

# 331 セラミック材料における強度の欠陥寸法依存性に関する考察と数値シミュレーション

京都大学工学部 正 〇星出 敏彦 , 京都大学工学部 前田 圭一郎  
 京都大学工学部 正 井上 達雄

## 1. 緒 言

セラミックスにおける強度と破壊起点である潜在欠陥の寸法との関係については、欠陥寸法が小さくなると破壊じん性値  $K_{Ic}$  一定の条件から予測される強度よりも低強度になる<sup>1), 2)</sup> という問題がある。この問題に関しては、欠陥の破壊力学的な寸法を意味する等価き裂長さ  $l$  に微小欠陥の補正長さ、すなわち特性等価き裂長さ  $l_0$  を加えた仮想的なき裂長さを考えるという取扱いがなされている<sup>2)</sup>。この手法は簡便で使い易いため工学的には有用であるが、 $l_0$  の物理的意味や実験結果のばらつきを表せないなどの問題点を残している。そこで、本研究においては、まず既存のデータを用いて  $l$  と破壊応力  $\sigma_r$  との関係について、 $l$  の評価法も含めて再検討した。さらに、欠陥境界層<sup>3)</sup> の概念を用いて、円板型き裂の2次元分布を想定したモンテカルロ・シミュレーションを行い、 $\sigma_r$  と  $l$  の関係における問題点について統計的観点から考察した。

## 2. 破壊強度と欠陥寸法との関係

### 2.1 各種材料における関係

部分安定化ジルコニア(PSZ)、常圧焼結窒化ケイ素( $Si_3N_4$ )、純度が96%と92%のアルミナ( $96\%Al_2O_3$ ,  $92\%Al_2O_3$ )の3点曲げ試験、ならびに $Si_3N_4$  の円環圧縮試験で得られた既存のデータから、 $l$  と  $\sigma_r$  の関係について考察する。各材料の強度特性を Table 1 に示す。

ここで、 $l$  は、破壊起点となった潜在欠陥をその破面における断面形状と同じ形状のき裂とみなして、

$$l = a M_0^2 = (K/\sigma)^2 / \pi \quad (1)$$

で定義する。なお、 $\sigma$  は最大引張応力、 $a$  はき裂の代表寸法、 $M_0$  はき裂の位置、形状に対する応力拡大係数  $K$  の補正係数で数値解<sup>4)~7)</sup> から得られる。ただし、実際の欠陥形状は必ずしも幾何学的に理想的な形状ではないため、欠陥に外接および内接する円き裂のそれぞれについて計算される  $l$  の平均値として  $l$  を求めた。

さて、Fig.1 に各材料における  $l$  と  $\sigma_r$  の関係を示す。図中の実線は、次式の  $K_{Ic}$  一定の関係を表す。

$$K_{Ic} = \sigma_r (\pi l)^{1/2} \quad (2)$$

いずれの場合も、 $l$  が小さくなると  $K_{Ic}$  一定の関係よりも低強度側にデータ点が移行する。この傾向に関し

ては、材料に固有の特性等価き裂長さ  $l_0$  を用いて

$$K_{Ic} = \sigma_r \{ \pi (l + l_0) \}^{1/2} \quad (3)$$

の関係で表す手法が提案されている<sup>2)</sup>。Fig.1 の破線は、PSZ,  $Si_3N_4$ ,  $96\%Al_2O_3$  および  $92\%Al_2O_3$  のそれぞれの実験データの傾向を表すように設定した  $l_0 = 3, 10, 15, 20 \mu m$  を式(3)に代入した関係を示す。なお、式(3)は、 $\sigma_r$  と  $l$  との一義的な関係を表しているため、実験データの大きなばらつきについては説明できない。

また各材料の  $l_0$  を比較すると、 $K_{Ic}$  または静的強度が小さな材料ほど  $l_0$  を大きく設定する必要があるといえる。ここで、平均強度  $\bar{\sigma}$  を用いた等価き裂長さ

$$l^* = (K_{Ic} / \bar{\sigma})^2 / \pi \quad (4)$$

を新たに定義し、 $l_0$  との関係を図.2 に示す。なお、図にはサイアロンの円環圧縮試験で得られたデータ<sup>8)</sup> も含めている。 $l_0$  と式(4)の間にはよい相関がみられるので、 $l_0$  は式(4)から推定できる可能性がある。

### 2.2 欠陥面積を用いた $l$ の評価

$l$  の評価にあたっては、欠陥形状が複雑であるため、欠陥の外接円き裂および内接円き裂の  $l$  の平均値を採用した。したがって、このような欠陥寸法と破壊応力との関係を議論する場合、 $l$  の評価法に関する吟味も必要となる。ここで、一様引張応力場における面積  $A$  の任意形状の表面き裂の最大応力拡大係数  $K_{max}$  は、

$$K_{max} \approx 0.650 \sigma (\pi A^{1/2})^{1/2} \quad (5)$$

のように表示できることが提案されている<sup>9)</sup>。

そこで、上式から得られる等価き裂長さ

$$l = 0.650^2 A^{1/2} \quad (6)$$

を用いて、強度と欠陥寸法との関係を検討する。ここでは、特に  $Si_3N_4$  において観察された表面き裂について、画像処理によって求めた  $A$  を用いて  $l$  を評価した。

Table 1 Mechanical properties of materials used.

