

豊田中央研究所 ○猿木勝司 山田 明

## 1. まえがき

セラミックスは、研削されて製品となる場合が多いので、研削表面を有する状態での強度を知ることが重要である。研削表面は、研削加工条件によって、発生する残留応力や粗さが異なるが、強度にとってはそれらよりさらに重要な因子である加工損傷が異なってくる。特に空孔や介在物を減らして材料が高強度化されてくると、空孔や介在物が破壊起点でなくなり、表面から破壊するようになってくるので、加工損傷の把握及び加工損傷からの強度の見積りが非常に重要となる。

本研究では、複合サイアロンの角棒及び丸棒試験片を、粒度の異なる砥石による研削加工で製作し、静曲げ強度を求めるとともに、研削の際に生じた加工損傷を検出し、両者の関係を調査し、破壊力学的に考察した。

## 2. 実験方法

供試材は、主材である $\text{Si}_3\text{N}_4$ に焼結助剤として $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ を添加して製作した $\alpha' / \beta'$ 複合サイアロンである。試験片形状は、JISに準じた角棒( $3 \times 4 \times 36 \text{ mm}$ )と、実部品に多い丸棒( $\phi 4 \times 36 \text{ mm}$ )の2種類とした。試験面の仕上げ加工条件は、Table Iに示す。丸棒の研削はセンタレス研削である。角棒の場合の最終研削方向は、長手直角方向のもの2種類のほか、比較のため長手方向のものとラップ仕上げのものも準備した。なお、上記の研削加工条件は、試験片の表面粗さが、JIS#600と $\phi 4\#600$ が $R_{\text{max}} \approx 0.8 \mu\text{m}$ でほぼ同じ、JIS#140と $\phi 4\#325$ が $R_{\text{max}} \approx 2.5 \mu\text{m}$ でほぼ同じとなるように選定した。

曲げ試験は、JISに準じた4点曲げ(上スパン10mm, 下スパン30mm)で、いずれも常温にて行った。

Table I. 研削条件

| Specimen         | Grind-stone | Direction | 1 pass (mm) | Total (mm) |
|------------------|-------------|-----------|-------------|------------|
| JIS #600 $\perp$ | #600        | L         | 0.01        | 0.04       |
|                  | #600        | L         | 0.005       | 0.01       |
|                  | #600        | T         | 0.01        | 0.04       |
|                  | #600        | T         | 0.005       | 0.01(S3)   |
| JIS #140 $\perp$ | #600        | L         | 0.01        | 0.04       |
|                  | #600        | L         | 0.005       | 0.01       |
|                  | #140        | T         | 0.025       | 0.05(S1)   |
| JIS #600//       | #600        | L         | 0.002       | 0.03(S3)   |
| JIS L a p        | #600        | L         | 0.002       | 0.03(S3)   |
|                  | Lap         | —         | —           | 0.03       |
| $\phi 4 \#600$   | #600        | T         | 0.02        | 0.04       |
|                  | #600        | T         | 0.01        | 0.01(S3)   |
| $\phi 4 \#325$   | #325        | T         | 0.05        | 0.15       |
|                  | #325        | T         | 0.02        | 0.1(S3)    |

L: Longitudinal T: Transverse  
(S1), (S3): Number of spark out



Fig.1 人工亀裂の検出

## 3. 加工損傷の検出

加工損傷の検出には、硝酸Pd水溶液をあらかじめ試験片表面から含浸させる方法<sup>1)</sup>を用いた。なお、含浸は簡便に行うため、ここでは加工面に直に溶液を塗布した後、大気中にて破壊荷重の1/3程度を負荷するのみで行った。乾燥後、曲げ試験を行い、破断面をEPMAにより面分析し、加工損傷を検出した。

まず、ヌープ圧子(荷重98N)で試験片中央に導入したき裂に、上の方法を適用し、き裂の検出状態をチェックした。結果をFig.1に示す。図より半円形のき裂が検出でき、その深さは165 $\mu\text{m}$ であった。これは、従来のSEM観察による測定結果とほぼ同じである。

次に、研削条件を変えた今回の試験片での検出結果の一例をFig.2, Fig.3に示す。高精度な測定はむづかしいが、オーダ的な把握はできた。今までこのような実測例がほとんどないことを考えると、これは前進である。

