ガウス曲線法による炭化けい素の X 線応力測定†

栗 田 政 則* 小 野 伸 幸**

井 原 郁 夫* 矢 田 敏 夫**

X-Ray Stress Measurement of Silicon Carbide by Gaussian Curve Method

by

Masanori KURITA*, Nobuyuki ONO**, Ikuo IHARA*

and Toshio YADA**

Residual stress in ceramics induced by grinding plays an important role on the strength of ceramics. The X-ray method is effective in measuring residual stress in ceramics because it can nondestructively measure the residual stress in thin surface layer of 10 to 40 μm of a specimen. In the measurement by X-ray diffraction, it is important to ascertain the reproducibility of the measured values from their standard deviation because the measurements by X-rays will involve variability caused by inherent counting statistics. To determine accurately the stress value in a sintered silicon carbide, an X-ray stress constant and elastic constants were determined by the Gaussian curve method which permits rapid and precise determination of stress. The standard deviations of these constants were calculated analytically to examine their reliability. (20.15) and (306) diffraction planes of silicon carbide were measured with $\text{CuK}\alpha$ radiation. For each diffraction plane, $\text{CuK}\alpha_1$ and $\text{K}\alpha_2$ diffraction line profiles appear separately. Stress can be determined precisely by using the separate $\text{K}\alpha_1$ single diffraction profile. The background correction in determining peak positions can be omitted because it does not affect the stress. The 95 % confidence limits for the X-ray stress constants for the (20.15) and (306) planes were -971 ± 48 and -1337 ± 116 MPa/deg, respectively. The limits for the X-ray Young's modulus of the (20.15) and (306) planes were 446 ± 20 and 417 ± 35 GPa, and those for the Poisson's ratio were 0.165 ± 0.013 and 0.157 ± 0.016 , respectively.

Key words : Stress measurement, Residual stress, X-ray diffraction, Silicon carbide, Ceramics, Nondestructive test, Statistical analysis

1 緒 言

近年、耐食性、耐熱性や耐摩耗性に優れた特性を持つ窒化けい素や炭化けい素などのファインセラミックスが工業上広く用いられているが、研削などの機械加工によってセラミックスに生じる残留応力はセラミックスの強度に大きい影響を及ぼすので、その測定方法の確立が強く望まれている。X 線回折による応力測定は、多結晶材料の 10～数 10 μm の薄い層内の残留応力を非破壊的に測定できるという特徴を持っており、この方法を用いたセラミックスの残留応力測定に関する研究が最近いくつか行われている。^{1)～5)}

X 線応力測定法は、等方性弾性体に対する弾性力学の理論に基づいている。⁶⁾ 一般的に、結晶体は方位による弾性異方性を示すが、個々の結晶がランダムな方位を持つ多結晶体に対しては、巨視的には等方性弾性体に対する弾性力学の理論が成り立つことは、多くの実験事実が示す通りである。しかし、X 線応力測定

においては、ある相の特定の方位を持つ特定の回折面のひずみを選択的に測定するので、必ずしも等方性弾性体に対する理論がそのまま適用できるとは限らない。そこで、X 線回折によって応力値を精度よく測定するためには、X 線で測定したひずみを応力値に変換するための応力定数を X 線の測定によって求める必要がある。

また、X 線による測定値は X 線固有の統計変動⁷⁾によってばらつくので、この統計変動によって生ずる測定値のばらつきの大きさを表す標準偏差を求めて測定値の再現性を検討することが重要である。⁸⁾ 幸いにして、定時計数法による回折線ピーク位置、応力値および X 線の応力定数などの標準偏差は、一回の測定値から統計学の理論を用いて解析的に求め得る。^{8)～13)}

ところで、単一波長の X 線による回折線プロファイルは、理論上ガウス関数で近似できる。¹⁴⁾ ガウス曲線法による X 線応力測定法は、回折線ピークを近似し

† 原稿受理 昭和63年3月9日 Received Mar. 9, 1988

* 正 会 員 長岡技術科学大学 長岡市上富岡町, Nagaoka University of Technology, Kamitomioka, Nagaoka

** 長岡技術科学大学 長岡市上富岡町, Nagaoka University of Technology, Kamitomioka, Nagaoka

たガウス関数の主軸を回折ピーク位置とする方法である^{10), 15)}。この方法は、他の方法に比べて応力値を迅速に再現性よく測定できるという特徴を持っている^{8), 10)~12)}。

