

セラミックスの微小欠陥からの破壊強度のR曲線法による評価*

鈴木賢治*¹, 田中啓介*², 田中 拓*²Fracture Analysis of Ceramics with Small Defects Based
on R-Curve Method

Kenji SUZUKI, Keisuke TANAKA and Hiroshi TANAKA

Since the critical size of defects in ceramics is normally very small, the conventional method of fracture mechanics often becomes inappropriate. In the present paper, the fracture strength of silicon nitride with small defects is evaluated based on the *R*-curve method. Parameters of the *R*-curve of silicon nitride are determined from the experimental relationship between the fracture strength and the defect size. For penny-shaped cracks, the fracture strength is constant for small defects and the critical stress intensity factor is constant for large defects. The equivalent defect size is an excellent parameter for correlating the fracture strength with the size of elliptical cracks with an aspect ratio between 0.3 and 1. For small voids, the fracture strength is nearly the same as that for a penny-shaped crack. On the other hand, for large voids, it approaches a constant value which is equal to the strength of materials without voids divided by the elastic stress concentration factor. When the tip radius of long deep notches is small, the critical stress intensity factor for the fracture is independent of the tip radius. A Monte-Carlo simulation of bending fracture of silicon nitride was performed by random distribution of penny-shaped cracks with random sizes in a specimen by a computer. On the basis of twenty five runs of fracture simulation, the relationship between the bending strength and the defect size, and the cumulative distribution function of the fracture strength were successfully derived.

Key Words: Ceramics, Fracture Mechanics, Defect, *R*-Curve, Fracture Strength, Monte-Carlo Simulation

1. 緒 言

セラミックスの破壊靱性値は、金属材料に比較して十分の一以下となるため、一般に限界破壊欠陥寸法も0.1mmくらいと小さく、長いき裂の破壊力学はそのまま適用できない場合が多い。セラミックスの破壊は、微視組織の影響やき裂後方のウェイクの発達によりき裂進展抵抗が上昇する場合が多く、限界欠陥寸法の評価にも*R*曲線の特性を考慮することが必要である。

従来、工学的手法として欠陥先端よりある距離の点の応力が重要であるとする点応力モデル(Point stress model)⁽¹⁾、欠陥先端よりある距離の平均応力が重要とする平均応力モデル(Mean stress model)⁽²⁾、あるいは実際のき裂よりも少し長いき裂を考える仮想き裂モデル(Fictitious crack model)⁽³⁾⁽⁴⁾の3種類がよく用いられており⁽⁵⁾、これらのモデルはセラミックスのき裂長さとの関係性をうまく表現しているが、破壊の物理過程とは直接結びついてはいない。

本研究では、*R*曲線をもとにして、種々の欠陥から破壊するセラミックスの強度を予測する。まず、窒化

けい素の強度と欠陥寸法の間接関係をもとに*R*曲線の形状を決定し、それをもとに種々の欠陥の形状寸法が破壊強度に及ぼす影響を検討する。さらに*R*曲線を用いてセラミックスの欠陥からの破壊のモンテカルロ・シミュレーションを行い、セラミックスの曲げ強度の統計的性質について検討する。

2. R 曲 線 法

2.1 *R*曲線の形状 き裂の進展に伴う破壊抵抗の増加を次のような式で表す。

$$K_R = K_0 + K_m + K_s \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 K_0 はセラミックスの単結晶の破壊靱性値、 K_m は微視組織効果あるいは微視的応力の効果⁽⁶⁾⁽⁷⁾であり、 K_s はき裂の遮へい効果であり、Lawnらによるき裂後方のウェイクでのブリッジング⁽⁸⁾、Evansらの微視的割れ⁽⁹⁾や変態⁽¹⁰⁾などがその原因となる。

いま K_m を考えないとき、*R*曲線は図1のように表されるであろう。図に示されるように*R*曲線モデルは、き裂進展量 c が c_1 までは一定値 K_0 であり、さらなるき裂進展に伴い K_s が大きくなるが、やがて c_2 よりも大きくなると遮へい効果がき裂長さによらず定常となり K_0 が一定値になるモデルである。この*R*曲線の代表的な式を次に示す。

* 原稿受付 平成4年9月28日。

*¹ 正員, 新潟大学教育学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。*² 正員, 名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市中千種区不老町)。

$$K_R = K_0 + (K_\infty - K_0) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{c_2(c^2 - c_1^2)}{c(c_2^2 - c_1^2)} \right)^{1/2} \right]^3 \right\}$$

.....(2)

$$K_R = K_0 + (K_\infty - K_0) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{c - c_1}{c_2 - c_1} \right)^{1/2} \right]^3 \right\}$$

.....(3)

