

## セラミックスの破壊靱性評価に関する研究\*

信田 洋\*<sup>1</sup>, 本間寛臣\*<sup>2</sup>, 原口浩朗\*<sup>3</sup>Fracture Toughness of Silicon Carbide Evaluated Using  
Pre-cracked Specimens

Yoh NOBUTA, Hiroomi HOMMA, and Hiroaki HARAGUCHI

Silicon carbide plate specimens with through-thickness crack of which stress intensity can be calculated by the two-dimensional stress analysis, are prepared by a new method developed in the present work for conducting fracture toughness tests. The specimen geometry is quite similar to that of ASTM standard compact tension specimens. A compressive load is applied on the upper and lower surfaces of the specimen, with a narrow slit crack-starter to produce a tensile stress near the notch root and a compressive stress far from it. The loading point is changed by the required crack length. Then, the specimen is loaded by a  $20\ \mu\text{s}$  bending moment at the notch root. The obtained fracture toughness value from the specimen is almost constant, in the range of the crack length between 0.4 and 0.7 in its ratio to the specimen width. It is also independent of the specimen thickness between 3.0 and 9.5 mm.

**Key Words:** Silicon Carbide, Fracture Toughness, Pre-cracked Specimen

## 1. 緒 言

今日まで、セラミックスの強度を破壊力学的に評価する方法について多くの研究がなされてきたが、いまだにその手法は確立されてはいない。その原因として、セラミックスは著しい脆性を示し、金属のように破壊靱性試験に用いられる予き裂入り試験片を準備するのが困難であることが挙げられる。したがって、これまでは可能な限り鋭い切欠きを機械加工した試験片を用いることが多かった。しかし、脆性材料の強度は切欠きの鋭さに敏感であるため、それらの試験片を用いて得られた破壊靱性値が真のき裂靱性と一致している保証はない。そこで、切欠試験片に代わって、ビッカース硬度試験機の圧子によって生じるき裂の大きさから破壊靱性値を求める方法<sup>(1)</sup>や、シェブロンノッチからの安定き裂によって求める方法<sup>(2)</sup>が考えられているが、得られた結果のばらつきが大きく、セラミックスの真の破壊靱性を決定するには至っていない。また最近、

野瀬らは曲げ荷重を利用してセラミックスに脆性き裂を導入する手法<sup>(3)</sup>を開発して破壊靱性値を求めている。

著者らは、これとは別の手法によるき裂導入法を開発し、炭化珪素の破壊靱性値を求め、破壊靱性値に及ぼす切欠半径の影響について検討を加えた。また、野瀬らと同一のセラミックスに対して破壊靱性値を求め、両者のき裂導入法による靱性値に相違があるか否かを検討した。

## 2. 実験方法

**2-1 材料および試験片** 本研究で用いた供試材は常圧焼結炭化珪素(SiC)〔イビセラム〕で、その化学成分を表1に機械的性質を表2に示す。また、試験片寸法形状は図1に示すように40 mm×50 mm、中央に0.2 mmの切欠きが施されており、板厚が3.0 mmと9.5 mmの2種類の試験片を用意し、破壊靱性に及ぼす板厚の影響についても検討した。

**2-2 予き裂導入法** 図2に示すような、直径20 mm長さ30 mmのプロジェクタイトル(材質4340鋼)をバルブ先端より挿入し、圧縮N<sub>2</sub>ガスによって加速し、高速でロッド端面に衝突させる。この時発生した持続時間約20  $\mu\text{s}$ のパルス状圧縮応力がロッドを伝ば

\* 昭和62年8月21日 第65期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月3日。

<sup>1</sup> 学生員、豊橋技術科学大学大学院 (〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

<sup>2</sup> 正員、豊橋技術科学大学。

<sup>3</sup> 安川電機製作所(株) (〒806 北九州市八幡西区藤田2346)。

し、他端に接した試験片に入射する。この時試験片には約 20 μs の応力拡大係数の時間履歴が生じる。試験片はクランプ装置によって、き裂線に直角方向の圧縮荷重を受けており、進展を開始したき裂はある長さ成長して停止する。

クランプ装置周辺の詳細を図 3 に示す。圧縮荷重を作用させる位置は、試験片の切欠底には引張応力が、き裂を停止させたい所では応力が零となり、それ以降には圧縮応力が作用するように決定される。その決定に際しては、有限要素法によってき裂線上の応力が解析された。圧縮荷重の大きさは試験片に入射する応力波の大きさと関係するが、本研究では実験で試行錯誤によって定めた。

