

## 微視クラック分散モデルによる多孔質セラミックスの 応力-ひずみ非線形挙動解析\*

馬場秀成\*<sup>1</sup>, 武正文夫\*<sup>1</sup>, 鈴木章彦\*<sup>2</sup>

### An Analysis of Nonlinear Stress-Strain Behavior of Porous Ceramics with Distributed Micro Crack Model

Hidenari BABA\*<sup>3</sup>, Fumio TAKEMASA and Akihiko SUZUKI

\*<sup>3</sup> Structure and Strength Department, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.,  
1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8501 Japan

Porous ceramics have nonlinear stress-strain behavior and are expected to have damage tolerance capability. To assess the nonlinear behavior, we have proposed distributed-micro-crack model. In this paper, some assessment results with the distributed-micro-crack model for porous ceramics are presented. The effects of *R*-curve behavior and stress concentration are included in the assessment. Constitutive equation of distributed-micro-crack model has been expanded from uniaxial stress model to multiaxial stress model to consider the stress concentration. It was found that our proposed model can simulate the nonlinear stress-strain relationship of porous ceramics for various loading condition such as 3-point bending, 4-point bending with smooth specimen and 4-point bending with notched specimen etc. These simulations also show that 3-point bending test is suitable for assessing nonlinear stress-strain behavior than 4-point bending because 3-point bending can localize the nonlinear stress-strain behavior region which is easily measured by strain gage.

**Key Words:** Ceramics, Porous Ceramics, Damage Tolerance, *R*-curve, Constitutive Model, Nonlinear Stress-Strain Behavior

## 1 緒 言

セラミックスの非線形挙動は金属材料ほど大きくはないが、*R*カーブ特性や圧痕の導入が即破壊に至らないなど、僅かながら存在する。よって構造部材として供するためには、その僅かな非線形挙動を評価できる手法が必要であると考えられる。多孔質セラミックスは脆性材料でありながら緻密質のセラミックスに比べて、応力歪線図に非線形挙動を示す。これまで著者らはこのような挙動を記述するための構成式として微視クラック分散モデルを提案してきた<sup>1)2)</sup>。

本論文では、微視クラック分散モデルの妥当性を評価するため、多孔質 SiC を用いて実施した各種強度試験と本モデルによる解析とを比較したので、その結果について示す。そして提案してきた微視クラック分散モデルがセラミックスの非線形挙動評価に対して有効な手段であることを示す。

## 2 非線形挙動のモデル化

### 2.1 単軸応力下におけるモデル化

多孔質セラミックスを多数の微視クラックを含む弾性体と仮定する。その材料が一樣な応力  $\sigma$  を受けると、微視クラックの *R*カーブ挙動を伴いながら非線形的な挙動を示すものとする。今、図 1(a)に示すように、部材中に 1 個のペニーシェイプ型クラックが存在するモデルを考える。その部材が引張荷重  $P$  を受けると、その荷重点変位  $u$  及び歪  $\varepsilon (=u/L_1)$  は以下の式(1)及び(2)で表すことができる。<sup>3)</sup>

$$u = u_0 + \int_0^A \frac{\partial G}{\partial P} dA \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{u}{L_1} = \frac{\sigma}{E} + \frac{4\pi^2 F^2}{3E'} \frac{ca^3}{L_1 L_2 L_3} \quad (2)$$

ここで、 $u$  : 荷重点変位、 $G$  : ひずみ開放エネルギー、 $P$  : 荷重、 $A$  : クラックの面積、 $\varepsilon$  : 平均の歪、 $\sigma$  : 応力、 $E$  : ヤング率、 $E' = E/(1-\nu)$ 、 $\nu$  : ポア

\* 原稿受付. 2005 年 4 月 19 日.

\*<sup>1</sup> 正員, 石川島播磨重工業(株) (☎ 235-8501 横浜市磯子区新中原町 1).

\*<sup>2</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科 (☎ 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255).

E-mail: Hidenari\_baba@ihi.co.jp

ソン比,  $F$ : 形状係数( $=2/\pi$ )である.