式(2), (3)はMai-Lawnによって粒架橋 (Grain bridging) を説明するために提案された式で, 式(2)は三次元き裂⁽¹¹⁾, 式(3)は二次元き裂の場合⁽¹²⁾である。ここで, Cookら⁽¹¹⁾の報告による多結晶アルミナの粒径 $d=20\ \mu\text{m}$, $c_1=40\ \mu\text{m}$, $c_2=420\ \mu\text{m}$, $K_0=1.73\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_\infty=4.08\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合の材料値を使って各R曲線の形を図2に示す。cが c_1 以下では K_0 を一定とした。

2.2 R曲線法におけるき裂進展条件 限界欠陥寸法およびき裂の進展の評価に際して, 本研究ではき裂進展力が K_R を越えたときに, き裂の進展が起こるものとする。例えば, 図3(a)のように, 長さ t の初期欠陥があり, そこからき裂 c が c_1 まで進展している場合を考える。ここで, 初期欠陥には架橋がないものとする。この時, き裂が進展するための最小応力は σ_1

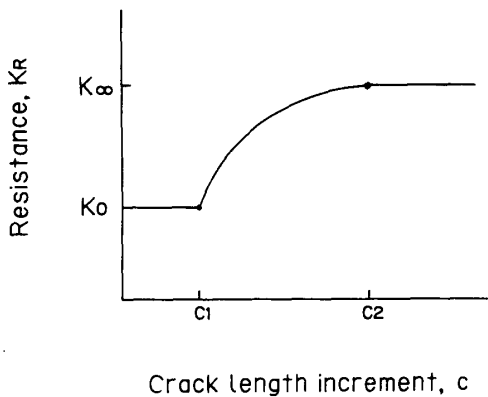


図1 R曲線

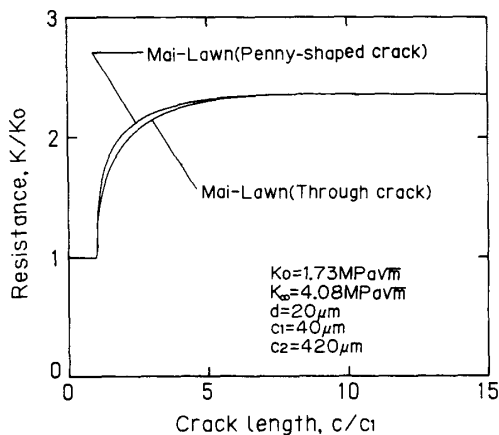
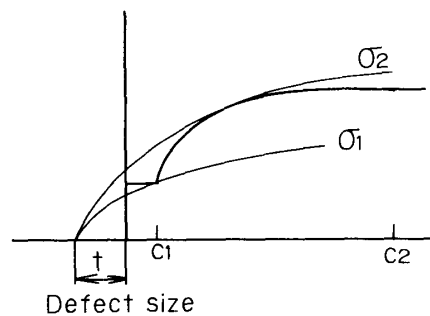


図2 種々のR曲線の式

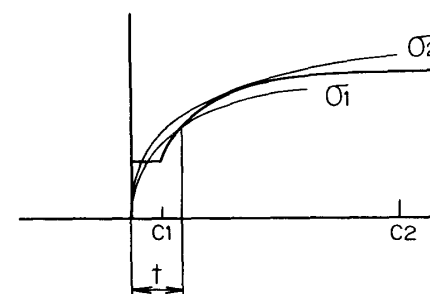
となる。さらに応力が増加するに従いき裂は安定成長を続け, 負荷応力が σ_2 に達すると, もはやき裂進展抵抗の増分よりも負荷応力拡大係数 K_A の増分のほうが大きくなり ($dK_R/dc \leq dK_A/dc$), 不安定破壊が発生する。この σ_2 が破壊強度であり, R曲線と σ_2 の接点のcが限界欠陥寸法を与える。図3(b)は初期欠陥にき裂遮へいがある場合であり, R曲線は欠陥寸法の位置から始まり, 同様に σ_1, σ_2 が決定される。

2.3 R曲線パラメータの決定 式(2), (3)に示されるR曲線の式の材料値は, c_1, c_2, K_0, K_∞ の計4個になる。これらのパラメータをすべて実験から直接的に決定することは现阶段では困難である。しかし, K_∞ はSEPB (Single pedge pre-cracked beam) 材による破壊靱性値を用いることができるであろうし, 残りのパラメータについては, 等価き裂長さと曲げ強さの実験結果から最適値を探索することにより, 実験結果に合致した値を求めることができる。

まず, 表1に示される機械的性質をもった常圧焼結窒化けい素から高さ3mm, 幅4mm, 長さ40mmの四点曲げ試験片を製作した。試験片の引張面はラップ研磨にて仕上げた。結晶粒は, 粒径 $1.2\ \mu\text{m}$ の針状晶であった。これらの試験片のうち5本を曲げ試験片として曲げ強さを求めた。そして破面観察により欠陥を同定し, 破壊起点を含むだ円にて応力拡大係数を求め等価き裂長さ⁽³⁾を計算した。残りの5本からSEPB材を