なお試験片は、予き裂を導入する前に試験片の表面両側を #3000 のダイヤモンドリキッドとポリッシングパッドによって鏡面仕上げを施し、予き裂導入後、微分干渉顕微鏡 (×1000) により予き裂長さを測定した。

**2.3 切欠試験片** 切欠試験片は図 4 に示すような外形寸法に切り出し、その中央に試験片幅に対して 2 分の 1 の所まで、ダイヤモンドホイールによって切欠きを導入した。切欠底はほぼ半円状となっており切欠幅の 2 分の 1 を切欠半径とした。

**2.4 応力拡大係数の算定** 予き裂を導入した試験片を用いて三点曲げおよび四点曲げ試験を行い、破壊靱性値を測定するが、本試験片形状に対する応力拡大係数はこれまで得られていないので、有限要素法によって解析した。要素は 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、要素数 96、節点数 333 である。数種類のき裂長さに対して得られた結果を図 5 に示す。これらの結果を多項式近似したものが以下の式であり本研究

ではこの式によって破壊靱性値を算定した。

三点曲げ

$$K_{Ic} = \frac{3SP}{2TW^2} (\pi a)^{1/2} \cdot F_{3P}(a/W)$$

$$F_{3P}(a/W) = 2.64 - 16.26(a/W) + 58.04(a/W)^2 - 91.97(a/W)^3 + 58.92(a/W)^4$$

.....(1)

S: スパン, P: 破壊荷重, a: き裂長さ  
W: 試験片幅, T: 板厚

四点曲げ

$$K_{Ic} = \frac{3(S_1 - S_2)P}{2TW^2} a^{1/2} \cdot F_{4P}(a/W)$$

$$F_{4P}(a/W) = 5.03 - 29.34(a/W) + 104.49(a/W)^2 - 164.81(a/W)^3 + 106.43(a/W)^4$$

.....(2)

S<sub>1</sub>: 下部スパン, S<sub>2</sub>: 上部スパン

3. 実験結果および考察

予き裂入り試験片から求めた破壊靱性値  $K_{Ic}$  と予き

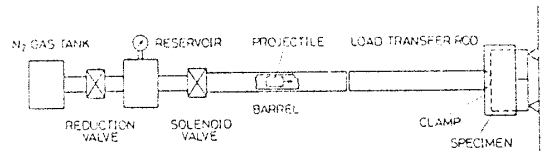


図 2 衝撃負荷装置

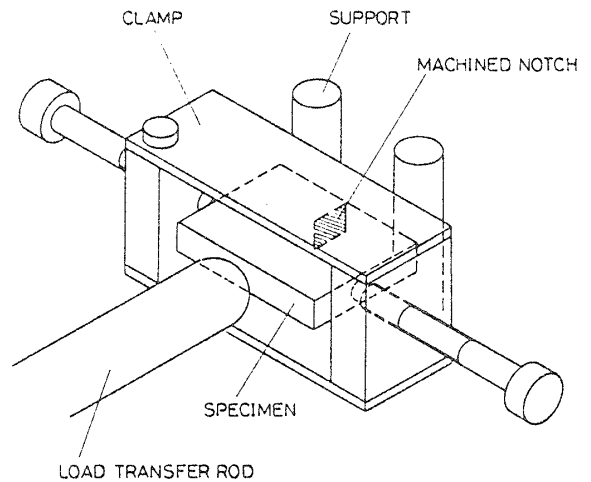


図 3 クランプ装置

表 1 試験片の化学成分

Compositions	SiC	Total-Al	Total-Fe	Free-SiO <sub>2</sub>	Free-C	H <sub>2</sub> O
(Weight %)	98.0	0.03	0.04	0.2	0.3	<0.25

表 2 試験片の機械的特性

Density	Young's Modulus	Poisson's Ratio
3.08-3.15 g/cm <sup>3</sup>	396.2 GPa	0.13

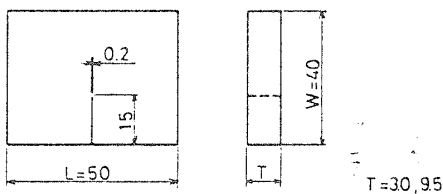


図 1 予き裂導入用試験片の形状

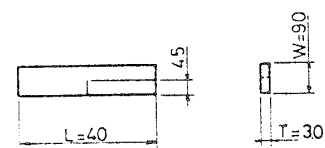


図 4 切欠試験片の形状

裂長さの関係を図6に示す。実験結果は多少ばらついているが、得られた  $K_{Ic}$  値は  $a/W$  に関係なく、ほぼ一定の  $2.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  となった。ばらつきの割合は平均値に対して約 10% であり、これは金属材料に比較して決して大きな値ではない。また、三点曲げと四点曲げおよび板厚の差異も認められなかった。