次に図 1(b)に示すように, 部材中にクラックが  $N$  個存在した場合を考えると, 式(2)は式(3)になる.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{16}{3} \frac{N}{L_1 L_2 L_3} \frac{\sigma}{E'} a^3 \quad (3)$$

クラックは材料内で一様に分布しているとすれば, 式(4)で示されるクラック密度  $q$  を定義でき, 式(3)は式(5)となる.

$$q = \frac{N}{L_1 L_2 L_3} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{16}{3} q \frac{\sigma}{E'} a^3 \quad (5)$$

式(5)の右辺第 1 項目は弾性変形分の歪を, 2 項目は微視クラックが  $R$  カーブ挙動にしたがって成長することによって生じる非線形変形分の歪を表している.

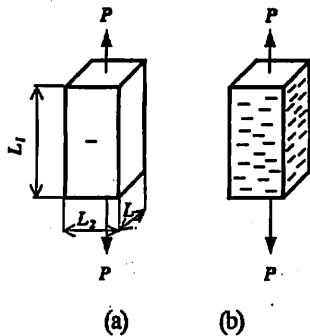


Fig.1 Nonlinear stress-strain behavior model under uniaxial tension. (a) Component with a single micro crack  
(b) Component with multi-micro-cracks

## 2.2 多軸応力下におけるモデル化

緻密質セラミックスにおいても, 圧痕を導入しただけでは全体破壊には至らなし, 上昇型の  $R$  カーブ挙動が観察されるなどの事実があることから, 局所的あるいは微視的な損傷が即全体破壊には至らない損傷許容性を有していると考えられる. これは, 局所的・微視的な損傷が非線形挙動により応力の再配分がなされ, 僅かではあるが局部のピーク応力が一部緩和されることを示している.

このような非線形挙動を評価するためには, 微視クラック分散モデルが応力集中部にも適用可能でなくてはならない. 応力集中部は通常多軸応力場になることから, 前述の単軸応力下での微視クラックモデルの構

成式を, 多軸応力場にも適用できるものにする必要がある.

式(5)で示した単軸応力下の構成式を多軸に拡張するためには, 部材中に内在する微視クラックがあらゆる方向を等確率で向いている状態を考慮する必要がある. この場合, 全体座標系 (材料座標, マクロ座標) と局所座標 (クラック座標, ミクロ座標) の 2 つを考える必要がある. ミクロ座標で定義された量のミクロ座標系における成分に上付きの指標  $\omega$  および上バーをつけて示し, ミクロ座標で定義された量のマクロ座標で表した成分を上付きの指標  $\omega$  で, マクロ座標で定義された量のマクロ座標成分には何も付けないことで示すとする. 多軸応力場においてはクラック面に剪断応力が作用することを考慮すると, 式(5)に対する応力・歪関係は, クラック面垂直方向を方向 3 とすれば, ミクロ座標系で示すと式(6)に示すものになる. ここで, 式(6)中の  $r$  及び  $s$  は式(7)及び式(8)で表せる.

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{11}^{\omega} \\ \bar{\varepsilon}_{22}^{\omega} \\ \bar{\varepsilon}_{33}^{\omega} \\ \bar{\varepsilon}_{12}^{\omega} \\ \bar{\varepsilon}_{13}^{\omega} \\ \bar{\varepsilon}_{23}^{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E+r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G+s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G+s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{11}^{\omega} \\ \bar{\sigma}_{22}^{\omega} \\ \bar{\sigma}_{33}^{\omega} \\ \bar{\sigma}_{12}^{\omega} \\ \bar{\sigma}_{13}^{\omega} \\ \bar{\sigma}_{23}^{\omega} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r = \frac{16}{3} q a^3 \frac{1}{E'} \quad (7)$$

$$s = \frac{16}{3} q a^3 \frac{1}{(2-\nu)^2} \left\{ \frac{1}{E'} + \frac{(1-\nu)^2}{2G} \right\} \quad (8)$$

多軸応力下での材料の非線形挙動を解析する場合, 構成式はマクロ座標系で示されている必要があり, 上述のミクロ座標系における量は内部変数として扱われる. ミクロ座標の量とマクロ座標の量とを結びつける方法としては次の 3 つが考えられる.