Material	Young's modulus E (GPa)	Fracture toughness $K_{Ic}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	3pt-bending strength	
			Mean $\bar{\sigma}$ (MPa)	Standard deviation (MPa)
PSZ	218	6.0	1126	87
$Si_3N_4$	330	5.7	834	92
96% $Al_2O_3$	349	3.6	414	42
92% $Al_2O_3$	290	3.2	302	52

Fig. 3 にその強度との関係を示すが、図中の実線は式(2)の関係を、破線は式(3)の関係を表す。この場合も強度の欠陥寸法依存性は消失しないことがわかる。

### 3. 欠陥分布のモデル化と数値シミュレーション

#### 3.1 欠陥境界層

セラミックスでは、最終破断以前にも比較的大きなAEエネルギーの検出が報告されている<sup>3), 10)</sup>。このことは、最終破断以前のき裂成長の存在を示唆してい

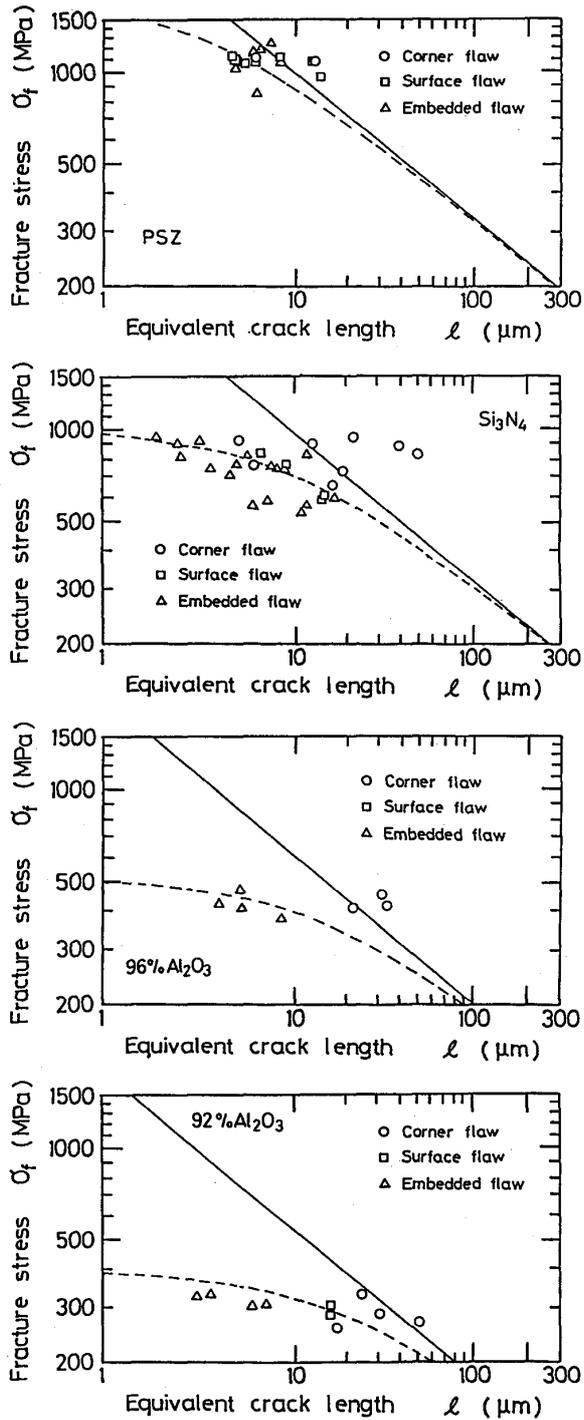


Fig. 1 Relation between strength and flaw size.