この研究は、窒化けい素と並んで構造用ファインセラミックスとして代表的な炭化けい素の残留応力を測定するために、ガウス曲線法を用いて応力定数および弾性定数を決定し、その標準偏差を解析的に求めてこれらの測定値の信頼度を検討したものである。

2 X線の弾性定数と応力定数の標準偏差

X線の弾性定数と応力定数の標準偏差の求め方については前報で述べたので、ここではその結果のみを述べる。また、ガウス曲線法による回折線ピーク位置およびその標準偏差の求め方については前報^{10), 15)}に譲る。

2・1 コンプライアンスと応力定数

ここで述べる諸式は、平面応力状態にある等方性弾性体に対する弾性力学の理論から導かれる¹³⁾。いま、縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν とすると、コンプライアンスと呼ばれる定数 s_1 、 s_2 は次式で与えられる^{16), 17)}。

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= -\frac{\nu}{E} \\ s_2 &= \frac{2(\nu+1)}{E} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、定数 β を次のように定める。

$$\beta = \frac{180 \tan \theta_0}{\pi}$$

ただし、 θ_0 は無応力状態の試料のブラッグ角である。

いま、試験片に単軸応力 τ を加えるものとすれば、 $\sin^2 \psi$ 線図の勾配 M は応力 τ に対して直線となる。この直線の勾配を B とすれば、

$$B = -\beta s_2 = \frac{1}{K} \quad (2)$$

となる。ただし、 K は応力定数で

$$K = -\frac{1}{\beta s_2} \quad (3)$$

である。また、このとき $\sin^2 \psi$ 線図の切片 N は単軸応力 τ に対して直線となるので、この直線の勾配を C とすれば

$$C = -2\beta s_1 \quad (4)$$

となる。

2・2 $\sin^2 \psi$ 線図の勾配、切片および応力値の標準偏差

いま、 k 個の ψ 角において k 個のピーク位置を測定して応力値を求めるものとする。このように X 線で測定した応力値を、今後 S で表す。ここで

$$u_i = \sin^2 \psi_i$$

とおき、 $\sin^2 \psi$ 線図上の k 個の点 (u_i, p_i) に最小二乗法を用いて当てはめた直線の勾配 M 、切片 N および応力値 S を求めるものとすれば、 M は

$$M = \Sigma' a_i p_i \quad (5)$$

となる。ただし、 Σ' は $i=1$ から k までの和をとることを表し

$$a_i = \frac{k u_i - \Sigma' u_i}{k \Sigma' u_i^2 - (\Sigma' u_i)^2}$$

である。応力値 S は、次式から求まる。

$$S = KM = K \Sigma' a_i p_i \quad (6)$$

$\sin^2 \psi$ 線図の勾配 M と応力値 S の分散 σ_M^2 と σ_S^2 は、式(5)と(6)に分散の加法性の定理を使うと

$$\sigma_M^2 = \Sigma' a_i^2 \sigma_{p_i}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_S^2 = K^2 \Sigma' a_i^2 \sigma_{p_i}^2 \quad (8)$$

となる。また、 $\sin^2 \psi$ 線図の切片 N とその分散 σ_N^2 は、次式で与えられる。

$$N = \Sigma' c_i p_i \quad (9)$$

$$\sigma_N^2 = \Sigma' c_i^2 \sigma_{p_i}^2 \quad (10)$$

ただし

$$c_i = \frac{1 - a_i \Sigma' u_i}{k}$$

である。

2・3 X線の弾性定数および応力定数の標準偏差

いま、試験片に与えた単軸応力 τ_i に対する $\sin^2 \psi$ 線図の勾配を M_i 、切片を N_i とすれば、それぞれ m 個の点 (τ_i, M_i) および (τ_i, N_i) ($i=1 \sim m$) に最小二乗法によって当てはめた直線の勾配 B および C は次式で与えられる。

$$B = \Sigma'' b_i M_i \quad (11)$$

$$C = \Sigma'' b_i N_i \quad (12)$$

ただし、 Σ'' は $i=1$ から m までの和をとることを表し

$$b_i = \frac{m \tau_i - \Sigma'' \tau_i}{m \Sigma'' \tau_i^2 - (\Sigma'' \tau_i)^2}$$