(a) 初期欠陥にき裂遮へいがない場合



(b) 初期欠陥にき裂遮へいがある場合

図3 R曲線法によるき裂進展の条件

作製し、破壊靱性値を求めた。その結果、曲げ強さの平均値は 748.5 MPa、破壊靱性値の平均値は 6.59 MPa \sqrt{m} であった⁽¹³⁾。

次に、窒化けい素のラップ材および SEPB 材の曲げ試験結果から、シンプレックス法⁽¹⁴⁾により最適な材料値を得る方法について述べる。R 曲線の形は決まっていけないので、窒化けい素の R 曲線としては三次元の式(2)を用いた。応力拡大係数の計算は、半円表面き裂を有するはりに曲げモーメントが作用する場合のものを用いた。K $_{\infty}$ の値は SEPB 材の破壊靱性値の平均値を使用して、残りの R 曲線パラメータは c₀, c₁, K₀となる。成分 c₀, c₁, K₀から任意に作られた初期シンプレックスベクトル V_i(i=1~4)を次式のように定義する。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1+f & 1 & 1 \\ 1 & 1+f & 1 \\ 1 & 1 & 1+f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ K_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、ここでは f=0.3 とした。(a)これらの V_iに

より得られた R 曲線と実験結果の誤差 R_iを求める。(b)誤差の大きい順に V₁から V₄と並び替える。(c)誤差の大きい V₁を他のシンプレックスベクトルによって作られる多角形の重心を通る線上で入れ換え、より最適な値 V_i'を得る(図4)。

$$V_i' = V_i + \beta(V_c - V_i) \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 β についてはその都度、鏡像($\beta=2$)、縮小($\beta=1.5$)、拡大($\beta=2.5$)の場合における誤差を計算して最も誤差の少ない β を選択する。ここで得られた V_i'を新たな V₁として、以上の(a)~(c)の手続きを繰返すことにより、パラメータが最適値に近づいていく。その結果、K₀=0.228 MPa \sqrt{m} 、K $_{\infty}$ =6.59 MPa \sqrt{m} 、c₁=4.98 μ m、c₂=17.6 μ m が得られた。

以上により得られた実験結果とシンプレックス法により得られたパラメータによる R 曲線による曲げ強さを図5に合わせて示す。図中の点が実験結果であり、曲線が得られた R 曲線パラメータにより半円表面き裂の場合について計算される結果である。実験結果と R 曲線による曲げ強度の予測がよく一致している。以下では、この材料値を基礎にして種々の欠陥からの破壊強度を予測する。

表 1 窒化けい素の機械的性質

Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Bulk density (g/cm ³)
298	0.268	3.22

