セラミックスの多数圧子押し込み面残留応力 —表面残留応力の大きさに対する材料硬さの役割 および X 線応力測定時の X 線侵入深さの影響—[†]

村 田 一 夫* 水 谷 勝 己* 田 中 芳 雄**

Residual Stress in Multi-Indented Surface Layer of Ceramics — Effects of Hardness and X-Ray Penetration Depth on Residual Stress —

by

Kazuo MURATA*, Katsumi MIZUTANI* and Yoshio TANAKA**

The present paper deals with the multi-indentation model in which the residual stress can be easily estimated not only experimentally but also analytically to clarify the fundamental characteristics of residual stress of ground ceramics, the stress distribution, the contribution of hardness of the materials to the stress, and the effect of X-ray penetration depth on the stress measurement. In the experiments, Vickers multi-indentation was performed on the surface of ceramics and metal, and then the residual stress was measured with several characteristic X-rays. In the analysis, the residual stress distribution in the multi-indented surface layer was estimated by applying the Hill's solution for spherical-cavity expansion and the residual stress, which is equivalent to the stress measured by X-ray, was evaluated by taking the weighted average of the distribution into account. The residual stress based on the analysis was confirmed to coincide with those obtained from the experiments. The characteristics of the residual stress was discussed in detail based on the results of the elastic/plastic analysis. The main results obtained are as follows.

(1) The compressive residual stress in the multi-indented surface has a peak at the depth right beneath the bottom of indentation. Its magnitude can be estimated as $k(b/L)^2 H_v$: b =size of plastic zone multi-indented, L =indentation interval, H_v =Vickers hardness, k =constant (-0.69 for Si_3N_4 , -0.35 for Si_3C).

(2) The compressive residual stress decreased linearly with increasing depth. The compression stress attained zero when the depth was about 80% of b .

(3) The residual stress of ceramics measured by X-ray is considerably smaller than the peak stress even if the characteristic X-ray with shallower penetration depth is used. This result shows that the effective penetration depth of X-ray is not sufficiently shallow in comparison with the depth where the compressive stress exists in ceramic materials.

Key words: Ceramics, Residual stress, Grinding, X-ray stress, Multi-indentation, X-ray penetration depth, Hardness

1 緒 言

構造用セラミックスは、焼成後にダイヤモンド砥石によって研削され寸法精度や表面粗さが整えられる。その際に表面には残留応力が形成される。それは部品の性能に影響を及ぼすため評価しておくべきものとなっている。残留応力は通常 X 線を用いて測定される。セラミックス研削面のそれは表面で圧縮であり、その大きさは相変態を生じる部分安定化ジルコニアを除いては高々 -500 MPa であることが報告されてい

る¹⁾。しかし、このような値は、 -1000 MPa にも達する焼入鋼 (SUJ, SKD) の残留応力²⁾に比べて小さく、セラミックスの研削面残留応力に関する一つの疑問とされている。その原因として、研削時の材料の破壊に起因するものと、応力測定時の X 線の侵入深さに起因するものが考えられる。前者について筆者らは、砥粒のパニシ作用を受けた被削材部が塑性的に変形することによって圧縮の残留応力を生じるが、パニシ作用の程度やそれを受ける領域は材料除去時の破壊の規模

[†] 原稿受理 平成 5 年 10 月 1 日 Received Oct. 1, 1993

* 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所 〒550 大阪市西区江之子島, Osaka Prefectural Indust. Tech. Res. Inst., Nishi-ku, Osaka, 550

** 正 会 員 大阪府立大学工学部機械システム工学科 〒591 堺市学園町, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Osaka Prefecture, Gakuen-cho, Sakai, 591