である。

式(11)と(12)を式(2)と式(4)に代入すれば

$$s_2 = -\frac{\Sigma'' b_i M_i}{\beta} \quad (13)$$

$$s_1 = -\frac{\Sigma'' b_i N_i}{2\beta} \quad (14)$$

s_2 と s_1 の分散 $\sigma_{s_2}^2$ と $\sigma_{s_1}^2$ は、それぞれ式(13)と式(14)に

分散の加法性の定理を用いれば

$$\sigma_{s_2}^2 = \frac{\Sigma'' b_i^2 \sigma_{M_i}^2}{\beta^2} \quad (15)$$

$$\sigma_{s_1}^2 = \frac{\Sigma'' b_i^2 \sigma_{N_i}^2}{4\beta^2} \quad (16)$$

となる。また応力定数 K は、式(2)に式(11)を代入すると

$$K = \frac{1}{\Sigma'' b_i M_i} \quad (17)$$

となる。 K の分散は

$$\sigma_k^2 = K^4 \Sigma'' b_i^2 \sigma_{M_i}^2 \quad (18)$$

となる。

縦弾性係数 E とポアソン比 ν は、式(1), (13)および(14)から

$$E = -\frac{\beta}{\Sigma'' b_i (M_i + N_i)} \quad (19)$$

$$\nu = -\frac{\Sigma'' b_i N_i}{\Sigma'' b_i (M_i + N_i)} \quad (20)$$

となる。また E と ν の分散は次式で与えられる。

$$\sigma_E^2 = \frac{4\beta^2}{(\Sigma'' \Sigma' B_{ij} p_{ij})^4} \Sigma'' \Sigma' B_{ij}^2 \sigma_{p_{ij}}^2 \quad (21)$$

$$\sigma_\nu^2 = \frac{\Sigma'' \Sigma' [A_{ij} \Sigma'' \Sigma' B_{ij} p_{ij} - B_{ij} \Sigma'' \Sigma' A_{ij} p_{ij}]^2 \sigma_{p_{ij}}^2}{(\Sigma'' \Sigma' B_{ij} p_{ij})^4} \quad (22)$$

ただし

$$A_{ij} = b_i c_j$$

$$B_{ij} = b_i (a_j + c_j)$$

で、 Σ'' は $i=1$ から m までの和を、また Σ' は $j=1$ から k までの和をとることを示し、 p_{ij} は τ_i の単軸応力を加えた時の $\sin^2\phi$ 線図の j 番目のピーク位置を表すものとする。

式(7), (8), (10), (15), (16), (18), (21)および(22)からわかるように、 $\sin^2\phi$ 線図の勾配 M 、切片 N 、応力 S 、X 線のコンプライアンス s_1 , s_2 、応力定数 K 、縦弾性係数 E およびポアソン比 ν の分散は、すべてピーク位置の分散 σ_p^2 の一次結合として表される。定時計数法を用いたガウス曲線法、放物線法、半価幅法および重心法によるピーク位置の分散 σ_p^2 は、一回の測定値から解析的に求まるので、応力値、X 線の弾性定数および応力定数などの分散も上記の式を用いれば一回の測定値から計算できる。 σ_p^2 は X 線強度 (cps) とプリセットタイム (sec) との積である X 線計数値 (カウント) に比例して小さくなる⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。したがって、上記の値の標準偏差は X 線強度とプリセットタイムの平方根に逆比例して小さくなる。これは、X 線計数値を大きくするほどこれらの測定値のばらつきが小さくなるという経験上よく知られている事実を、定量的に説明している。