### (1) 応力一定モデル

任意の方向を向いたクラックに等しい応力がかかるというモデルであり, 個々のクラックに生じる変形の体積平均がマクロな歪となるモデルである. 必然的に最も危険な方向を向いたクラックが存在することになり, 材料挙動はそれに支配される. このモデルの方程式を表 1 の 1 に, モデルの応答を図 2 (a) に示す. このモデルでは応力の急激な低下が生じ過度に不安定な挙動を示すので, 本研究の目的にはそぐわない.

(2)ひずみ一定モデル

このモデルは各クラックに等しい歪がかかるというモデルであり、個々のクラックに生じる応力の体積平均がマクロな応力となるモデルである。最も危険な方向を向いたクラックにはもっとも大きな非弾性歪が生じる。このモデルの方程式を表1の2に、モデルの応答を図2(b)に示す。このモデルではいったん大きなひずみが生じた後、再び線形応答を示すので、本研究の目的にはそぐわない。

(3)混合モデル

このモデルは前の2つのモデルを組み合わせたモデルである。まず、図3に示すようなお互いに直交するクラックを持つ下部構造を考える。この下部構造があらゆる方向に等確率で向いていると考え、下部構造の応答の平均がマクロな応答になるものとする。下部構造の応答には応力一定モデルを考え、下部構造の平均応答によってマクロの応答を表すときひずみ一定のモデルを考える。このようなモデルを多軸応力場における微視クラック分散モデルとして考える。即ち式(6)を図3に示す下部構造のそれぞれのクラックの方向を考えて適用し、下部構造の応答として式(9)を得る。式(9)中の $r_1, r_2, r_3$ および $s_1, s_2, s_3$ は、式(7)及び式(8)において $a$ の代わりに $a_1, a_2, a_3$ とおいて求められる。 $a_1, a_2, a_3$ は図3に示す各座標軸に垂直なクラックの半径である。このモデルの方程式を表1の3に、モデルの応答を図2(c)に示す。材料定数を適切に選択することにより、このモデルによって多孔質セラミックスの応力-ひずみ非線形挙動をシミュレートできると考えられる。

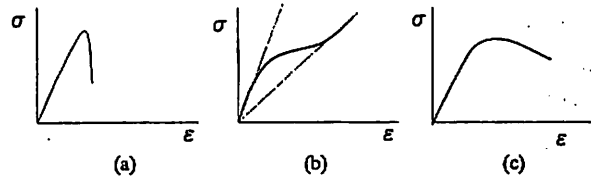


Fig.2 Response of models (a) Equally stressed model, (b) Equally strain model, (c) Combined model

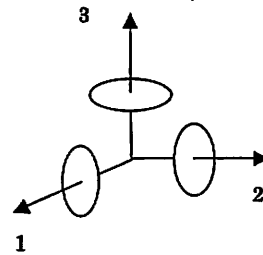


Fig.3 Crack system of substructure

Table1. Relation between micro and macro stress-strain field

1. Equally stressed model	$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^w$ $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \epsilon_{ij}^w d\omega$	
2. Equally strained model	$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^w$ $\sigma_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_{ij}^w d\omega$	
3. Combined model	$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^w$ $\sigma_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_{ij}^w d\omega$	
		$\sigma_{ij}^w$ and $\epsilon_{ij}^w$ are obtained from equally stressed model equations.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11}^w \\ \epsilon_{22}^w \\ \epsilon_{33}^w \\ \epsilon_{12}^w \\ \epsilon_{21}^w \\ \epsilon_{31}^w \\ \epsilon_{13}^w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E+r_1 & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E+r_2 & -\nu/E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E+r_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G+s_1+s_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G+s_2+s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G+s_3+s_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}^w \\ \sigma_{22}^w \\ \sigma_{33}^w \\ \sigma_{12}^w \\ \sigma_{21}^w \\ \sigma_{31}^w \\ \sigma_{13}^w \end{pmatrix} \quad (9)$$

3 材料パラメータの決定

3.1 初期クラック長さ、ヤング率、クラック密度の決定

前述の微視クラックモデルの有効性を確認する為、日本シューマツハ製多孔質 SiC セラミックス SL#5 (平均粒径 10 $\mu$ m, 気孔率 35%) を用いて実験と解析との比較を試みた。まず解析を実施するにあたり、微視クラックモデル内で使用されているパラメータを決定する必要がある。決めるべきパラメータとしては、

