用できない。

5. K 値測定法の改善

測定値と r_0 との関係をもとめると、次のように表すことができる。

$$\frac{K_{exp}}{K_{th}} = F(r_0, t) = \begin{cases} f(r_0, t) & (r_0 < r_{0min}) \\ 1 & (r_0 \geq r_{0min}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(15)$$

すなわち、 K_{exp}/K_{th} は、 r_0 および t を変数とする関数 F で表すことができる。このうち、 $r_0 < r_{0min}$ の範囲を関数 f とすると、 $r_0 \geq r_{0min}$ では $F(r_0, t) = 1$ であり、従来の測定理論が有効である。式 (15) より、 $r_0 < r_{0min}$ の範囲においては、

$$K_{th} = \frac{K_{exp}}{f(r_0, t)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

と表せるから、実験的に関数 f を求めておけば、式 (16) の補正により、 $r_0 < r_{0min}$ の範囲の測定値より K_{th} の推定が可能である。この方法と、式 (11) よりただちに K_{th} が得られる $r_0 \geq r_{0min}$ の範囲の測定法を組み合わせることにより、 r_0 の値の調節、すなわち、測定条件を調節することなく正確な K 値の測定

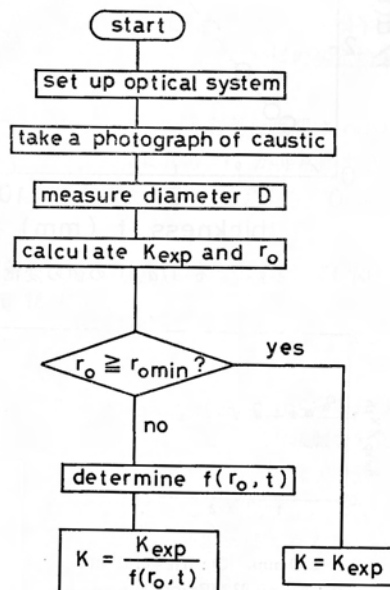


図 14 改善された K 値測定法

が行えるようになる。この場合の測定手順を図 14 に示す。すなわち、任意の測定条件によって caustic 像を測定し、式 (10), (11) から K_{exp} および r_0 を計算する。材料の板厚から式 (14) によって r_{0min} を推定し、 r_0 と比較する。 $r_0 \geq r_{0min}$ であれば、 K_{exp} は正確な値であると考えられ、 $r_0 < r_{0min}$ であれば、式 (16) の補正によって正確な値が推定できる。

関数 f に対する最も簡単な例として、次のような直線を近似する。

$$\frac{K_{exp}}{K_{th}} = f(r_0, t) = a(t)r_0 \dots \dots \dots (17)$$

この場合に対する図 14 の適用法およびその結果を述べる。なお、 $a(t)$ は直線の傾きであり板厚 t に依存する。式 (17) より、

$$K_{th} = \frac{1}{a(t)} \frac{K_{exp}}{r_0} \dots \dots \dots (18)$$

となるが、 K_{exp} および r_0 は測定値であるから、 K_{th} を得るためには $1/a(t)$ の値が必要である。4.2 節で行った $r_0 < r_{0min}$ の範囲の測定値に対する直線近似か

ら、 $1/a(t)$ を求め、板厚 t との関係を表したものを図 15 に示す。両者の関係は、 r_{0min} と板厚との関係と等しく、

$$1/a(t) = 0.65t - 0.37 \dots \dots \dots (19)$$

なる関係式で与えられる。

図 16 は、板厚 10 mm の試験片に対する測定結果 [図 12 (c)] について、図 14 の補正法を適用した結果を示している。図のように、補正後の値はほぼ $K_{exp}/K_{th} = 1$ を示しており、図 14 の補正法が有効であることがわかる。補正値の精度をさらに高くするためには、関数 f をより高次の関数で表す必要がある。

このように、図 14 の方法は、任意の測定条件の使用が可能であるとともに、従来の方法では困難であることが判明した板厚 10 mm 以上の材料に対する K 値測定が可能であるなどの利点があり、従来の方法より実用的な方法である。

6. 結 論

表面反射形 Caustics 法による K 値測定に関する従来の測定理論の有効性を実験的に検証した結果、次の結論を得た。

(1) 従来の測定理論による測定値は、光学系の設定位置、荷重段階および材料の板厚の変化に伴って、理論値に比べて小さい値となる場合がある。

(2) 従来の測定理論が有効な範囲は、測定時の r_0 が次式で与えられる r_{0min} の値より大きい範囲である。

$$r_{0min} = 0.65t - 0.37 \quad (t < 10)$$

(3) 従来の測定理論は、板厚が 10 mm 以上の材料に対しては理論値より小さい測定値を与える可能性が非常に大きい。

(4) 従来の測定理論による測定値と理論値との比 (K_{exp}/K_{th}) と、 r_0 との関係は、荷重段階および切欠き先端形状には依存せず、材料の板厚のみに依存している。