3 実験方法

材料は、常圧焼結した炭化けい素 SiC である。試験片の形状は角型で、その寸法は $10.0 \times 50.0 \times 5.0$ mm である。試験片はダイヤモンドカッターで切断後、粒度 200 番のダイヤモンド砥石で約 $50 \mu\text{m}$ 研削した。その後、X 線諸定数の測定面は粒度 400, 600, 1000 番のダイヤモンド砥石で順に約 $100 \mu\text{m}$ 試験片の長手方向に研削し、さらに最後に 1500 番のダイヤモンド砥粒を用いて約 $15 \mu\text{m}$ ラップ研磨して仕上げた。

つぎに、試験片を Fig. 1 に示した負荷装置に取り付けて試験片に一樣な曲げモーメントを加え、試験片の

Fig. 1. Device to apply bending stress to specimen.

10.0×50.0 mm の面の中央部の応力を長手方向に X 線で測定した。また同時に、試験片の裏面に貼付したゲージ長 5 mm のひずみゲージで試験片に生じたひずみを測定した。また、この負荷装置には Fig. 1 に示した計量リングが取り付けられており、これによって試験片に加えた荷重を求めた。

X 線応力測定は、著者らの開発したプログラマブルな自動 X 線回折装置⁽⁴⁾に平行ビーム光学系のスリットを取り付けて並傾法を用いて Table I の条件で行った。回折線ピーク位置は、回折面法線⁽⁴⁾の方向を一定に保つ ϕ 一定法を用いて、ガウス曲線法によって決定した。

X 線によって応力値を精度よく求めるためには、できるだけ回折角の高い回折線を選ぶ必要がある。回折線を CuK α 線と CrK α 線を用いて測定したところ、CrK α 線では 130° 以上の回折角に十分な強度を持つ孤立した回折線が得られなかったので、本研究では CuK α 線を用いて (2.0.15) と (306) 面の回折線を測定した。Table I に示したプリセットタイム (X 線計数値の測定時間) は、これら二つの回折面からの最大計数値がほぼ等しくなるように選んだ。

回折面法線と試料面法線とのなす角 ψ は、 $\sin^2\psi$ がほぼ等間隔となるように (2.0.15) 面に対しては、

Table I. Conditions for X-ray stress measurement.

Characteristic X-rays	Cu K α
Diffraction planes	(2.0.15) and (306)
Filter	Nickel foil
Tube voltage, kV	40
Tube current, mA	25
Divergent angle of slit, deg	0.5
Irradiated area, mm ²	2×7
Angular interval, deg	0.05
Present time, sec	8.5 for (2.0.15) plane 2.8 for (306) plane

0, 15, 25, 30, 35, 40, 45° の 7 点を, また, (306) 面に対しては 0, 15, 20, 25, 30, 35, 40° の 7 点を選んだ。

4 実験結果

4・1 回折線ピークのガウス曲線近似

Fig. 2 は, 自動 X 線回折装置を用いてプリセットタイム 1 秒で測定した X 線計数値すなわち X 線強度 (cps) を X-Y プロットに連続記録させて得た回折線である。

Fig. 2. Diffraction line of silicon carbide with $\text{CuK}\alpha$ radiation.

Fig. 3 は, (2.0.15) 面の回折線で, 縦軸の X 線計数値の補正値 z には, バックグラウンド (BG) と LPA 因子で補正した値をとっている。Fig. 3 から分かるように, $\text{K}\alpha_1$ 線と $\text{K}\alpha_2$ 線による回折線が分離して現れている。図に示した曲線は, $0.6z_{\text{max}}$ 以上の点から最小二乗法によって計算したガウス関数で, $\text{K}\alpha_1$ 単一波長による回折線はすそ野に近い部分までガウス関数でよく近似できることを Fig. 3 は示している。Fig. 4 は Fig. 3 と同様であるが, BG 補正を省いて X 線計数値の実測値 y を LPA 因子のみで補正した場合である。図の曲線は, $0.7z_{\text{max}}$ 以上の各点から最小二乗法によって計算したガウス関数である。Fig. 4 から

Fig. 3. A Gaussian function fitted to $\text{CuK}\alpha_1$ diffraction profile corrected for background for (2.0.15) plane.