(1)微視クラック初期長さ $a_0$  (=ペニーシェイプ型クラックの半径), (2)材料自身(クラック部以外の母材)のヤング率 $E$ 及びポアソン比 $\nu$ , (3)クラック密度 $q$ , (4)式(10)に示す $R$ カーブ曲線における係数 $C$ と指数 $n$ である。

$$K_R = C(\Delta a)^n \quad (10)$$

ここで、 $\Delta a$ は初期き裂長さからの増分である。

初期クラック長さ  $a_0$  については、平均粒径が  $10 \mu\text{m}$  であることから、初期クラック長さの直径もそれとほぼ同等と考え、 $2a_0 = 10 \mu\text{m}$  とした。また材料自身即ちクラック以外の母材に相当する領域のヤング率  $E$  については、緻密質 SiC のヤング率が  $400 \text{ GPa}$  相当であることから、SL#5 の気孔率が  $35\%$  であることから、 $260 \text{ GPa} (=400 \times (1-0.35))$  とした。またポアソン比  $\nu$  に関しては、報告例の多い  $0.17^{(9)}$  とした。クラック密度  $q$  に関しては、微視クラック分散モデルを組み込んだ FEM 解析から得られる部材のヤング率が実験から得られる見かけのヤング率 ( $50 \sim 55 \text{ GPa}$ ) に等しくなるようにクラック密度  $q$  を与えた。その結果、 $q = 6 \times 10^{15} (1/\text{m}^2)$  に対し、見かけのヤング率  $52 \text{ GPa}$  を得て、この値をクラック密度の値とした。

### 3.2 Rカーブ曲線の導出

微視クラックモデルに用いる Rカーブ曲線を決定するため、中央部に切欠きを有する矩形型試験片の4点曲げ試験を行った。用いた材料は日本シューマッハ製の多孔質 SiC SL#5 である。試験片は、高さ  $8 \text{ mm}$  × 幅  $6 \text{ mm}$  × 長さ  $80 \text{ mm}$  の平滑材に、切り欠き深さ  $3 \text{ mm}$ 、切り欠き先端半径  $0.05 \text{ mm}$ 、フランク角  $20^\circ$  の切り欠きを導入した V ノッチ試験片である。図 4 に試験片形状を示す。試験片本数は 3 本である。

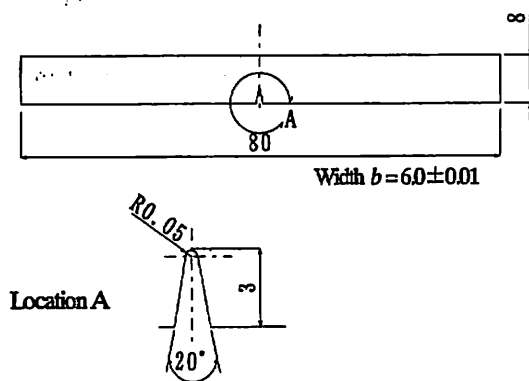


Fig.4 V notch specimen geometry

載荷方法は内スパン  $30 \text{ mm}$ 、外スパン  $60 \text{ mm}$  の4点曲げ試験法である。載荷速度は  $5 \mu\text{m}/\text{min}$  で、鷲宮製作所製の油圧サーボ式試験機 ST-05 を用いた。試験時に圧縮面となる表面中央部には、Rカーブ導出に必要なコンプライアンスを計測する為の歪ゲージを貼付し、試験中の歪計測を実施した。用いた歪ゲージは、共和電業製の単軸ひずみゲージ KFG-2-120C1-11L5M2R (ゲージグリッド長さ  $20 \text{ mm}$  × 幅  $1.2 \text{ mm}$ 、ベ