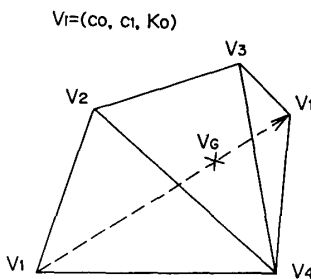


図 4 シンプレックスベクトル

3. 破壊強度の予測と検討

3-1 円き裂からの破壊 一様引張応力 σ 下の無限体中の半径 t の円き裂欠陥からの破壊を考えよう。この時の応力拡大係数は

$$K = \sigma\sqrt{\pi t} F \dots\dots\dots(6)$$

で与えられる。ただし、円き裂の修正係数は $F=2/\pi$ となる。等価欠陥寸法 t_{eq} は以下の関係から求められる。

$$K = \sigma\sqrt{\pi t_{eq}} = \sigma\sqrt{\pi t} F \dots\dots\dots(7)$$

$$t_{eq} = tF^2 \dots\dots\dots(8)$$

また、不安定破壊する時の応力拡大係数 K_c は次式に

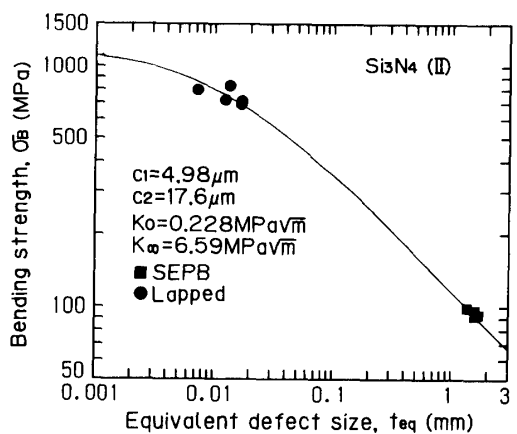


図 5 R 曲線パラメータの決定

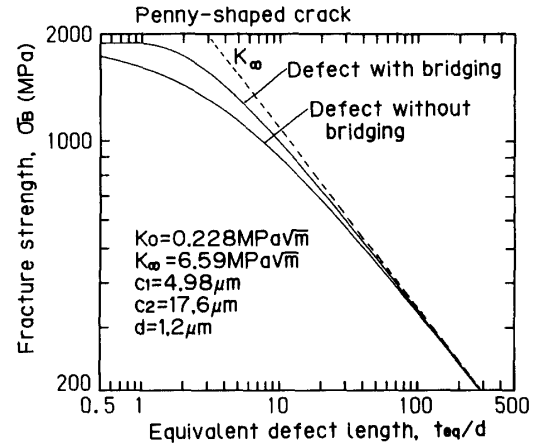


図 6 初期欠陥がき裂遮へい効果をもつ場合

て表される。

$$K_c = \sigma_B \sqrt{\pi t} F \dots\dots\dots (9)$$

先ほど求めた材料値を使い具体的に等価欠陥寸法と破壊強さを計算した結果を図6に示す。図中の d は実験に用いた窒化けい素の結晶粒径である。ここでは、初期欠陥がき裂の遮へいに寄与する場合⁽¹⁵⁾とそうでない場合について計算した。初期欠陥がR曲線特性に寄与する場合は、初期欠陥内での遮へい効果があるので、寄与しない時よりも微小欠陥での破壊強度が大きくなる。いずれの場合も等価き裂で長さが短くなるに従い、長いき裂の $K_c = K_\infty$ の関係からはずれ、微小欠陥から破壊するセラミックスの破壊強度の特徴と一致している。また、初期欠陥をき裂の遮へい効果に含めた場合は、小さな欠陥については c_1 でのき裂進展とともに不安定破壊が生じてしまう結果、破壊強度が一定になっている。

R曲線における c_2 の影響をみるために、種々の値に c_2 を変化させた場合の計算結果を図7に示す。ここでは初期欠陥はき裂遮へいが無いものとしている。 c_2 が大きくなると、小さな初期欠陥における破壊強度が小さくなるのがわかる。さらに、長いき裂の K_∞ に一致する欠陥寸法は大きくなる。

3・2 だ円欠陥からの破壊 無限体中にある一様応力下のだ円き裂について、だ円のアスペクト比 t/l (短軸方向き裂半長 t , 長軸方向き裂半長 l) を変えながら、引張強度と等価欠陥寸法の関係を求めた。その結果を図8に示す。応力拡大係数の算出に際して $F = 1/E(k)$ とした。ただし、 $E(k)$ は第二種完全だ円積分、 $k = \sqrt{1 - (t/l)^2}$ である。ここでは、長軸方向と短軸方向の応力拡大係数を比較しながら、大きいほうを独立に逐次進展させている。だ円欠陥寸法を等価き裂長さで

整理した場合、図8に示されるようにアスペクト比が0.3~1.0の範囲で破壊強度と等価欠陥寸法の関係に対して、アスペクト比は影響を与えない。このことは、セラミックスの破壊強度を破壊起点を含むだ円で近似して、等価き裂長さで整理することの有効性に対する理論的根拠を与えるものである。

3・3 球形ポイドからの破壊 R曲線法による破壊基準を球形ポイドからの破壊に応用する。無限体の一様応力下において球形のポイドの赤道に環状き裂がついている場合の応力拡大係数は、Barattaら⁽¹⁶⁾によって次式で与えられている。

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \left[1.12 - 0.31 \tan^{-1} \left(\frac{c}{t} \right) \right] \times \left\{ 1 + \frac{1}{2(7-5\nu)} [(4-5\nu)\rho^3 + 9\rho^5] \right\} \dots\dots (10)$$

$$\rho = \frac{1}{1+c/t}$$

ただし、 t は球形ポイドの半径であり、 c は環状き裂の長さである。

また、同様に球形ポイド赤道に半円き裂がついている場合の応力拡大係数は、Evansら⁽¹⁷⁾によって与えられている。

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \frac{2}{\pi} \left[1 + (K_t - 1) \frac{1}{1+c/t} \right] \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 K_t は球形ポイドの応力集中係数であり、ポアソン比 ν の関数である。

$$K_t = \frac{27-15\nu}{14-10\nu} \dots\dots\dots (12)$$

球形ポイドから成長する時の等価欠陥寸法は、ポイドの半径を t とし $t_{eq} = tF^2$ とした。修正係数 F は円き裂のもの ($F = 2/\pi$) を用いた。なお、計算では $\nu = 0.268$ としたが、この時 $K_t = 2.03$ となる。