分かるように, BG 補正を省いても回折線ピークはガウス関数で近似できる。

Fig. 5 と Fig. 6 は, (306) 面に対する結果で, Fig. 5 は X 線計数値を BG 補正と LPA 因子で補正した場合, また, Fig. 6 は BG 補正を省いて LPA 因子で補正した場合である。Fig. 3~6 の結果より, BG を補正した場合には, (2.0.15) 面と (306) 面のそれぞれに対して 0.6 および $0.65z_{\text{max}}$ 以上の点を, また BG 補

Fig. 4. A Gaussian function fitted to $\text{CuK}\alpha_1$ profile of (2.0.15) plane which is not corrected for background.

Fig. 5. A Gaussian function fitted to $\text{CuK}\alpha_1$ profile corrected for background for (306) plane.

Fig. 6. A Gaussian function fitted to $\text{CuK}\alpha_1$ profile of (306) plane which is not corrected for background.

正を省略した場合には、いずれの面に対してでも $0.7z_{\max}$ 以上の点を用いてピーク位置を計算した。Fig. 7 は、自動 X 線回折装置を用いたガウス曲線法による回折線ピーク位置の測定例で、BG 補正を省略した場合を示した。

4・2 バックグラウンド補正が応力値に及ぼす影響

Table II は、BG 補正が応力値の及ぼす影響を調べるために、試験片に加えた種々の曲げ応力を X 線で測定した結果で、BG 補正をした場合としない場合の両応力値を示した。応力計算に用いた応力定数 K は、

Fig. 7. Peak position determination by Gaussian curve method with automated X-ray diffractometer.

本研究で X 線的に測定した後に Table III で示す値を用いた。また Table II には、式(8)から計算した応力値の標準偏差 σ_s から応力値の 95 % 信頼区間を求めて示してある。Table II から分かるように、BG 補正した応力値とこの補正を省略した応力値は、信頼限界が示すばらつきの範囲内にあり差は認められない。また、応力値の標準偏差 σ_s または 95 % 信頼区間 $\pm 1.96 \sigma_s$ も、BG 補正した場合の値がしなかった場合の値に比べてわずかに小さい値を取っているほかは、ほとんど差は認められない。したがって、ガウス曲線法による炭化けい素の X 線応力測定では、鉄鋼材料の場合と同様に、BG 補正は応力値に影響しないので省略できる。これは、BG 補正を省略することによって測定時間を短縮できるのみならず、セラミックスのように多くの回折線が互いに接近して現れる材料に対しては、BG を正確に求めることができない場合が多いので、実用上重要な結論であると考えられる。このように BG 補正は応力値に影響しないので、これ以後は BG 補正を省略して求めたピーク位置を用いた測定結果のみを示す。

4・3 X 線の弾性定数および応力定数の決定

Fig. 8 と 9 は、種々の曲げ応力を負荷した試験片の (2.0.15) 面と (306) 面の $\sin^2\psi$ 線図である。これらの図には、解析的に求めたピーク位置の標準偏差 σ_p からピーク位置の 95 % 信頼区間 $\pm 1.96 \sigma_p$ を求め、その最大値と最小値を示してある。前報のアルミナおよ

Table II. Influence of background correction on stress values.

Diffraction plane	Applied stress, τ , MPa	95 % confidence limits for stress, $S \pm 1.96 \sigma_s$, MPa	
		Not corrected for background	Corrected for background
(2.0.15)	0	-18 ± 10	-21 ± 11
	63	49 ± 9	51 ± 11
	120	106 ± 10	103 ± 11
	186	184 ± 9	181 ± 11
	247	223 ± 10	227 ± 11
(306)	0	35 ± 18	36 ± 18
	62	82 ± 17	85 ± 18
	122	154 ± 16	156 ± 17
	186	228 ± 17	226 ± 17
	248	272 ± 16	271 ± 16

Table III. 95 % confidence limits and relative error (standard deviation/measured value) of X-ray elastic constants and stress constant.