ース長さ  $63 \text{ mm}$  × 幅  $2.8 \text{ mm}$ ) である。

曲げ試験中に生じた最大荷重から算出した3本の試験片の平均破断強度は、 $65.2 \text{ MPa}$  であった。破断強度は以下の式(11)を用いて導出した。

$$\sigma_f = \frac{3P_{\max}(L-L_0)}{2bh^2} \quad (11)$$

ここで、 $P_{\max}$  は最大荷重、 $L$  は外スパン、 $L_0$  は内スパン、 $b$  は試験片幅、 $h$  は試験片高さである。図 5 には荷重と歪の関係を示す。図 5 に示した荷重-歪線図を用いて、試験片のコンプライアンス変化を求め、これからクラック進展量を計算し、Rカーブを導出した。ここで示した Rカーブ導出の具体的な手順については、文献 5) に詳説されている。図 6 には、求めたクラック進展量と  $K_R$  の関係を示す。図 6 中にプロットされている点が試験結果より得られたクラック進展量と応力拡大係数との関係である。また図 6 中の実線は、式(10)を用いて図 6 内に示す試験結果全ての点を使い、ひとつの回帰曲線を求めた結果である。得られた式(10)の係数  $n$ 、 $C$  はそれぞれ、 $0.109$ 、 $234 ( \text{MPa}(\text{m})^{0.3571} )$  となった。

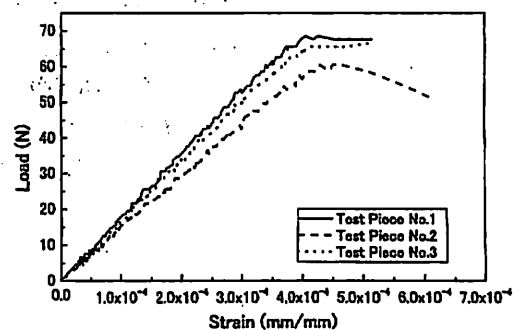


Fig.5 Stress-Strain relationship under 4 point bending for notched specimen.

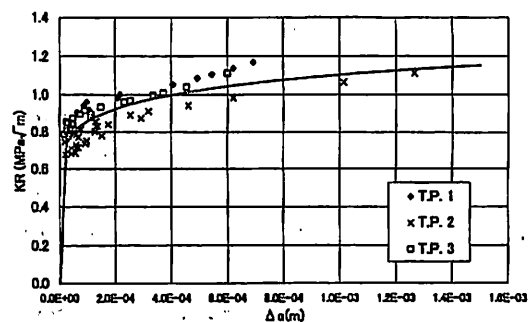


Fig.6  $K_R$  curve for porous ceramics

### 3.3 平滑材の3点曲げ及び4点曲げによる材料パラメータの検証

平滑材の3点曲げ及び4点曲げの応力-歪関係について、実験結果と微視クラック分散モデルによる解析結果との比較を行った。対象とする平滑材の寸法は、長さ 80mm×高さ 6mm×幅 8mm の矩形型で、3点曲げと4点曲げの曲げ強度試験を行い応力-歪線図を計測した。3点曲げおよび4点曲げ共に、外スパンは 60mm であり、4点曲げの内スパンは 30mm である。また用いた試験装置は前述の R-カーブ取得のためのものと同一であり、載荷速度は 50μm/min で行った。一方微視クラック分散モデルによる解析は、前述の材料パラメータ用い、表 1 の 3 で示す式を組み込んだ FEM で行った。

図 7 及び図 8 にはそれぞれ 3点曲げ及び 4点曲げの試験と解析から得られた応力-歪関係を示す。図中の実線が実験結果、点線および破線が微視クラック分散モデルによる解析結果である。

図 7 中に実線で示した試験結果は、試験片引張面中央部に貼り付けた歪ゲージの出力と公称の最大曲げ応力との関係を図示している。また点線で示した解析結果は、試験片引張面中央部の公称応力-真歪の関係 (Analysis1-1)、破線は同じ箇所の真応力-真歪の関係を示している (Analysis1-2)。図 8 も図 7 と同様であり、図中の実線が実験から得られた試験片引張面に貼付した歪ゲージの計測結果と公称応力との関係であり、点線が微視クラック分散モデルによる試験片中央部引張面の公称応力-真歪の関係である (Analysis2-1)。両図より、試験結果と解析結果は良く一致しており、微視クラック分散モデルによって多孔質セラミックスの非線形挙動がシミュレート可能であることを示している。