これは、本手法で導入されたき裂が、切欠きから直線的に進展しており、三点曲げ試験を実施する際に荷重点を正確にき裂線上に置くことができたためと思われる。また野瀬ら<sup>(3)</sup>は、同一材料の破壊靱性値を予き裂入り試験片を用いて求めているが、その値は  $2.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  であり、本研究で得られた値にほぼ一致している。野瀬らの方法も本手法も動的進展き裂を試験片内で停止させ、それを破壊靱性試験に使用するという点において同一であり、得られた予き裂の性状に本質的な差異はないものと思われる。本手法で得られた予き裂先端には、マイクロクラック等の被害を示すような痕跡は認められなかった。したがって本手法で導入された予き裂は、セラミックスの破壊靱性試験用として適切なものであると推論される。

図7に数種類の鋭さの切欠きを導入した試験片に三点曲げ試験を行い得られた破壊応力  $\sigma_0$

$$\sigma_0 = \frac{6M}{TB^2} \dots\dots\dots (3)$$

$M$ : モーメント,  $T$ : 板厚,  $B$ : リガメント  
と応力集中係数  $K_t$  の逆数との関係を示した。図より

$\sigma_0$  は  $1/K_t$  に大きく依存していることが明白である。

図中の破線は、脆性材料の切欠材は切欠底の最大応力が平滑材の強度 ( $K_t=1$ ) に達すると破断すると仮定して求めたものである。図より明らかなように実験結果は、この破線によって説明することは困難である。

一方、図中の実線は切欠材の強度が切欠底からある一定距離  $r_c$  内部に入った所の応力と平滑材の強度に関係して決まると仮定して求めたものである。なお、切欠底近傍の応力は次式より推定した<sup>(4)</sup>。

$$\sigma = K_t \sigma_0 \left( 1 - \frac{8B + \rho - r_c}{4\rho B} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$\rho$ : 切欠半径,  $B$ : リガメント,  
 $\sigma$ : 平滑材の破壊応力

式(4)は双曲線片側ノッチを持つ半無限板の面内曲げに対する式であるが、 $r_c$  を十分小さくすれば、本試験片の切欠底近傍の応力を十分な精度で与えるものとおもわれる。図より明らかなように、 $r_c=0.035 \text{ mm}$  にとれば切欠きの結果は実線の上に乗っているが、予き裂の破壊応力はすべて実線より下にあり、き裂材の破壊が上述の理論で説明されないことを示している。

図8に予き裂を導入した試験片による  $K_{Ic}$  値および切欠試験片の切欠先端を零とみなして算定した見かけの  $K_{Ic}$  値と切欠半径  $\rho$  との関係を示す。  $K_{Ic}$  値は  $\rho$  の減少とともにほぼ直線的に減少する。そこで切欠試験片の  $K_{Ic}$  値より  $\rho=0$  の点を直線で外挿すると約  $2.64 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  となり予き裂試験片の  $K_{Ic}$  値より大きな推定値を与える。今回用いた切欠きの最も鋭いものは先端半径が約  $0.1 \text{ mm}$  であり、切欠試験片を用いて真の破壊靱性値を推定するためには、切欠先端半径が少なくとも  $0.1 \text{ mm}$  以下のものについて試験を実施する必要があるが、その加工の困難さと外挿の精度を考えれば予き裂入り試験片を用いたほうが合理的であ