これらの計算結果を図9に示す。セラミックスでは

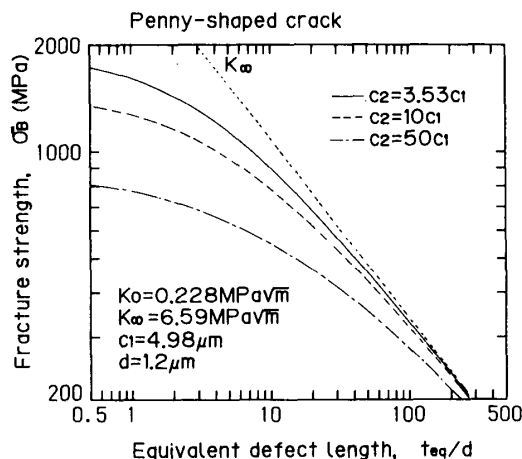


図7 c_2 と破壊強度の関係

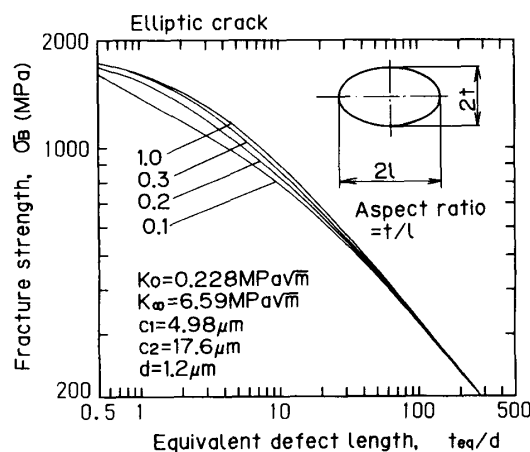


図8 だ円欠陥からの破壊

ポイドを起点として破壊が発生するケースが多い。この時のポイド起点からのき裂発生の様式は、ポイド寸法の大きさによるものと考えられる。すなわち、小さいポイドからの破壊では、ポイドに比べて限界き裂寸法が大きくなるので、Barattaの式に近くなる。それに対して大きいポイドでは、ポイドに比べて限界き裂長さが小さいのでEvansの式に近くなる。図からわかるように球形ポイドが小さい場合は、円き裂からの破壊にほぼ等しい。またポイドが大きくなるに従い、Barattaの式による破壊はポイドのない表面からのき裂成長に近づき、Evansの式による破壊は球の応力集中部にあるき裂に相当する結果を与える。大きいポイドからの両者の破壊強度の比は、 K_t に近づいていく。

3.4 だ円孔からの破壊 だ円切欠底からき裂が発生して破壊する問題を検討する。一様応力下の無限板中に存在する貫通だ円孔からき裂が進展して破壊する場合である。切欠きから成長したき裂 c が、短い場合は切欠半径 ρ の影響を考慮して⁽¹⁸⁾

$$K_A = \sigma \sqrt{\pi c} \frac{1.122 K_t}{\sqrt{1 + 4.5c/\rho}} \dots\dots\dots (13)$$

を用いた。また、き裂 c が長い場合はき裂半徑長を $c + t$ とした次式のき裂の解を使用した。

$$K_B = \sigma \sqrt{\pi(c+t)} \dots\dots\dots (14)$$

実際には、 $K_A = K_B$ になる最小のき裂長さ c^* として、 $c < c^*$ の時 K_A を使用し、 $c > c^*$ の時 K_B を使用した。これらの応力拡大係数の式を使って破壊強度をR曲線法により評価した。図10に破壊時の応力拡大係数に与える切欠きの曲率半径 ρ の影響を示す。この場合の応力拡大係数 K_ρ の計算は、切欠き長さをき裂として次式で評価した。

$$K_\rho = \sigma_B \sqrt{\pi t} \dots\dots\dots (15)$$

なお、だ円孔の半長 t は 10 mm とした。 $\sqrt{\rho/d}$ が小さくなると、 K_ρ は破壊靱性値に近づいていく。このように切欠きが鋭くなるに従い破壊靱性値が一定値に近づくことは、実験結果⁽¹⁾⁽¹⁹⁾ でも示されている。また c_2 が大きいほど、 K_ρ 一定値となる切欠半径の領域が大きくなる。

4. モンテカルロ・シミュレーション

4.1 シミュレーションの方法 谷口ら⁽²⁰⁾の曲げ強度のモンテカルロ・シミュレーションの方法にならない、R曲線法の破壊基準による窒化けい素のシミュレーションを行った。本研究では、初期欠陥の形状は円とし、その半径 t を次のような累積分布関数⁽²¹⁾に従うものとした。

$$G(t) = 1 - \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-w} \dots\dots\dots (16)$$

この累積分布関数 $G(t)$ に対して逆変換法により欠陥寸法を与えた。つまり、零から1の範囲で一様乱数を発生させ、その乱数に相当するき裂半径 t の値を式(16)の関係から求めた。

初期欠陥の累積分布関数 $G(t)$ のパラメータ w , t_0 および欠陥密度 q は、材料の欠陥分布についての正確な与え方がないので、とりあえず経験的に決定した。はじめに $t_0 = 8 \mu\text{m}$, $q = 3/\text{mm}^3$ として $w = 2 \sim 6$ の範囲で1おきに変化させワイブル分布および曲げ強さと等価き裂長さの関係から窒化けい素の曲げ試験に近い $w = 4$ を選んだ。次に $w = 4$, $q = 3/\text{mm}^3$ として $t_0 = 6 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲で $1 \mu\text{m}$ おきに変化させてシミュレーションを行い、実験結果に近い $t_0 = 7 \mu\text{m}$ を得た。最後に、 $t_0 = 7 \mu\text{m}$, $w = 4$ として $q = 3, 5, 8/\text{mm}^3$ についてシミュレーションを行い、 $t_0 = 7 \mu\text{m}$, $w = 4$ および欠陥密度 $q = 5/\text{mm}^3$ とした。