但し、前述の R-カーブ曲線のパラメータ C に関しては、試験から得られた結果が  $C = 2.34$  では試験結果と解析結果の両者を一致させることが出来なかったため、試行錯誤により C を変化させ、試験と解析が良く一致する C を求めた。その結果、 $C = 0.4$  とすることで、応力-歪線図の試験と解析の両者を一致させることができた。よって、本論文ではこれ以降  $C = 0.4$  とした。指数 n については、実験から得られた  $n = 0.109$  をそのまま用いた。

試験から得られた R-カーブのパラメータによつて 3点曲げ及び 4点曲げ試験が再現出来なかった理由は現在のところ明らかにできていない。しかしながら、今回の R-カーブ取得の為の試験片は、図 4 に示すように、深さ 3mm の初期ノッチが導入されている。一方

で、微視クラックモデルで解析する際に重要なのは、初期クラック長さ 10μm と同等なレベルの  $K_R$  特性であり、その領域での  $K_R$  と深さ 3mm の初期ノッチから得られる  $K_R$  特性、即ち式(10)における C や n が異なっていることが考えられる。

また図 7 の 3点曲げ試験結果と図 8 の 4点曲げ試験結果とを比較すると、僅かではあるが、3点曲げの試験及び解析結果の方が 4点曲げのそれより非弾性変形が大きい。4点曲げは、内スパン内の圧縮面・引張面双方に歪ゲージが添付できるものの、その中でマクロな弾性曲げ応力は一定であり、その領域のどこからクラックが発生・進行するか解らない為、添付した歪ゲージから遠い場所でクラックが発生・進行した場合は、歪ゲージ部で計測できる応力-歪関係は非弾性変形の少ないものになる可能性が高い。一方 3点曲げで試験を実施した場合は、高歪領域は載荷点近傍に集中する為、載荷点の引張側に歪ゲージを貼付すれば、安定的に非弾性変形を歪ゲージで検出しやすい。これらのことから、セラミックスの非弾性変形を評価する場合の試験方法としては、4点曲げよりも 3点曲げ試験の方が適していると考えられる。

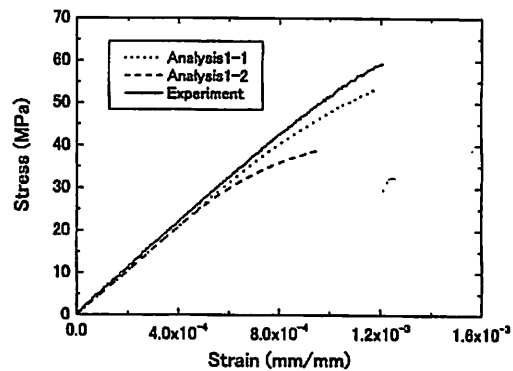


Fig.7 Stress-strain curves for 3 point bending test

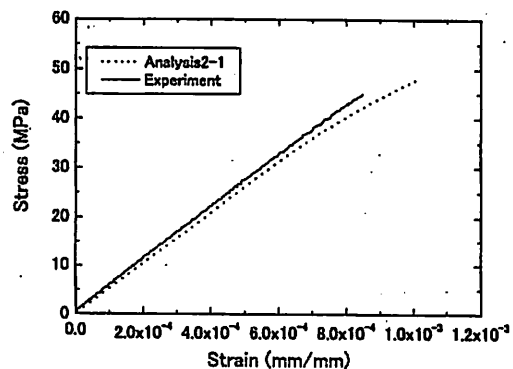


Fig.8 Stress-strain curves for 4 point bending test

## 4 応力集中部の影響について

## 4.1 Uノッチ材引張試験

応力集中及び多軸応力状態に対する微視クラック分散モデルの適用性を確認するため U ノッチ試験片を用いた引張試験と微視クラック分散モデルによる解析結果との比較をした。

図 9 には U ノッチ切欠き試験片を示す: 図中の U ノッチ底の半径  $R$  は  $R=1.0\text{mm}$  である. U ノッチ試験片を用いた引張試験は, 図 10 に示すスタビライザーを用い, クラックが安定的に成長できる条件下で応力-歪関係を計測した。

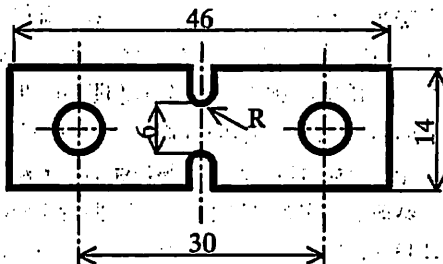


Fig.9 Geometry for tensile test specimen with U notch.