		(2.0.15) plane		(306) plane	
		95 % confidence limits	Relative error, %	95 % confidence limits	Relative error, %
Compliances	$(1+\nu)/E, (10^6 \text{GPa})^{-1}$	2.61 ± 0.13	2.5	2.76 ± 0.24	4.4
	$\nu/E, (10^6 \text{GPa})^{-1}$	3.70 ± 0.37	5.1	3.63 ± 0.54	7.6
Young's modulus, E , GPa		446 ± 20	2.3	417 ± 35	4.2
Poisson's ratio ν		0.165 ± 0.013	3.9	0.151 ± 0.016	5.3
Stress constant K , MPa/deg		-971 ± 48	2.5	-1337 ± 116	4.4

Fig. 8. $\sin^2\psi$ diagram of (20.15) plane for various applied stresses.

Fig. 9. $\sin^2\psi$ diagram of (306) plane for various applied stresses.

び窒化けい素の $\sin^2\psi$ 線図はかなり良好な直線性を示したが、これに対して特に Fig. 8 に示した炭化けい素の (20.15) 面では信頼区間の示すばらつきの大きさに比べて各点の直線からのずれがやや大きい。この原因を明らかにするために、研削による加工層の ψ スプリット現象について調べたが、この現象は認められなかった。Fig. 8 のように各点の直線性があまり良くないのは、材料そのものの特性または他の原因によるものであるのかはまだ明らかではない。しかし、本研究ではひとまずピーク位置の各点は、たとえ良好な直線性を示さなくても、負荷応力に比例して変化するものと考えて、各点に最小二乗法を用いて当てはめた直線を用いて応力値や X 線の諸定数を求めた。

Fig. 10 と 11 は、それぞれ (20.15) 面と (306) 面の $\sin^2\psi$ 線図の勾配 M と負荷応力 τ との関係を示した結果である。これらの図には、式(7)から求めた M の標準偏差 σ_M から M の 95 % 信頼区間 $\pm 1.96 \sigma_M$ を求めて示してある。Fig. 10, 11 の各点は、信頼区間が示すばらつきの範囲内でかなり良好な直線性を示している。これらの結果は、Fig. 8 と Fig. 9 のように $\sin^2\psi$ 線図の直線性は劣っても、ピーク位置の各点は負荷応力にはほぼ比例して変化することを示している。

Fig. 10. Variation of slope of $\sin^2\psi$ diagram and its 95 % confidence interval with applied stress for (20.15) plane.

Fig. 11. Variation of slope of $\sin^2\psi$ diagram and its 95 % confidence interval with applied stress for (306) plane.

Fig. 12 と 13 には、それぞれ Fig. 8 と Fig. 9 から求めた $\sin^2\psi$ 線図の切片 N と負荷応力 τ の関係を示した。これらの図には、式(10)から計算した切片 N の 95 % 信頼区間も示してある。Fig. 12 と 13 は、切片 N の各点は式(3)が示す通りかなり良好な直線性を示している。

Table III には、X 線的に測定したコンプライアンス、縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν および応力定数 K の 95 % 信頼限界および相対誤差を示した。これらの値の標準偏差は、式(15)(16)(18)(21)(22)から計算した。Table III から分かるように、(20.15) と (306) 両回折面に対する X 線のコンプライアンスおよび弾性定数 E 、 ν

Fig. 12. Variation of intercept of $\sin^2\psi$ diagram and its 95 % confidence interval with applied stress for (20.15) plane.

Fig. 13. Variation of intercept of $\sin^2\psi$ diagram and its 95 % confidence interval with applied stress for (306) plane.