以上の互いに関連する二つの点を明らかにするためには砥粒のパニシ作用を想定し、しかも解析や実験の取扱いが可能なモデルを選定する必要がある。本研究では、試料に等間隔の圧子押込みを多数行うモデル(多数圧子押込みモデルと記す)に対して弾塑性応力解析を行い、残留応力分布や X 線での測定を想定した等価応力を求める。また、セラミックスや金属材料を試料としたモデル実験を行い、種々の特性 X 線を用いて押込み面の残留応力を求める。それらから多数押込み負荷を受ける表面の残留応力の特徴、さらには、硬さなどの材料特性の役割を考察する。また、その応力の測定に及ぼす X 線侵入深さの影響を明らかにする。

2 残留応力解析

2・1 多数球圧子押込みの残留応力分布

解析では半径 a の球圧子を半分まで押し込み、その後除荷する場合を取扱う。Fig. 1 に多数球押し込み時の座標および塑性域の大きさ b を a で無次元化して示す。今の場合押し込み間隔 L が X, Y 両方向で等しいため対称性から斜線を施した部分のみを取扱えば良い。

その部の応力のもとになるのは単一の半球圧痕が付けられた時のものである。それに関して S. S. Chiang⁴⁾が球殻押込の Hill の解を援用して求めているのでここでも基本的にはその方法に従う。単一の半球押込みの除荷後の残留応力を求めるために行った手順は以下のごとくである。

① 押込み時の半球圧痕面の圧力（内圧）を求める。その操作は、無限体球殻押上げ（内圧 p ）の中心を通る平面上の垂直応力が半無限体では消去されるべきであると考え、消去のための垂直応力を平面上に加える。この補正の垂直応力によって発生する圧痕底の圧力を p に加える。そしてそれを圧痕底について平均化し、半球圧痕面の圧力（硬さ H に相当）とする。

② 上記の圧力（硬さ H に相当する内圧）を持つ

Fig. 1. Spherical multi-indentation model.

球殻の内圧除去時の残留応力分布を求める。これは内圧が H の場合の Hill による球殻の残留応力解である。

③ 最後に、半球押込み除荷後の残留応力を求める。その操作は、②の残留応力に、自由面（半無限体表面および圧痕面）に垂直応力が生じないような消去のための垂直応力を与えたときに発生する応力を加えることである。

Fig. 2 に、0 を通る X-Y 平面上の一点 P_0 と X-Z 平面上の点 P_1 の直角および極座標における球半径 a で正規化した位置を示す。上記の手順を経て求められる点 P_1 の X および Y 方向の残留応力 σ_x , σ_y は次式で示されるものとなる。

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_x}{H} &= \left(\frac{\sigma_r}{H} \sin^2 \phi + \frac{\sigma_\phi}{H} \cos^2 \phi \right) + \frac{\sigma_x^s}{H} \\ \frac{\sigma_y}{H} &= \frac{\sigma_\phi}{H} + \frac{\sigma_y^s}{H}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 σ_r , σ_ϕ は r , ϕ 方向の Hill の残留応力解で、以下のように表される。

点 P_1 が塑性域内にある場合 ($\beta \geq \sqrt{\Omega^2 + \zeta^2} > 1$)

Fig. 2. Coordinate system used for residual stress analysis.

$$\frac{\sigma_r}{H} = \frac{1}{1-m} \left\{ \frac{3 \ln(\Omega^2 + \zeta^2)}{2(1+3 \ln \beta)} - 1 + \frac{1}{(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}} \right\}$$

$$\frac{\sigma_\phi}{H} = \frac{1}{1-m} \left[\frac{3 \ln(\Omega^2 + \zeta^2) + 1}{2(1+3 \ln \beta)} - 1 - \frac{1}{2(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}} \right]$$

点 P_1 が弾性域内にある場合 ($\sqrt{\Omega^2 + \zeta^2} > \beta$)

$$\frac{\sigma_r}{H} = \frac{1}{(1-m)(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}} \left\{ 1 - \frac{(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}}{1+3 \ln \beta} \right\}$$

$$\frac{\sigma_\phi}{H} = \frac{1}{2(1-m)(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}} \left\{ \frac{(\Omega^2 + \zeta^2)^{3/2}}{1+3 \ln \beta} - 1 \right\}$$