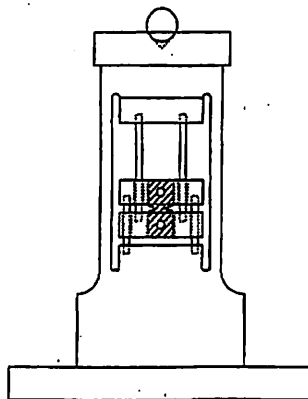


Fig.10 Stabilizer

本試験は, 図 10 に示すスタビライザー全体に対し, 試験機で圧縮荷重を負荷することで行った. 用いた試験機は島津製作所製 AUTOGRAPH AGS-10kNB である. 押し込み速度は  $50\mu\text{m}/\text{min}$  である. 試験機によりスタビライザー外側から圧縮荷重を負荷すると, スタビライザーの外側 2 本の柱が弾性的に圧縮され試験片にはその変形の変位が生じようとする. スタビライザーの柱の剛性は試験片のそれより大きいので試験片の破損・破断による剛性変化がスタビライザーと試験片を合わせたシステムに与える剛性に与える影響は少なく, これにより試験片に対し, ほぼ完全な変位制御による負荷を与えることができる。

図 11 に得られた応力-歪関係を示す. 図中の実線が試験より得られた応力-歪線図である. 一方の点線及び破線は表 1 の 3 で示した微視クラック分散モデルを組み込んだ FEM 解析から得られた応力-歪線図である。

FEM 解析を実施する際には図 9 に示す試験片の 1/4 モデルのメッシュを作成し解析を実施した. 作成した FEM メッシュ図を図 12 に示す。

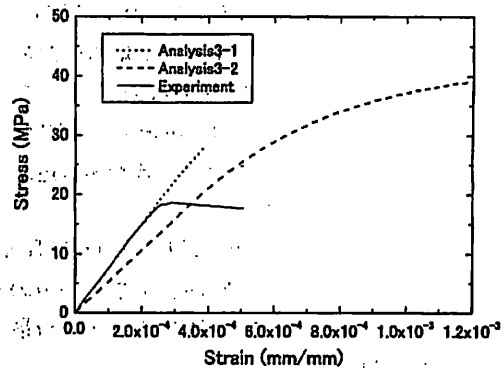


Fig.11 Stress-strain curves for tensile test with U notched specimen

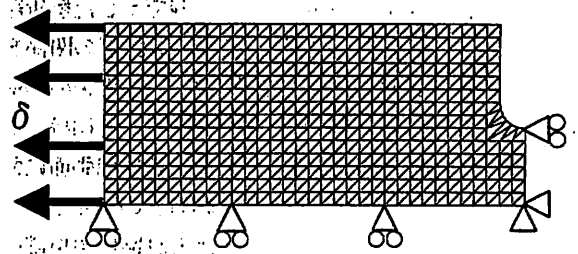


Fig.12 FEM mesh for U notched specimen

図 11 中の実線で示した試験結果の応力は最小断面部の公称応力, 歪は図 9 に示す試験片の最小断面部中央の表裏に貼り付けた歪ゲージの平均値である. 点線で示した解析結果の応力は最小断面部の公称応力, 歪は試験片中央部の要素の歪である (Analysis3-1). また参考として解析から得られる U ノッチ底の応力-歪線図を破線で示した (Analysis3-2)。

実線の試験結果は応力が  $20\text{MPa}$  程度で頭打ちになり, その後非弾性変形が進行する. 一方で点線の解析結果は  $20\text{MPa}$  以降も応力が上昇していることが解る。

