410

# 圧子圧入法によるセラミックスの 残留応力測定法の適用評価

愛媛大学	〇高橋 学	愛媛大学	岡部永年
愛媛大学[学]	片岡宏之	日立製作所	町田隆志

## 1 緒

言

セラミックスの残留応力は通常X線を用いて測定されてい る.しかしながらX線測定は専門的な知識や高度な解析・評 価技術が要求される.そこで現場においてセラミックス表面 の残留応力を安価で簡便に測定する方法として圧子圧入法 (IF 法)が注目されている. IF 法は,残留応力がある材料と無 い材料の破壊靭性値を圧子圧入法によって求め,その両材の 破壊靭性値の差から残留応力を測定するものである.この測 定法は極めて実用的であり,2001年度に(社)日本材料学会・ 学会標準として規定された.しかしながら,本規定は限られ た条件下のみの適用となっている.今後,本測定法を工業的 に広く利用するためには適用条件を拡大することが望まれる.

そこで、本研究ではその一環として、数種のセラミックス に対する本測定法の適用および補正係数について検討するた め、深さ方向に一様な既知の応力場に対する圧入荷重の影響 を検討した.

## 2 原 理

IF 法は本来、残留応力のないセラミックス表面にビッカー ス圧痕を導入すると, Fig. 1 に示すようなビッカース圧痕長 2c, き裂長 2a から破壊靱性値を測定する方法である.しかし



#### Fig.1 Vicker's indent and crack length

ながら,実際の測定では加工等による表面残留応力の影響が 含まれる.そこで,残留応力の影響を受けた見かけ上の破壊 靱性値を K<sub>CA</sub>,材料本来の破壊靱性値を K<sub>C</sub>とすると,式(1) のような関係が成立する.

$$K_C = K_R + K_{CA} \tag{1}$$

ここで,残留応力拡大係数 K<sub>R</sub>は残留応力による応力拡大係数 である.IF 法で対象となるき裂は3次元き裂であるので,残 留応力拡大係数 K<sub>R</sub>は一般形として,

$$K_{R} = \frac{\sigma_{R}\sqrt{\pi b}}{\phi(\lambda)}M_{R} = \frac{\sigma_{R}\sqrt{\pi a}\sqrt{\lambda}}{\phi(\lambda)}M_{R}$$
(2)

と表すことができる.ここで、 $\sigma_R$ は残留応力の代表値、 $\lambda$ は アスペクト比 ab (a は表面でのき裂長さの半長、b はき裂深 さ)、 $\varphi$ ( $\lambda$ ) は第二種完全だ円積分、 $M_R$ は $\lambda$ 、bt (t は試験片 厚さ)および残留応力分布によって決まる応力拡大係数の補 正係数である.ここで、式(2)の $\sigma_R$ を表面における残留応 力 $\sigma_{R0}$ とおくと、式(1)および(2)より表面残留応力 $\sigma_{R0}$ は、

$$\sigma_{RO} = \frac{K_C - K_{CA}}{\sqrt{\pi a} \sqrt{\lambda} M_R} \phi(\lambda)$$
<sup>(3)</sup>

によって求めることができる.実際には,

$$\sigma_{RO} = \frac{K_C (\pi a)^{-\frac{1}{2}} - 0.026 (EP/\pi)^{\frac{1}{2}} (d/2) a^{-2}}{M}$$
(4)

を用いて算出される.ここで、補正係数 Mは、

$$M = \lambda^{0.5} M_R / \phi(\lambda)$$
 (5)

である.補正係数*M*は,厳密には式(5)から決定されるべきで あるが,実際上は容易に定めることが困難であり,簡便法と しては適用しにくいといえる.

3 供試材と実験方法

3.1 供試材および試験片

供試材は常圧焼結窒化ケイ素(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), アルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)およ び炭化ケイ素(SiC)を用いた. 試験片は 5×10×20mm に加工さ れ, 10×20mm の両面はダイヤモンド粒による鏡面研磨を施し た. Table 1 に各材料の機械的性質を示す.