ただし,

H : 硬さ (上記①の半球圧痕面の圧力)

β : 塑性域半径 b と球圧子半径 a の比 ($=b/a$)

Ω, ζ, ϕ : Fig. 2 に図示した点 P_1 の座標位置

m : 上記①の球殻押拡げ時の内圧 p と硬さ H の関係を示す係数 ($H/p=1-m$)

σ_x^s, σ_y^s : 上記③で示される点 P_1 に生じる X, Y 方向の補正応力.

また, σ_x^s, σ_y^s は, 半無限体境界面に集中力が作用する時の内部応力に関する Mindlin の解を用いて求められる⁴⁾.

つぎに, $Z/a = -\zeta$ における Fig. 1 の $\square OABC$ 部の平均残留応力を求める. Fig. 3 に示した $\square OABC$ 内の一点 P_1' (P_1 に比べ 0 からの距離 Ω が等しく a だけ回転されている) の Ω, a 方向の応力は式 (1) の点 P_1 の X, Y 方向の応力と同じであることから, P_1' 点での応力は,

$$\frac{\sigma_{xx}}{H} = \frac{\sigma_x}{H} \cos^2 \alpha + \frac{\sigma_y}{H} \sin^2 \alpha \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_{yy}}{H} = \frac{\sigma_x}{H} \sin^2 \alpha + \frac{\sigma_y}{H} \cos^2 \alpha$$

である.

このような応力のすべての圧痕からのものを重ね合せ P_1' 点での応力とし, その $\square OABC$ 内での平均を取ることににより $Z/a = -\zeta$ での平均残留応力とする. そして ζ を変えて残留応力の深さ方向分布を求める. なお, $\square OABC$ 内の応力に関しては圧痕 I, II, III,

Fig. 3. Stress at a point in $\square OABC$.

Fig. 4. Analyzed residual stress distribution in the surface layer of Si_3N_4 multilayer indented by half sphere.

IVのみを取扱い, 他は無視した.

以上から求められる多数球圧子押し込み残留応力の一例を示す. 計算に必要なものは, $a, L, \beta (=b/a)$, ν (ポアソン比) である. 無次元化された半球状塑性域の大きさ β は, 材料のヤング率 E , ビッカース硬さ H_v を用いて次式で近似される³⁾.

$$\beta = 0.83(E/H_v)^{2/5} \quad (3)$$

窒化ケイ素 (Si_3N_4 , $\nu=0.25$, $\beta=2.8$) に対して $L/a=8, 10, 14$ の場合の結果を Fig. 4 に示す. 図の横軸は残留応力 (負号は圧縮を表す), 縦軸は表面からの深さで, それぞれ硬さ H , 球圧子半径 a で無次元化している. Fig. 4 の残留応力分布の特徴は以下のようである.

圧縮応力は半球圧痕最深部 ($|Z/a|=1.0$) よりやや深い位置で極大値を示し, それより深い位置ではほぼ直線的に減衰する. 圧縮応力の極大値は L/a の減少に伴って増加する. 極大値を生じる深さ, 圧縮応力の存在深さは L/a が異なっても変わらない.

2・2 X線による測定を想定した等価表面残留応力

本解析で求められる残留応力分布の妥当性を実験的に求められた応力 (その測定は X 線を用いて行われる) と比較して検討する必要がある. そのために解析による応力分布を X 線侵入深さ内でのそれぞれの深さにおける回折強度の重みを考慮した平均的な一つの応力値 (以下等価表面残留応力 σ_e と記す) として表示する. 等価表面残留応力 σ_e は次式で表すのが適切であろう⁵⁾.

$$\sigma_e = \frac{\int_0^{T/a} \sigma_A(\zeta) e^{-\mu B a \zeta} d\zeta}{\int_0^{T/a} e^{-\mu B a \zeta} d\zeta} \quad (4)$$