図からもわかるように、加工損傷は平面研削ではほぼ一定の深さを示しているが、センタレスによる円筒研削では、浅い部分、深い部分が存在し、一定深さにはならないようである。なお、加工損傷深さは、破壊起点位置で読み取った。

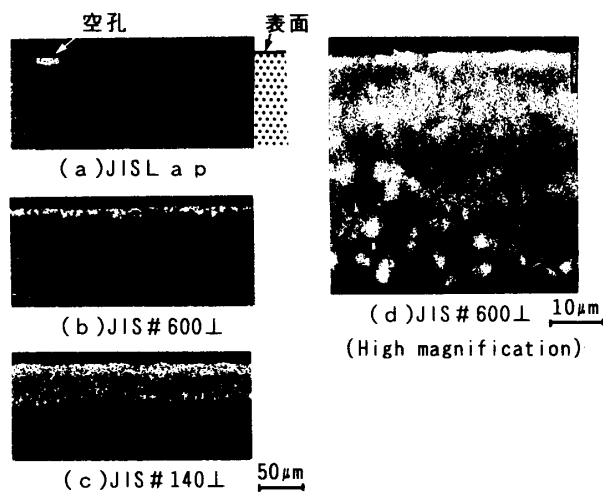


Fig.2 加工損傷の検出(角棒)

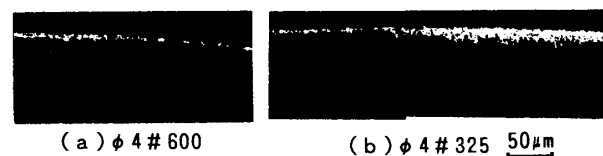


Fig.3 加工損傷の検出(丸棒)

# 4. 静曲げ試験

静曲げ試験結果は一括して、Fig.4のワイブル確率紙上に示した。それぞれのデータを直線で近似すると、角棒より丸棒の方が勾配が急でばらつきが小さいことがわかる。しかし角棒の場合も詳細にみると、上の方で緩い勾配が現れているものの、下の方の勾配は丸棒に近く急なものであることがわかる。また、同じ表面粗さを有する丸棒と角棒の強度値には、かなりの差があるが、この差を有効体積、有効表面積からだけでは説明できないことは、例えばワイブル係数 $m$ を $m=10$ として計算すると、丸棒の方が角棒より約1割強度が上がる程度にしかすぎないことから明らかである。

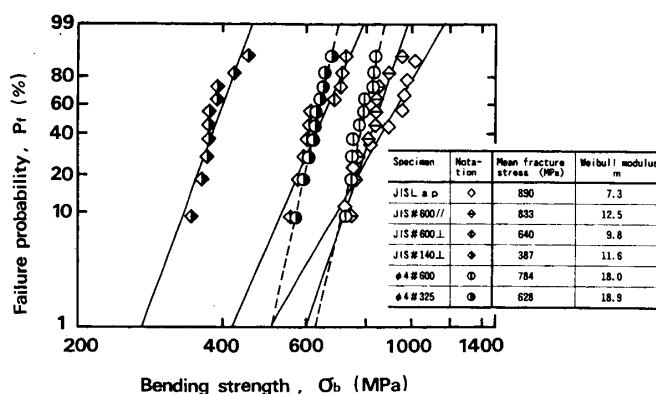


Fig. 4 静曲げ試験結果

# 5. 考察

3章で求めた加工損傷(き裂深さ)を等価き裂長さ $a_e$ に換算(便宜的に半無限体片側き裂として計算)し、それらの値と静曲げ強度との関係を両対数紙上にプロットすると、Fig.5のようになった。図中の右下りの直線は、別途SEPB法で求めた $K_{IC}(=5.82\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ を用いて式 $\sigma_r=K_{IC}/\sqrt{\pi a_e}$ を示したものである。図より明らかなように、実験点はこの直線より低い、上に凸の傾向が現れており、潜在き裂<sup>2)</sup>または微細構造パラメータ<sup>3)</sup>を導入することによってその説明が可能と思われた。