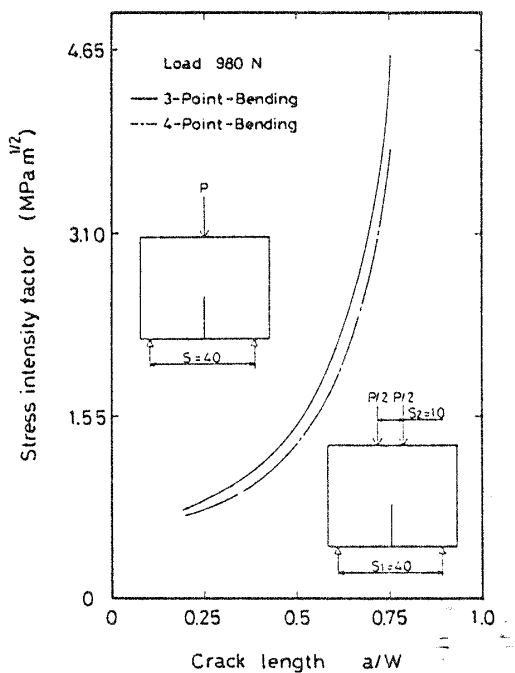


図5 応力拡大係数算定曲線

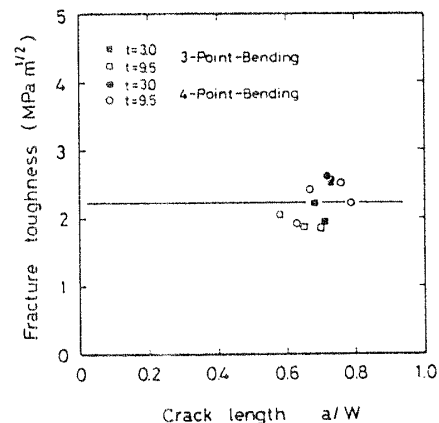


図6 予き裂入り試験片における破壊靱性値とき裂長さの関係

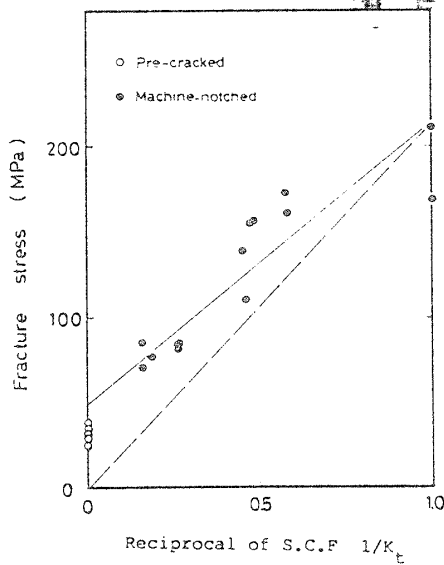


図7 切欠試験片における破壊応力と応力集中係数の関係

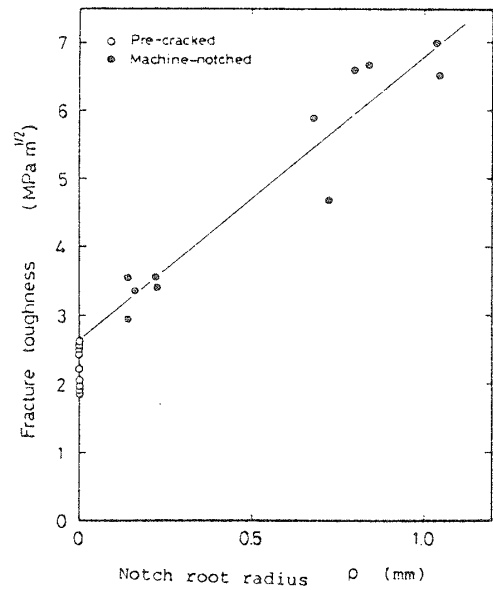


図8 予き裂および切欠試験片における破壊靱性値と切欠半径の関係

る。

#### 4. 結 言

セラミックスの真の破壊靱性値を得るために、試験片に予き裂を導入する手法を開発し、真の破壊靱性値を求めた。併せて、切欠きを導入した試験片より得られた見かけの靱性値との比較を行った。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) セラミックスの予き裂導入が容易に行える手法を確立した。

(2) (1)の手法で用意された試験片を用いて得られたセラミックスの破壊靱性値は、き裂長さ、板厚に依存せず一定であり、その値はセラミックスの真の破

壊靱性値を与える。

(3) 先端半径1.0 mmから0.1 mmまでの切欠きより得られた見かけの破壊靱性値から外挿されるき裂靱性値は、予き裂試験片より得られた値よりも大きい。

#### 文 献

- (1) 例えば, Evans, A. G. and Chries, E. A., *J. Am. Ceram. Soc.*, **59** (1976), 371.
- (2) 例えば, Munz, D., Bubst, R. T. and Shannon, J. L., Jr., *J. Am. Ceram. Soc.*, **63** (1980), 300.
- (3) 野瀬・藤井, 窯業協会年会講演予稿集, **1** (昭61), 363.
- (4) 西田, 応力集中, (昭51), 88, 森北出版.