ただし, $B = \frac{1}{\sin \theta_\alpha} + \frac{1}{\sin(2\theta_0 - \theta_\alpha)}$

$\sigma_A(\xi)$: 深さ ξ 断面の平均残留応力

T/a : 球殻半径 a で無次元化した X 線侵入深さ

μ : 線吸収係数

ξ : 球殻半径 a で無次元化した深さ

θ_a : X 線入射角

ϕ_0 : 無ひずみ時の回折角

ここで, X 線侵入深さ T は厳密には ∞ であるが, 計算の簡略化のため応力分布が表面から深くなれば減衰することを考慮して $T=T_e$ (T_e は X 線有効侵入深さ, $I_e/I_0=1-e^{-1}$) とした. また, $\xi=0$ の位置 (X 線測定における表面) はくぼみ部については圧痕底に取った.

3 実験方法

3.1 多数ピッカース圧子

押込み実験は頂角 136° のピッカース圧子を用いて行った. 実験試料は, セラミックスでは常圧焼結された窒化ケイ素 (Si_3N_4), アルミナ (Al_2O_3), 炭化ケイ素 (SiC) を, それらとの対比で金属材料では硬さが低く塑性域の拡がりの大きい軟鋼 (S15C) を選択した. それぞれの材料の機械的性質を Table I に示す. 試料の大きさは, セラミックスは $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 厚さが 4 mm で, S15C は $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 厚さ 4 mm である.

押込み前のセラミックス表面は, 平均粒径 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ の微細ダイヤモンドスラリーのポリッシングを, S15C は 900°C で 30 分加熱保持, 炉冷による焼なましとその後のバフ研磨を施し, 表面残留応力を除去している. 押込みは, マイクロピッカース硬度計 (株島津製作所 HMV-2000), ピッカース硬度計 (株明石製

Table I. Mechanical properties of the materials used.

	Si_3N_4	SiC	Al_2O_3	S15C
Young's modulus (GPa)	310	410	390	210
Poisson's ratio	0.25	0.15	0.21	0.30
Vickers hardness (GPa)	15	25	22	1.25

作所 MVK-A) 上で圧痕の対角方向が正方形試料の辺に平行 (直角) になるようにして等間隔に試料端部まで行った. その時の押込み荷重と間隔は Table II のごとくである.

3.2 残留応力の測定

ピッカース圧子押込み面の残留応力の測定は, X 線応力測定装置 (理学電機 (株) MSF-2M) を用い, 平行ビーム X 線による並傾法, 回折面法線角 ψ 一定法で行った. 今回の実験に用いた各試料と特性 X 線, 対象とした回折角を Table III にまとめて示す. 残留応力の算出は $\sin^2\psi$ 法で求めた. $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図のための試料面法線に対する入射角 ϕ_0 は $0^\circ\sim 45^\circ$ まで 5° ごとに設定した. そのときの X 線有効侵入深さ T_e は $\phi_0=30^\circ$ のもので代表させ Table III に示した.

4 解析結果と実験結果の比較

前述の解析法の妥当性を検証するために, 実験で得られた応力と実験条件のもとで解析したものを比較する. ピッカース圧子を用いた実験に相当する球圧子の解析条件を以下の取扱いにより定める.

- ① ピッカース圧子でも塑性域は半球状に生じること,
- ② 塑性域の大きさが同じであれば応力は圧子近傍を除いてほぼ等しくなること,
- ③ 押込みの体積が等しいとき塑性域は同一の大き

Table II. Conditions of Vickers indentation.