そこで、まず

$$K_{IC} = \sigma_r \sqrt{\pi (a_e + a_{e0})} \quad (1)$$

より、等価潜在き裂長さ $a_{e0}$ を算出した。また、

$$K_{IC} = \sigma_r (a_e + r) \sqrt{\pi / \{a_e + (r/2)\}} \quad (2)$$

より、微細構造パラメータ $r$ を算出した。結果をFig.6に示す。 $a_{e0}$ ,  $r$ とも角棒に比べ丸棒の方が、値は小さく、ばらつきが大きい。Fig.5には $a_{e0}$ として、12, 14, 16,  $r$ として7, 8, 9の値を用い、式(1), (2)を表した。実験点はこれらの関係線の近傍にあり、加工損傷から強度を求める際式(1)を使うなら、 $a_{e0} \approx 14\mu\text{m}$ 程度の値を、式(2)を使うなら $r \approx 8\mu\text{m}$ 程度の値を用いることによって、ほぼ強度が推定できることになる。なお、今回実験したJIS #600/試験片とJISLap試験片の中で、自然欠陥が破壊起点となったものについて、 $a_{e0}$ ,  $r$ を求めた結果、その平

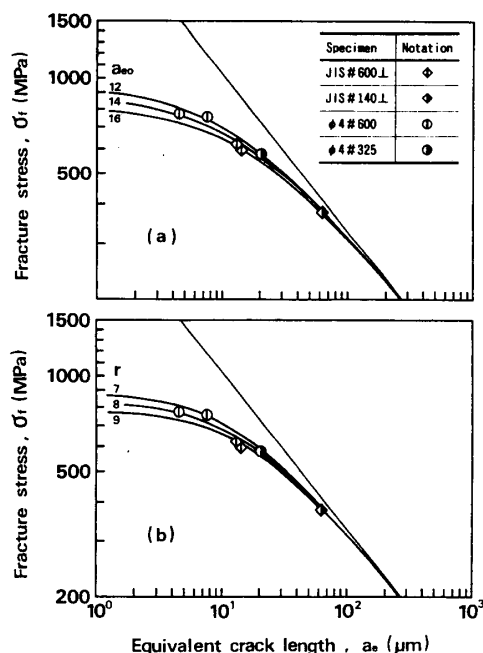


Fig. 5 式(1)、(2)との対応(加工損傷)

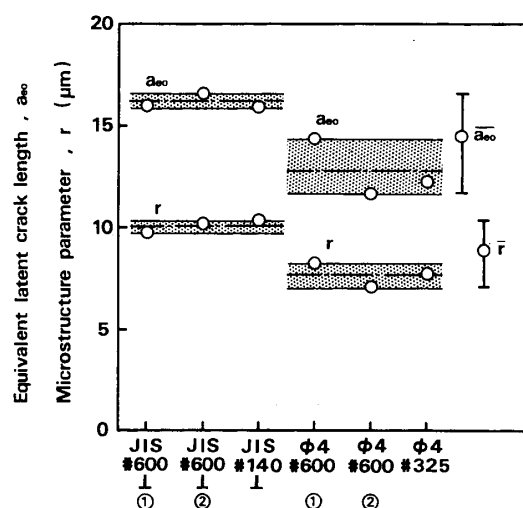


Fig. 6 各試験片の等価潜在き裂長さ $a_{e0}$ と微細構造パラメータ

均値はそれぞれ、 $a_{e0} \approx 6.1\mu\text{m}$ ,  $r \approx 3.8\mu\text{m}$ となった。先に求めた加工損傷の場合の $a_{e0}$ ,  $r$ 値を、これらと比べると、前者の方がいずれも2倍程度高くなっている。従って、これらの式を用いて加工損傷による強度低下を推定するには、 $a_{e0}$ ,  $r$ としては、自然欠陥等で得られる値より、かなり大きな値を用いる必要があると認識しなければならない。

# 参考文献

- 1) S. Mizuno, N. Kobayashi, K. Miyata, SAE Technical Paper 930163
- 2) M. H. El Haddad, K. N. Smith, T. H. Topper, ASME J. Eng. Mater. Technol. 101, 42(1979)
- 3) 高橋一郎, 宇佐美三郎, 中門公明, 宮田寛, 志田茂, 窯業協会誌, 93, 186(1985)