る。このような実験事実から、欠陥周囲に存在する材料組織に関連した不規則形状の層、欠陥境界層(flaw boundary layer)の概念<sup>3)</sup>が提案されている。Fig. 4の斜線部で模式的に示す欠陥境界層は、周囲のマトリックスよりも結合力が低いと考え、そのため負荷過程の途中でまずこの層が分離すると仮定する。この仮定のもとでは最終破断以前に初期欠陥からき裂が成長することになり、初期の欠陥寸法から推定される強度よりも低強度になる。なお、欠陥境界層の厚さ $\delta$ は、個々の欠陥に応じて異なると考えられるが、第一次近似として初期欠陥の周囲で一様であると仮定する。

#### 3.2 欠陥のモデル化とシミュレーション法

本シミュレーションでは実際の試験片中では3次元的に分布する欠陥を試験片の2次元断面内に分布する

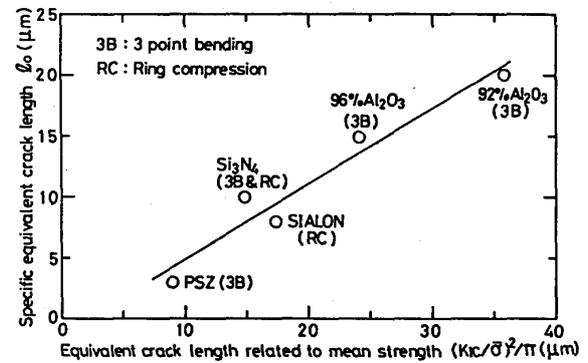


Fig. 2 Correlation of specific length  $l_0$  to crack length related to mean strength.

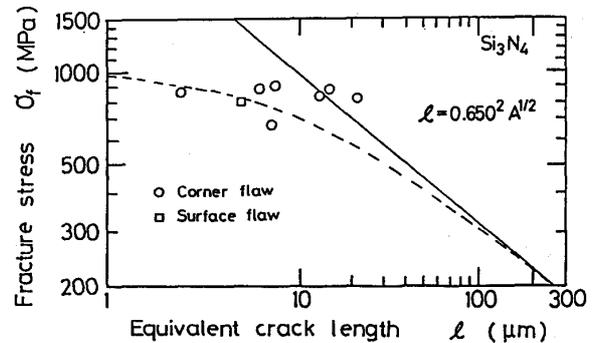


Fig. 3 Relation between strength and flaw size evaluated by using area of flaw.

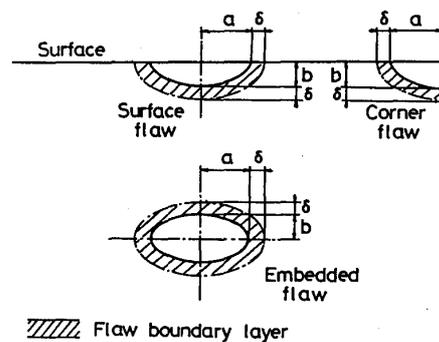


Fig. 4 Illustration of flaw boundary layer.

円板型き裂としてモデル化する。このき裂分布は、焼成段階において形成される潜在き裂の分布と研削加工によって形成されるき裂の分布の重ね合わせとして与えられるものとする。なお、潜在き裂の密度は単位断面積当りの個数で、一方加工損傷によるき裂の密度はき裂の生成が表面加工に伴うことから分布を試験片の表面上に限定して単位表面長さ当りの個数で定義する。

また、個々のき裂の位置は、乱数を用いてき裂の中心座標を与えることによって決定する。き裂半径につ

いてはその累積確率が3母数ワイブル分布に従うものとして与える。なお、この分布の各係数は、材料やき裂の生成過程に応じて異なるものとし、それぞれ経験的に設定する。個々のき裂は、中心から試験片表面までの距離とき裂の半径の相対的關係に応じて、内部き裂と表面き裂に分類する。さらに、表面き裂は半楕円き裂と1/4楕円き裂(隅き裂)に分類する。

上記の方法で決定したき裂の位置、大きさおよび形状から、そのき裂のK値を計算する。欠陥境界層の概念は、その厚さ $\delta$ を初期き裂の長軸および短軸の長さのそれぞれに加えることによってK値の計算過程で導入した。このようにしてK値を求めた後、各試験片の破壊は最大のK値をもつき裂から生じるものとする。

### 3.3 シミュレーション結果

欠陥境界層の厚さ $\delta$ は、PSZ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $96\%\text{Al}_2\text{O}_3$ および $96\%\text{Al}_2\text{O}_3$ のそれぞれに対して試行錯誤によって10, 25, 40および $50\mu\text{m}$ に設定した。 $\delta$ も、 $\ell_0$ と同様に、強度または破壊じん性値が低い材料ほど大きく設定する必要がある。モンテカルロ・シミュレーションによって求めた $\ell$ と $\sigma_f$ の関係をFig.5に示す。図中の実線は式(2)の関係を、破線は式(3)の関係を表す。欠陥境界層の概念を導入したシミュレーション結果は、式(3)の關係にほぼ一致するが、式(3)では説明できなかった実験データのばらつきも表すことができる。