	Si_3N_4		SiC			Al_2O_3			S15C
Load (N)	10	100	3	5	10	3	5	10	5
L (μm)	50, 100, 160, 200, 400	250, 500, 1000	70	100	100	70	100	100	100, 200, 300, 400
$\beta (=b/a)$	2.8		2.5			2.6			6.5
a (μm)	8	25	3.3	4.3	5.9	3.6	4.6	6.5	19.4
b (μm)	22	70	8.4	10.9	15	9.4	12.1	17	125

Table III. Materials and characteristic X-ray for X-ray stress measurement.

Material	Ceramics					Steel	
	Si_3N_4	SiC		Al_2O_3		S15C	
Characteristic X-ray	V-K α	Cu-K α	V-K α	Cu-K α	Cr-K α	Co-K α	Cr-K α
Diffraction plane	(4 1 1)	(2 0 15)	(1 0 $\bar{1}0$)	(1 0 16)	(2 2 0)	(3 1 0)	(2 1 1)
Diffraction angle (deg)	152.67	147.60	145.41	150.45	148.49	161.35	156.08
Effective penetration depth at $\phi_0=30^\circ$ (μm)	7.1	21.6	5.7	27.7	8.3	9.0	4.2

Fig. 5. Relation between normalized residual stress σ/H_v (measured) or σ_e/H (analyzed) and indentation interval normalized by equivalent spherical radius L/a .

Fig. 6. Comparison between experiment and analysis in residual stress normalized by hardness.

さになることを許容する。そのもとで③を用いて圧痕対角線長さ d のピッカース押込みを圧子半径 a が $a = 0.225d$ の半球押込みに置き換える。

Fig. 7. Internal residual stress σ, σ_e obtained at stepwise surface removals.

まず、試料表面に対して X 線で測定した残留応力と解析から求めた等価表面残留応力を比較する。Fig. 5 に Si_3N_4 と $S15C$ の硬さで無次元化した両残留応力 σ/H_v , σ_e/H を球圧子の半径で無次元化した押込み間隔 L/a の関係で示す。また Fig. 6 にここで実験した一連のものについて実験 (σ/H_v) と解析 (σ_e/H) の関係を示す。これらに見られるごとく両残留応力はいくく一致している。

つぎに、試料内部の応力について両結果を比較する。Fig. 7 は押込まれた Si_3N_4 (その条件を図中に示す) 試料の表面をポリッシングにより順次除去し、その度ごとに X 線応力測定を繰返して求めた応力 (実験結果) と仮想的に除去を行い、その度ごとに計算した等価表面残留応力 (解析結果) を示したものである。解析での仮想的除去は新生面となる断面の垂直応力を消去するように残留応力の再配置を行わせることによって示すなど若干の差が存在するが全体としてはほぼ似たものとなっている。

Fig. 8. Illustrations of residual stress and characteristic size.

以上からここで用いた弾塑性解析は、多数圧子押し込み時の残留応力に適用できると考えられる。そしてこの残留応力に関しては、セラミックスと鉄は同様な変形に支配されているものと見られる。ただ、本解析の圧子近傍（表面近傍）の応力の確かさは保証の限りではない。

5 考 察

多数圧子押し込み時の残留応力分布の解析結果 (Fig. 4) をもとに、その分布曲線の特徴を Fig. 8 に模式的に示す。

圧縮残留応力は半球押し込み時の内圧（硬さ） H に比例し、圧痕底直下の位置 ζ_p で極大値 σ_p を持つ。そして深くなれば ζ_p 付近を除いてはほぼ直線的に減衰して弾塑性境界より少し上方の位置 ζ_0 で零となる。したがって σ_p/H , ζ_p , ζ_0 が押し込み条件や材料特性との関係で明らかにされれば良い。