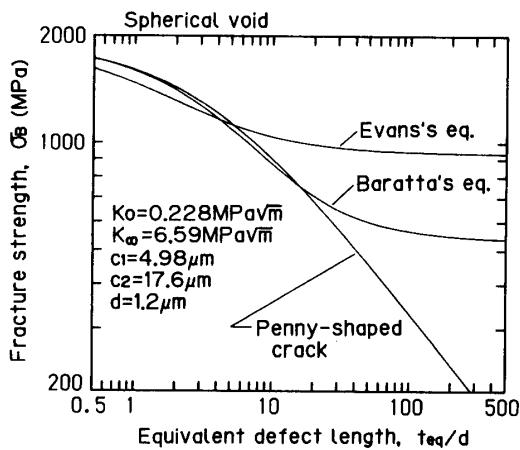


図9 球形ポイドからの破壊

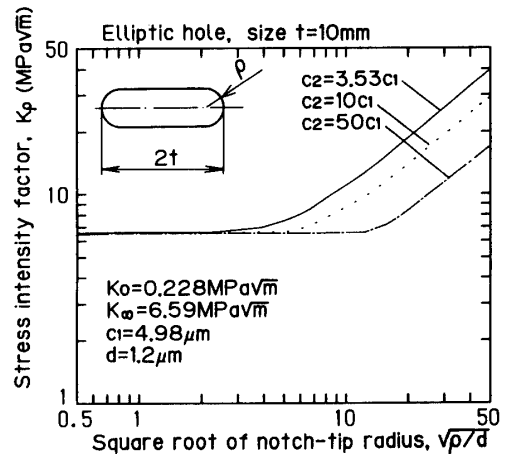


図10 だ円孔からの破壊

試験片は四点曲げ試験されたものとして、内側スパン間隔 20 mm, 高さ 3 mm, 幅 4 mm の空間に欠陥の

座標位置を設定し, x, y, z 方向の座標は一様乱数により決定した。

欠陥の位置と大きさの関係から初期欠陥を含む円で近似した後, 表面き裂, 内部き裂, 角き裂の3種類の破壊モードで応力拡大係数 K を算出した。 K の算出方法は前報⁽³⁾ と同じ方法を用いた。

初期欠陥は R 曲線特性には含めないものとした。 表面, 角の欠陥からのき裂進展は, 図 11 に示される A と B の位置の曲げ強さを比較して小さいほうを微小進展させて, き裂のアスペクト比を変更させながら逐次安定成長させた。 また内部き裂の場合は, 円き裂の A と B の曲げ強さを比較して小さいほうへ, 円の形状を保ちながらき裂を安定成長させた。 内部欠陥が表面に達した場合, それを含む半円表面き裂として扱い, 継続して安定成長させた。 このようにして欠陥から進展する中で, 最大の曲げ強さをその欠陥から破壊する時の曲げ強さとした。 これらの曲げ強さの計算を各欠陥で行い, その試験片の中で, 最小の曲げ強さの欠陥から試験片の破壊が起こるものとした。

窒化けい素の R 曲線法の材料値としての K_{∞} は, SEPB 材の実験値を用いた。 その他の c_1, c_2 および K_0 については, 前述のように窒化けい素のラップ材の曲げ試験の実験結果をもとにしてシンプレックス法により決定した最適値を用いた。

4.2 シミュレーション結果 欠陥分布とシミュレーションの例を図 12 に示す。 図では, 長手方向の位置に関係なく試験片のすべての欠陥を断面内に表示した。 圧縮側は破壊に寄与しないので図では初期欠陥の位置のみを表示している。 実線による円が初期欠陥で