(5) (4) の性質を利用する補正を行えば、従来の測定理論が有効ではない範囲にある測定値から、理論値を推定可能である。また、本法の適用例を示した。

(6) (2) の方法と (5) の方法とを組合わせた測定法は、測定条件の選択が不要であるとともに、従来の方法では非常に困難な板厚 10 mm 以上の材料に対する測定が可能であるなど優れた特長を有している。

おわりに臨み、本研究のまとめに際して貴重なご教示を賜りました、関東学院大学 清水紘治助教授に深く謝意を表すとともに、実験に協力された東北大学 4 年 袴田仁君に感謝致します。

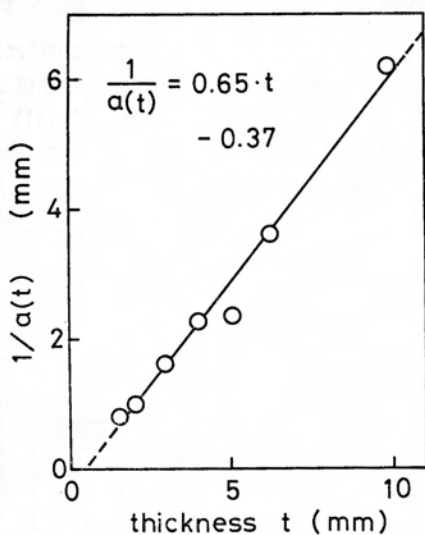
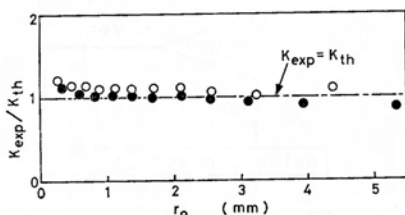


図 15 板厚による $1/a(t)$ の値の変化



$t = 9.80$ mm, ○: $K_{th} = 0.62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
●: $K_{th} = 0.93 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

図 16 測定値の補正例

文 献

- (1) Manogg, P., *Physics of Noncrystalline Solids*, (1965), 481, North-Holland Publ.
- (2) Theocaris, P.S., *Trans. ASME, Ser. E*, 37-2 (1970), 409.
- (3) 清水・島田, 非破壊検査, 27-7 (昭 53), 399.
- (4) Manogg, P., *Int. J. Fract. Mech.*, 2 (1966), 605.
- (5) Theocaris, P.S. and Katsamanis, F., *Eng. Fract. Mech.*, 10-2 (1978), 197.
- (6) Kalthoff, J.F., ほか 2 名, *ASTM STP* 627, (1977), 161.
- (7) 高橋, 非破壊検査, 27-10 (昭 53), 672.
- (8) Theocaris, P.S., *J. Strain Analysis*, 9-3 (1974), 197.
- (9) Theocaris, P.S. and Papadopoulos, G.A., *Eng. Fract. Mech.*, 9-4 (1977), 781.
- (10) Kalthoff, J.F., ほか 2 名, *First Semi-Annual Progress Report*, [(1977-8)~(1978-1)], (1978), 57, Electric Power Res. Inst.
- (11) 清水・ほか 2 名, 機論, 46-411, A (昭 55), 1196.

- (12) Theocaris, P.S., *J. Strain Analysis*, 7-2 (1972), 75.
- (13) Theocaris, P.S. and Gdoutos, E.E., *Trans. ASME, Ser. E*, 39-1 (1972), 91.
- (14) Theocaris, P.S., *Int. J. Solids & Struct.*, 9 (1973), 655.
- (15) 清水・高橋, 第 13 回応力-ひずみ測定シンポジウム, (昭 56), 5.
- (16) Theocaris, P.S. and Gdoutos, E.E., *Trans. ASME, Ser. E*, 44-2 (1977), 107.
- (17) Theocaris, P.S. and Gdoutos, E.E., *Eng. Fract. Mech.*, 6-1 (1974), 523.
- (18) Hollister, G.S., *Developments in Stress Analysis* 1, (1979), 27, Appl. Sci. Publ.
- (19) 佐々木・島田, 第 14 回応力-ひずみ測定シンポジウム (昭 57), 61.
- (20) Tada, H., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, (1973), 2-11, Del. Res.
- (21) Shimada, H., ほか 4 名, *Technology Reports, Tohoku Univ.*, 41-2 (1976), 351.
- (22) Theocaris, P.S. and Gdoutos, E.E., *Eng. Fract. Mech.*, 7-2 (1975), 331.