この原因としては, 試験ではある一部に非弾性変形が集中することにより, 図 11 に示す挙動をとるが, 解析結果ではそのような現象は起きていないことを示している. これに関しては, 微視クラック分散モデルを用いた FEM 解析のメッシュサイズが, 非弾性変形の集中の影響を十分に考慮できている程度に細かいメッシュとなっているか等, 追加の検討を実施する必要

があると考えられる。

#### 4.2 切欠き材 4点曲げ試験

図 13 に示す片側切欠き材の 4 点曲げ試験についても実験と解析結果との比較を実施した。载荷条件は、外スパン 60mm, 内スパン 30mm, 载荷速度 50  $\mu$ m/min である。図 14 に試験及び解析結果を示す。図中の実線は試験片圧縮面に貼った歪ゲージ計測結果と公称曲げ応力, 点線は同じ箇所の解析結果である (Analysis4-1)。但し, 圧縮面で計測された歪は正負を反転し, 図示している。また参考として, 解析より得られる切欠き底の応力と歪の関係を破線で示す (Analysis4-2)。この切欠き材に関しても, 前の U ノッチ材同様に試験での破断強度は 40MPa 程度であるが, 解析ではそれより高いレベルまで応力が上昇する。この原因も前と同様に, 実験では非弾性変形が一部に集中している為と思われる。微視クラック分散モデルの FEM メッシュをより細かくすることで, 非弾性歪の局所化がより正確に表せられるものと思われる。

前述の U ノッチ試験片および切欠き材の曲げにおいて, 切欠き底の応力と歪の関係は非弾性挙動をすることが図 11, 図 14 よりわかる。しかし, 切欠き底の歪は, その計測が難しく, 現在のところ解析と比較する為の実験値が得られていない。

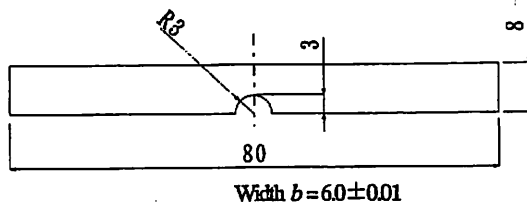


Fig.13 Geometry for 4 point bending notched specimen

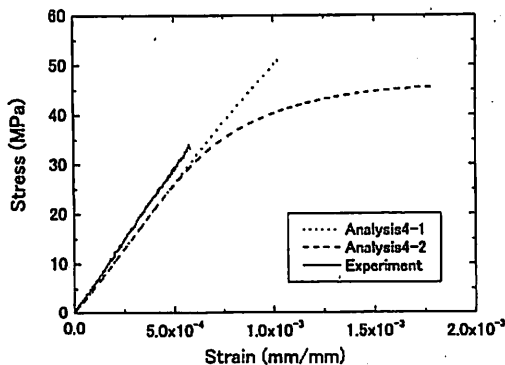


Fig.14 Stress-strain curves for 4 point bending test with notched specimen

#### 5 結論

セラミックスの非弾性変形を評価するツールとして微視クラック分散モデルを提案した。そのモデルから得られる応力-歪の関係と試験結果とを, 種々の試験条件下で比較した結果, 以下の結論を得た。

(1) 微視クラック分散モデルによって多軸応力場における多孔体セラミックスの応力-ひずみ非線形挙動の評価が可能である。

(2) 多孔体セラミックスなどの非線形挙動を評価する試験法としては, これまで緻密質のセラミックス強度評価で用いられてきた 4 点曲げ試験よりも, より非線形挙動を評価し易い 3 点曲げ試験が有望である。

#### 謝辞

本研究は経済産業省産業技術環境局が推進する「シナジーセラミックス」プロジェクトの一環として, NEDO の委託を受けて行われたものである。

#### 参考文献

- 1) 鈴木章彦, 馬場秀成, 材料, 50 巻, 3 号, 290(2001)
- 2) 鈴木章彦, 武正文夫, 馬場秀成, 日本機械学会第 15 回計算力学講演会論文集, No.02-2, 129(2002)
- 3) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 97(1976), 培風館
- 4) たとえば, 素木洋一, 入門ファインセラミックス製造技術, 82(1986), 技報堂出版
- 5) 田中啓介, 秋庭義明, 野村隆, 坂井田喜久, 日本機械学会論文集 A 編, 65 巻, 640 号, 2385 (1999)