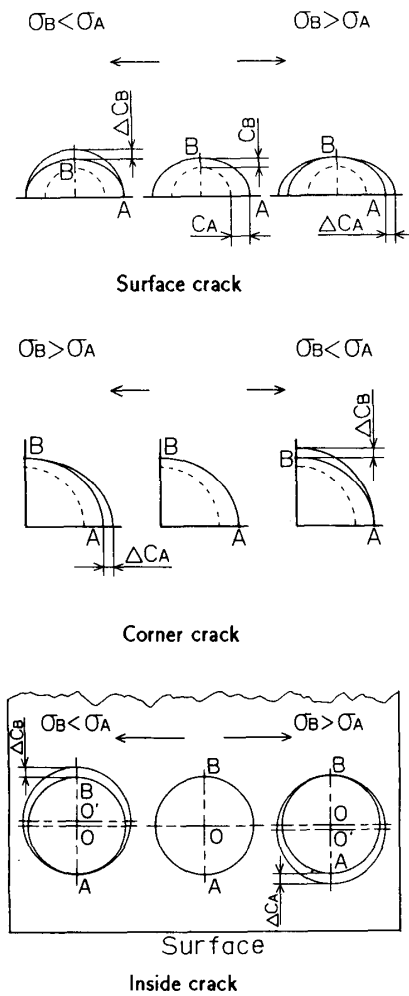


図 11 き裂進展の評価

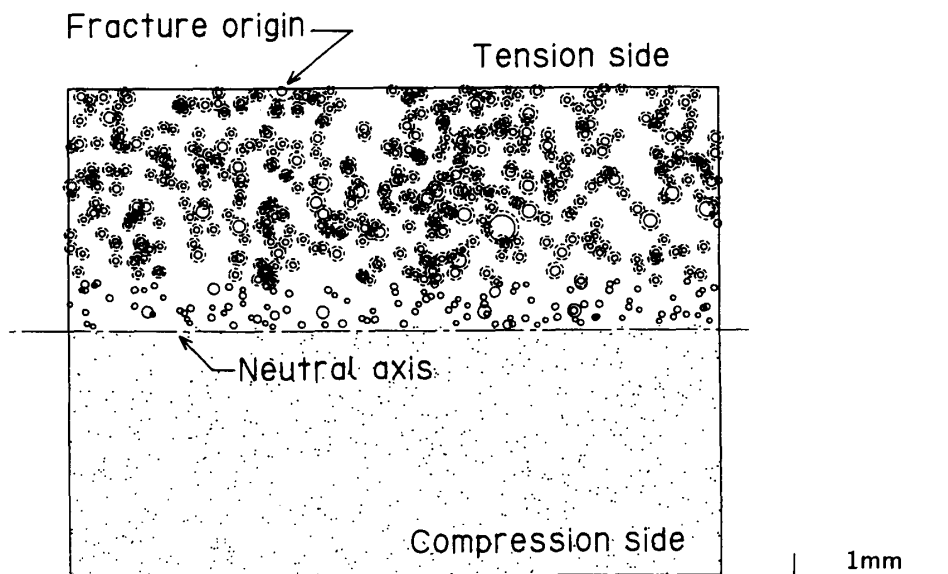


図 12 モンテカルロ・シミュレーション例(欠陥は 2.2 倍に拡大して示している)

あり、破線は安定成長後に不安定破壊した時のき裂を示している。なお欠陥を見やすくするために、欠陥については2.2倍に拡大してある。そのために、表面近くの欠陥の表示が試験片の断面からはみ出している。この試験片の破壊起点は、表面に近い内部欠陥であったが、安定成長して表面き裂になってから破壊している様子がわかる。

以上のようなモンテカルロ・シミュレーションを25本の試験片について行った結果が図13である。図中には窒化けい素のラップ材とSEPB材による実験データも合わせて示している。また、R曲線の材料値を用いた曲げ強度の予測線を実線にて示している。この図からわかるように、実験結果、予測線およびシミュレーション結果がよく一致しており、R曲線法の破壊基準によりセラミックスの曲げ強度と等価き裂長さの関係を説明できた。

図14にワイブル分布を示す。図中の黒丸印は窒化けい素の実験点であり、白丸印がモンテカルロ・シミュレーション結果である。ワイブル係数 $m=6.41$ 、尺度母数 $\alpha=866$ MPaであった。大きな表面欠陥による低い曲げ強さのデータが1個あり、ワイブル係数が小さくなっている。最も曲げ強さの小さい曲げ試験データははずすと、 $m=10.2$ 、尺度母数 $\alpha=860$ MPaとなる。

実験結果のサンプル数は5本であるので、直接的に比較はできないが、窒化けい素の実験結果では $m=10.7$ 、尺度母数 $\alpha=779$ MPaであり、ワイブル係数は最も低い曲げ強さのデータを除いたものと等しい。尺度母数に少し違いがあり、さらに検討を加える必要がある。

他の多数のサンプルによる窒化けい素曲げ試験のワイブル分布の特徴では、平均曲げ強さに比べて非常に低い曲げ強度のものがあること、それにより低強度の

部分ではワイブル分布から外れること、が指摘されている⁽²²⁾。今回の低い曲げ強さのデータもこれらの特徴と一致している。

なお、モンテカルロ・シミュレーション結果の破壊起点を整理したところ、表面破壊13個、内部起点から安定成長して表面破壊したもの5個、内部破壊7個であった。実験による窒化けい素は5本のうち3本が表面破壊、2本が内部破壊であった。

本研究では静疲労によるき裂進展は考慮しなかったが、この場合も本研究でのR曲線法を拡張することによって取扱うことが可能であると考えられ、今後の課題としたい。

4. 結 言

R曲線法により各種欠陥からのセラミックスの破壊強度を予測し、実際のセラミックスの破壊特徴と比較、検討した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 円状予き裂からの破壊において、大きい欠陥では破壊靱性値一定となり、微小欠陥では曲げ強さが一定になるセラミックスの破壊特徴が導かれた。また、円欠陥のアスペクト比を変化させながら破壊強度と等価き裂長さの関係を検討したところ、アスペクト比1.0~0.3の範囲においてアスペクト比による破壊強度の差がほとんどなく、破壊起点を円近似する等価き裂長さの整理の妥当性を証明できた。