なお、この場合一定の $\delta$ を仮定しても、初期欠陥から計算される等価き裂長さ $\ell_0$ と $\delta$ を含めて計算される等価き裂長さとの差 $\Delta\ell$ は、式(3)の $\ell_0$ に相当するが、個々のき裂によって異なり一定ではない。この $\Delta\ell$ を個々のき裂について求め、その平均値を計算した結果、PSZ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $96\%\text{Al}_2\text{O}_3$ および $92\%\text{Al}_2\text{O}_3$ のそれぞれについて3.9, 9.7, 16.0および $20.0\mu\text{m}$ となった。各材料に対するFig.1の破線の關係を表す $\ell_0$ の値はこれらの値にほぼ一致していることがわかる。

謝辞 本研究の遂行にあたっては科学研究費補助金(一般研究(C), No.02805013)を受けた。

### 参考文献

- 1) T.Hoside, H.Furuya, Y.Nagase and T.Yamada, *Int. J. Fract.*, **26**, pp.229-239 (1984).
- 2) 北住順一, 谷口佳文, 星出敏彦, 山田敏郎, *材料*, **38-434**, pp.1254-1260 (1989).
- 3) T.Hoside and T.Inoue, *Eng. Fract. Mech.*, **38-4/5**, pp.307-312 (1991).
- 4) R.C.Shah and A.S.Kobayashi, *ASTM STP 513*, pp.3-21 (1972).
- 5) A.S.Kobayashi and A.N.Enetanya, *ASTM STP 590* pp.477-495 (1976).
- 6) I.S.Raju and J.C.Newman, Jr., *Eng. Fract. Mech.*, **11**, pp.817-829 (1979).
- 7) P.M.Scott and T.W.Thorpe, *Fatigue Eng. Struct. Mater.*, **4**, pp.291-309 (1981).
- 8) 山田敏郎, 北住順一, *学振 136委員会第3部会第26回研究会資料*, pp.1-5 (1987).
- 9) 村上敬宣, 遠藤正浩, *材料*, **35-395**, pp.911-917 (1986).
- 10) G.A.Gogotsi, A.V.Drozdoz and A.N.Negovskii, *Proc. Ultrason. Int.* **83**, pp.67-73 (1983).

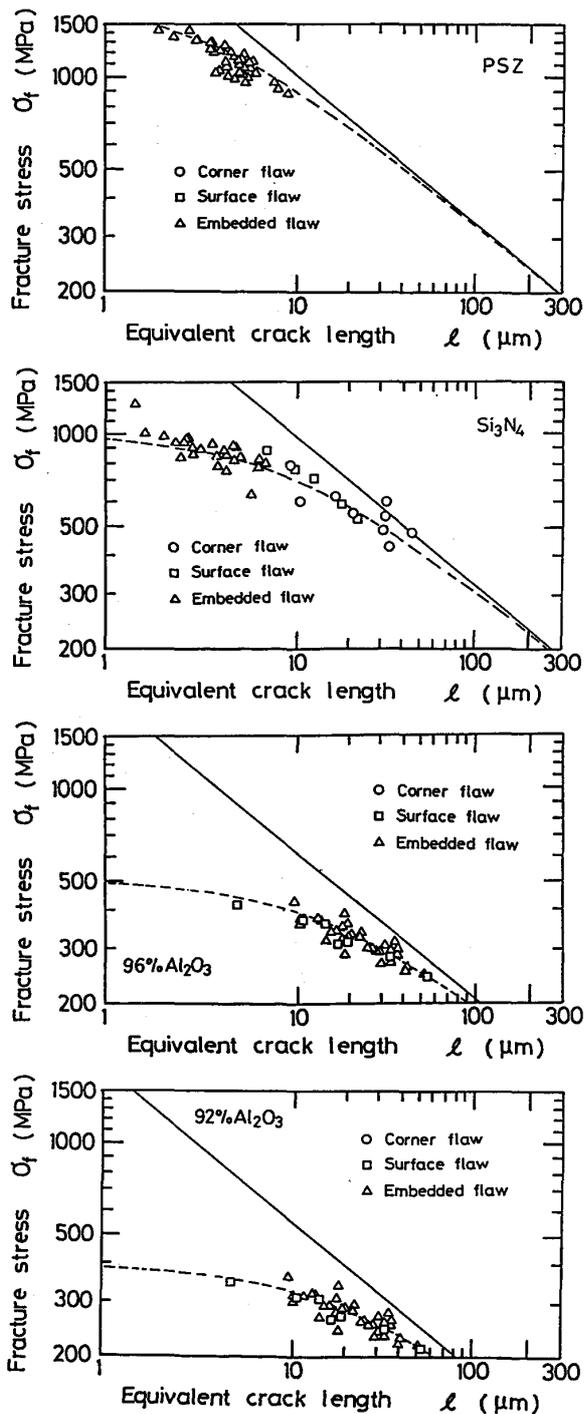


Fig. 5 Simulated relation between strength and flaw size.