まず σ_p/H に着目する。Fig. 9 に Si_3N_4 と S15C についての σ_p/H を押し込み条件である L/a との関係、さらには塑性域の大きさ b を考慮した $(b/L)^2$ との関係で示す。この $(b/L)^2$ は塑性域の体積が押し込み領域内（深さは b ）に占める割合を示すもので、それが σ_p/H を支配するものではないかとの考えに基づくものである。図から明らかなように σ_p/H は -0.69 (Si_3N_4), -0.28 (S15C) の傾きを持ち $(b/L)^2$ に比例して増加する。 $\beta (=b/a)$ は式 (3) から定められるので、ある条件 (a , L) のときの b/L とそのもとでの σ_p/H は Fig. 9 から容易に求めることができる。さらに、球殻の平均内圧である硬さ H は降伏応力 Y と $H/Y = 2(1-m)(1+3\ln\beta)/3$ なる関係にあり（両材料の H/Y を Table IV に示す）、また Y とビッカース硬さ

Fig. 9. Relation between normalized peak stress σ_p/H and normalized indentation interval L/a or normalized plastic zone size $(b/L)^2$.

Table IV. Calculated characteristic values for Si_3N_4 and S15C.

	β	H/Y	ζ_p	$\zeta_0(\zeta_0/\beta)$
Si_3N_4	2.8	2.5	1.2	2.2 (0.79)
S15C	6.5	3.7	1.5	4.9 (0.75)

Hv との間には一定の関係 $Y=1/3Hv$ (金属), $Y=(1/3 \sim 1/2)Hv$ (セラミックス^{4),7)} があることを用いれば、 σ_p を Hv で表すことができる。 $(b/L)^2=0.2$ のときの σ_p はほぼ $-0.14Hv$ (Si_3N_4), $-0.07Hv$ (S15C) に達するものとなる。 $(b/L)^2$ が大きい場合には塑性域が互いに他の影響を受けるためここで取扱われる σ_p より小さくなることが予想される。このように、 σ_p/H は押し込み間隔と塑性域の大きさによって決定されるものとなるが、Fig. 9 の結果では、塑性域の大きさ、押し込み間隔を同じにした $(b/L)^2$ を同じにする) としても、 Si_3N_4 , S15C の材料間には σ_p/H の値にかなりの差があり、それに $(b/L)^2$ が大きいほど顕著なものとなっている。これは、残留応力分布が式 (1) に示した Hill の残留応力解をもとにしており、 σ_p にはビッカース硬さとヤング率から定まる無次元化した塑性域の大きさ $\beta (=b/a)$ が含まれていることによるものであろう。この場合、 $(b/L)^2$ に対する σ_p/H の傾きは β の小さい材料の方が大きなものとなる。

つぎに、 ζ_p , ζ_0 に着目する。Table IV に Si_3N_4 と S15C の ζ_p と ζ_0 の値を β とともに示す。 $\zeta_p=1.2$, 1.5 , $\zeta_0=0.8\beta$ からわかるごとく主として ζ_p は圧痕深さに ζ_0 は β に依存したものである。したがってビッカース圧子押し込みの場合には、 ζ_0 については半球押し込みのものと同様であるが、 ζ_p は圧痕の深さが浅くなる分だけ (Fig. 8 に示すごとく 0.6 倍に) 減じるべきであろう。以上のもとで多数圧子押し込み時の残留応力分布の概形が定められた。

X 線の侵入深さが残留応力測定に及ぼす影響については、上述の $\zeta_0(=0.8\beta)$ と X 線有効侵入深さ T_e/a の大小関係の問題となる。 T_e/a の大きさによって X 線で測定される圧縮残留応力値 σ が極大値 σ_p からどの程度減少するのであろうか。一例として球半径 $a=2.5 \mu\text{m}$ の半球押し込み（圧痕対角線長さ $d=11.1 \mu\text{m}$, 深さ $Z=1.6 \mu\text{m}$ のビッカース圧子押し込み）時の σ_e/σ_p と T_e/a の関係をセラミックスと S15C について Fig. 10 に解析結果で示す。同図上方には各材料に対する特性 X 線の T_e/a の値も示した。 β の大きい S15C では Cr-K α 線, Co-K α 線のいずれを用いた場合でもほぼ表面層の残留応力を測定し得るが、セラミックスでは T_e の小さい V-K α 線を用いたとしても σ_e/σ_p は 0.5 程度に減じるものとなっている。

ここで例とした $a=2.5 \mu\text{m}$ ($d=11.1 \mu\text{m}$, $Z=1.6$

Fig. 10. Relation between equivalent surface residual stress normalized by peak stress σ_e/σ_p and effective X-ray penetration depth normalized by radius of spherical indenter T_e/a .