Materials	Young's Modulus E (GPa)	Fracture toughness (IF) $K_C$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	294	5.1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	367	3.4	
SiC	410	2.4	

Table 1 Mechanical properties

## 3.2 実験方法

試験装置は容量490Nのビッカース硬さ試験機であり,Fig.1 に示すような精密バイスを利用して試験片を圧縮する治具を 用いた.実験はセラミックス内に圧縮応力を等分布させるた め,前準備として試験片表面に二枚ひずみゲージを添付し,既 知の負荷を加えることによって試験片の応力-ひずみ校正曲 線を作成した.次に,無負荷の状態で試験片にビッカース圧 子を押し込み,材料固有の破壊靭性値 K<sub>C</sub>を測定した.校正曲 線に基づき試験片に所定の負荷を与え,試験片にビッカース 圧子を押し込んで見かけの破壊靭性値 K<sub>C4</sub>を測定した.負荷



Fig.2 Loading device

-115-

応力と補正係数の関係は式(4)を用いて算出した.実験条件は 圧入荷重 P=49,98,490N,保持時間 15sec として,圧入荷重の 影響を検討した.

#### 4 実験結果および考察



Fig.3 Stress estimation and correction coefficient for indent load of 49N.

Fig.3 は圧入荷重49Nにおける各セラミックスに負荷された 圧縮応力と IF 法によって推定された圧縮応力の関係を示す. 図中の直線はそれぞれの材料における近似曲線であり、この 傾きが各材料の補正係数 Mである.任意の負荷応力に対して IF 法により推定された応力のばらつきが大きい.これは IF 法 により導入されるき裂長さの読み取り誤差が大きい点や試験 片の色によってき裂先端を見つけ難い点が影響している.読 み取り誤差を小さくする工夫が今後必要である.低荷重下の 補正係数 Mは破壊靱性が高くなるとともに低下した.

Fig.4 は圧入荷重 98N における各セラミックスに負荷され た圧縮応力とIF法によって推定された圧縮応力の関係を示す. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>および SiC の補正係数 M の値は圧入荷重の増加ととも に低下し、およそ 0.8 となった.一方、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>は他の材料とは 逆の挙動を示し、M の値は 1.2 に増大した.

Fig.5は圧入荷重490NにおけるSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>に負荷された圧縮応力



coefficient for indent load of 98N.



と IF 法によって推定された圧縮応力の関係を示す. SiC およ び  $Al_2O_3$  は圧入荷重 98N 以上の場合.除荷時に圧痕周辺がは く離するため、計測不能である. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> は圧入荷重をさらに増 加させると補正係数 M の値は若干増加する傾向を示した.そ こで、これらの補正係数 M の値と圧入荷重の関係を Fig.6 に 示す.すべての材料の低圧入荷重領域において圧入荷重依存 性が見られた.一方、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> は高圧入荷重領域でほぼ一定とな る傾向を示した.低圧入荷重下における補正係数の変化の原 因としてき裂状態を観察したが、表面はく離を伴わない場合 は全てメジアンき裂であった.

以上の結果より,深さ方向に一様な残留応力場をもつ部材 に対して圧子圧入法を適用した場合.Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>では補正係数 *M* の変化が少ない高い圧入荷重を選択すべきである.ここでの 補正係数 M=1.4 程度であるが,データのばらつきが多いため, さらに実験データを収集することによって真の補正係数 Mを 決定することができる.一方,すべての材料の低圧入荷重領 域の変化に対する物理的考察は今後詳細に検討する必要があ るが,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>および SiC の場合,圧入荷重 48N に限定するこ とにより,Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の補正係数と同じ値を用いて算出可能である.

# 5 結 言 省略

参考文献 (社)日本材料学会標準 JSMS-SD-4-01 「圧子 圧入法によるセラミックスの残留応力測定法」