(2) 球形ポイドからの破壊を検討した。その破壊機構は、小さいポイドでは円き裂からの破壊に近くなり、大きいポイドポイドでは欠陥のない場合の応力集中部からの破壊に近づく。また、平板中の貫通円孔からの破壊については、切欠きが鋭くなるに従い破壊靱性値が一定値に近づいた。

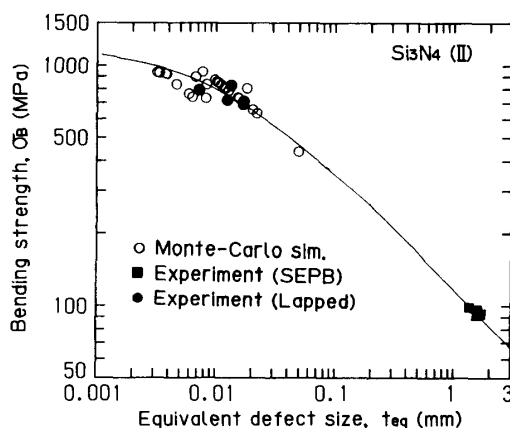


図13 曲げ試験とシミュレーション

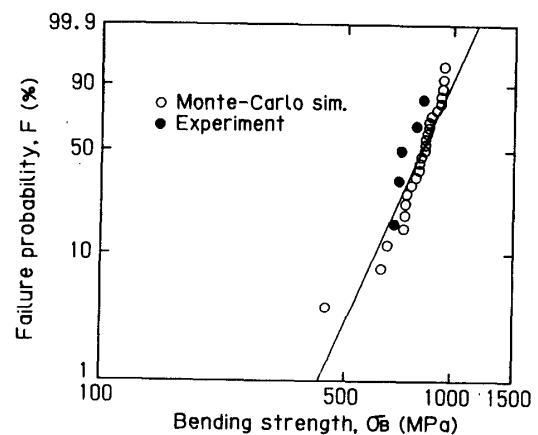


図14 ワイブル分布

(3) 窒化けい素の曲げ試験データからシンプレックス法によりR曲線のパラメータの最適値を求め、それをもとにモンテカルロ・シミュレーションを行った。曲げ強さと等価き裂長さの関係および曲げ強度の統計的性質について、計算結果と実験結果はよく一致した。

文 献

- (1) Usami, S., Kimoto, H. and Shida, S., *Eng. Fract. Mech.*, **23** (1986), 745.
- (2) 宮田・中門・木本, 日本材料強度学会誌, **21** (1986), 45.
- (3) 鈴木・田中・山本・中川, 材料, **38** (1989), 582.
- (4) Hoshide, T. and Inoue, T., *Eng. Fract. Mech.*, **38** (1991), 307.
- (5) Tanaka, K., *Int. J. Fract.*, **22** (1983), R 39.
- (6) Rice, R. W., Freiman, S. W. and Mecholsky, J. J. Jr., *J. Am. Ceram. Soc.*, **63** (1980), 129.
- (7) Evans, A. G., 文献(6)の115ページ.
- (8) Swanson, P. L., Fairbanks, C. J., Lawn, B. R., Mai, Y.-W. and Hockey, B. J., *J. Am. Ceram. Soc.*, **70** (1987), 279.
- (9) Evans, A. G. and Faber, K. T., *J. Am. Ceram. Soc.*, **67** (1984), 255.
- (10) Swain, M. V. and Rose, L. R. F., *J. Am. Ceram. Soc.*, **69** (1986), 511.
- (11) Cook, R. F., Fairbanks, C. J., Lawn, B. R. and Mai, Y.-W., *J. Mater. Res.*, **2** (1987), 345.
- (12) Mai, Y.-W. and Lawn, B. R., 文献(8)の289ページ.
- (13) 鈴木・田中, 材料, **40** (1991), 818.
- (14) Nelder, J. A. and Mead, R., *Comput. J.*, **7** (1965), 308.
- (15) Bennison, S. J. and Lawn, B. R., *Acta. Met.*, **37** (1989), 2659.
- (16) Barrata, F. I. and Parker, A. P., *Fract. Mech. Ceram.*, **5** (1983), 543.
- (17) Evans, A. G., Biswas, D. S. and Fulrath, R. M., *J. Am. Ceram. Soc.*, **62** (1979), 101.
- (18) Lukáš, P. and Klesnil, M., *Mater. Sci. Eng.*, **34** (1978), 61.
- (19) Awaji, H. and Sakaida, Y., *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** (1990), 3522.
- (20) 谷口・北住・山田, 文献(3)の1428ページ.
- (21) 市川, 機論, **51-471, A** (1985), 2368.
- (22) 伊藤・酒井・伊藤, 材料, **30** (1981), 1019.