Fig. 11. Relation between equivalent surface residual stress normalized by peak stress σ_e/σ_p and effective X-ray penetration depth normalized by plastic zone size T_e/b .

μm) は押込みでは軽微な条件であるが研削では通常のものである。研削時の各被削材料に対する β (または b) は研削砥石の平均砥粒径と研削面の条痕深さから推定することができるので、 T_e/a の代わりに T_e/b で σ_e/σ_p を整理すれば Fig. 11 のごとくであり、各材料に対してはほぼ統一的な表示が可能となる。ここに研削時の b と応力測定に使用する T_e をあてはめ、測

定に起因する応力減衰の程度を推定してみる。 Si_3N_4 の b は #140 の砥石では $15\mu\text{m}$, #400 では $9\mu\text{m}$ 程度で、 T_e は V-K α で $7\mu\text{m}$, Cr-K α で $8\mu\text{m}$, Cu-K α で $26\mu\text{m}$ 程度である。それぞれの組み合わせの T_e/b を図中に示す。ここで注目すべきことは研削砥石の砥粒が小さくなれば σ_e/σ_p が急激に小さくなることである。X 線で測定されたセラミックス研削面の圧縮残留応力の大きさが砥石の粒径とともに小さくなるということが認められている¹⁾、それは研削面残留応力そのものの特性に加え応力測定時の X 線侵入深さの影響が強く現れた結果であると考えられる。

6 結 言

多数圧子押込みモデルの弾塑性変形に基づく圧縮残留応力分布の特徴、その分布を決定づける硬さなどの材料特性と押込み条件、さらには残留応力測定における X 線侵入深さの影響を解析と実験によって明らかにした。結果の概要は以下の通りである。

(1) 多数圧子押込み面下に分布する圧縮残留応力は、圧痕直下で極大値を示し、その大きさは $k(b/L)^2H_v$ であると推定される。ここで、 b は多数押込みによる塑性域の大きさ、 L は押込み間隔、 H_v はピッカース硬さである。また、 k は比例常数で、 Si_3N_4 では $k = -0.69$, S15C では $k = -0.35$ となる。

(2) 圧縮残留応力は極大値より深い位置ではほぼ直線的に減少し、塑性域の約 80% の深さ位置で零になる。

(3) セラミックスでは、圧縮残留応力の存在深さが比較的浅く、有効侵入深さの小さい特性 X 線を用いたとしても、X 線により測定される残留応力は圧縮残留応力の極大値よりかなり小さくなる。

(平成 5 年 7 月 23 日 日本材料学会第 29 回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 田中啓介, 日本材料学会第 24 回 X 線材料強度に関する討論会講演論文集, p. 1 (1987).
- 2) 横川和彦, 横川宗彦, 精密工学会第 13 回難削材加工専門委員会資料 (1992).
- 3) 村田一夫, 水谷勝己, 田中芳雄, 材料, **41**, 624 (1992).
- 4) S. S. Chiang, D. B. Marshall and A. G. Evans, J. Appl. Phys., **53**, 298 (1982).
- 5) 佐々木敏彦, 吉岡靖夫, 倉元眞實, 材料, **34**, 506 (1985).
- 6) L. E. Samuels and T. O. Mulhearn, J. Mech. Phys. Solids, **5**, 125 (1957).
- 7) J. H. Westbrook and H. Conrad, "The Science of Hardness Testing and Its Research Application", Chapt. 9 (1973) Amer. Soc. Met., Ohio