討 論

〔質問〕 大橋 義夫〔愛知工業大学〕

(1) 図 6 あるいは 8 によれば $z_i=100$ あたりで解像度が良好のように見受けられるが, $z_i>380$ でも十分な解像が得られるのか。

(2) $z_i<300$ では K の実験値と理論値が一致しないのはなぜか。

〔回答〕 (1) Caustics 法による K 値は, caustic 像の直径 D_i あるいは D_e により与えられるが, 本実験で得られた caustic 像はいずれも 3・2 節で述べた方法により十分に測定可能であると考えられる。

(2) 著者らの検討⁽¹⁹⁾によれば, 2 章で述べた K 値測定理論では以下の仮定が行われていると考えられる。

(a) 負荷によって生ずる曲面のこう配が小さいこと, (b) 板厚変化 Δt が z_0 および z_i に比較して小さいこと, (c) 入射角が小さいこと, (d) 試験片とスクリーンとが平行に位置していること, (e) 光源が z 軸 (図 1, 4) 方向に位置していること, (f) 板厚変化 Δt が式 (3) で与えられること, などである。 z_i が小のとき式 (8) より r_0 は小となり caustic 像はき裂先端のより近傍における反射光により形成されることになる。この場合, 上記 (a)~(c) の影響が現れることが考えられる。また, 図 4 に示されるように (d), (e) の影響も考えられる。そこで, (a)~(e) の仮定による測定精度への影響を理論面から検討した結果⁽¹⁹⁾, いずれも本報の実験条件の範囲では問題にならないことが判明した。したがって, 実験結

果に見られる測定値と理論値との不一致は, 上記 (f) の仮定が主要な原因であると考えられる。

〔質問〕 北岡 征一郎〔名古屋大学工学部〕

Caustics 法による K 値測定法の適用性を検討されたご研究興味深く読ませていただいた。

(1) 580 ページ右欄 18 行め (1) の z_i は収束光の焦点の位置と試験片との距離ではないか。

(2) 式 (11) は理想き裂の先端部近傍についてのみ成立する σ_x , σ_y と K_I の関係式に基づいて誘導されたものと考えられる。しかるに切欠き先端半径が 0.1 mm の場合でも SEC 試験片と同様の測定結果が得られるのはなぜか。

(3) 従来の測定理論が有効な範囲は $r_0>r_{0min}$ とあるが, 同様の理由により, r_0 が非常に大きくなった場合には測定値は K_{th} と一致しなくなることが期待されないか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおりである。580 ページ右欄 18 行めは以下のように訂正させていただく。

「…(1) 収束光の焦点の位置と試験片との距離 (z_i) …」

(2) 切欠き底に曲率半径が存在する場合の切欠き底付近の板厚変化 Δt は, 平面応力状態を考えると式 (3) の応力とによってき裂の場合の式と一致し, 曲率半径には影響されないことが判明する。したがって, 2 章の K 値測定理論は曲率半径の存在する切欠きの場合もそのまま適用可能であることが, 583 ページ左欄 19 行めにおいて述べているように Theocaris

らにより指摘されている⁽²²⁾。SEN 試験片と SEC 試験片の実験結果に相違が見られない理由はこのようなためと思われる。

(3) 本実験の範囲を越えて r_0 を大きくとれば応力分布の第2項以下の影響などによって測定値は理論値と一致しなくなることが予想される。しかしながら、そのような範囲における caustic 像は非常に小さ

なものとなるため実際的には測定困難であると考えられる。さらに、応力分布の第二項の境界条件によって定まる一様応力は、式(4)の微分によって消えるため測定値は比較的遠方においても理論値と一致する傾向を示すこと⁽³⁾、および、境界条件の影響が光弾性法に比較して小さいこと⁽¹⁰⁾、などが報告されており本法の特長のひとつとされている。

49 巻 439 号, A 編 (昭 58-3) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
鈴木一彦ほか	295	図2(a)		(温(度依存性	(a) 温度依存性
	302	付図4		Ree (13)	Ref (13)
	303	右	1	なお.	なお,
	//	//	3	整理して, その	整理して, その
安藤良夫ほか	307	式(24)		$\hat{\phi}_m =$	$\hat{\phi}_m =$
菅野良弘ほか	356	式(22)		$+m_{sy0}\bar{T}_{sy0}$	$+m_{sy0}\bar{T}_{sy0}$
	360	式(48)	3段め	$\left[\frac{E_n \sinh\{\nu_n(\xi - \bar{l}_x/2)\}}{\sinh(\delta_n \bar{l}_x/2)} \right]$	$\left[\frac{E_n \sinh\{\delta_n(\xi - \bar{l}_x/2)\}}{\sinh(\delta_n \bar{l}_x/2)} \right]$
	//	式(58)		$+G_n \delta_n^{-1}$	$+G_n \delta_n^{-1}$
	362	式(68) 第5式	1段め	$e_{in} = -\frac{2\nu_i}{i_x(\delta_n^2 + \nu_i^2)}$	$e_{ix} = -\frac{2\nu_i}{\bar{l}_x(\delta_n^2 + \nu_i^2)}$
				$\times \left[(-1)^i e^{\delta_n i x} \int_0^{\bar{l}_x} \right]$	$\times \left[(-1)^i e^{\delta_n \bar{l}_x} \int_0^{\bar{l}_x} \right]$
		//	5段め	$-\sum_{m=1}^{\infty} [A_{nm} J_\nu(\omega_m(\bar{l} + \xi))]$	$-\sum_{m=1}^{\infty} [A_{Tnm} J_\nu(\omega_m(\bar{l} + \xi))]$