には信頼区間の示すばらつきの大きさ以上の有意な差は認められない。すなわち、これら二つの回折面に対する X 線の弾性定数には、顕著な回折面依存性は認められない。炭化けい素の弾性定数の回折面依存性については、今後さらに詳しい実験が必要であると思われる。なお、Fig. 1 の負荷装置で機械的に測定した縦弾性係数 E は 425 GPa であった。この値は、Table III に示した X 線的に測定した E の値にはほぼ一致している。

本研究のように、同一試験片に種々の負荷応力を与えて X 線で応力を測定する場合には、Table II に示したように応力値の標準偏差 σ_s は応力値 S の大きさに関係せず、(2.0.15) 面に対しては約 5 MPa、(306) 面に対しては 8 ~ 9 MPa であった。これに対して、Table III に示した X 線の諸定数の相対誤差は 2.3 ~ 7.6 % である。(2.0.15) 面に比べて (306) 面の X 線の諸定数の相対誤差は 1.4 ~ 1.8 倍大きい。これは、(2.0.15) 面のピーク位置決定に用いた X 線計数値の数 n が 10 または 11 であるのに対して、(306) 面では 8 ~ 11 でやや小さい上に、 $\sin^2\psi$ の値の範囲が (2.0.15) 面の方が (306) 面よりも 1.2 倍大きい^{19), 20)}ためである。回折線の広がりを表す $GCP\alpha$ は、(2.0.15) 面では 0.30° であるのに対して (306) 面では 0.27° で、(2.0.15) 面の回折線の方がわずかに広い。

5 結 論

ガウス曲線法を用いて炭化けい素の (2.0.15) 面と (306) 面の応力測定および弾性定数を $CuK\alpha$ 線を用いて測定するとともに、X 線強度固有の統計変動によって生ずるこれらの測定値のばらつきの大きさを表す標準偏差を解析的に求め、これらの測定値の信頼度を検討した。得られた主な結論は、次の通りである。

(1) $CuK\alpha_1$ 単一波長の X 線による (2.0.15) 面と (306) 面の回折線を用いて、炭化けい素の応力を測定できる。

(2) バックグランド補正は、応力値とその標準偏差にはほとんど影響しないので省略できる。

(3) (2.0.15) 面と (306) 面の X 線の弾性定数、縦弾性係数およびポアソン比の 95 % 信頼限界は、Table III に示した通りである。

(4) (2.0.15) 面と (306) 面の X 線の弾性定数には、信頼区間が示すばらつきの大きさ以上の差はなく、顕著な回折面依存性は認められなかった。

(5) 本研究で用いた実験条件における (2.0.15) 面と (306) 面の応力値の標準偏差は応力値の大きさに依存せず、それぞれ 5 MPa および 8 ~ 9 MPa であったのに対して、X 線の縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν および弾性定数 K の相対誤差は、(2.0.15) 面では 2.3 ~ 3.9 %、(306) 面では 4.2 ~ 5.3 % であった。

参 考 文 献

- 1) 田中啓介, 松井英治, 栗村隆之, 秋庭義明, 材料, **36**, 792 (1987).
- 2) 田中啓介, 栗村隆之, 松井英治, 秋庭義明, 材料, **36**, 817 (1987).
- 3) 岸本秀弘, 上野 明, 河本 洋, 近藤真司, 材料, **36**, 810 (1987).
- 4) 栗田政則, 崎山勝則, 酒井 均, 矢田敏夫, 宮川松男, 日本機械学会論文集, A-54, 854 (1988).
- 5) 栗田政則, 小野伸幸, 日本機械学会論文集, 掲載予定.
- 6) M. P. Hilley ed., "Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction — SAE J784a", pp. 12-16 (1980) SAE.
- 7) 栗田政則, 日本機械学会論文集, **43**, 1358 (1977).
- 8) M. Kurita, Journal of Testing and Evaluation, **11**, 143 (1983).
- 9) M. Kurita, Journal of Testing and Evaluation, **9**, 133 (1981).
- 10) M. Kurita, Journal of Testing and Evaluation, **9**, 285 (1981).
- 11) M. Kurita, Journal of Testing and Evaluation, **10**, 38 (1982).
- 12) 栗田政則, 天野 順, 坂本 勲, 材料, **31**, 609 (1982).
- 13) 栗田政則, 日本機械学会論文集, 掲載予定.
- 14) H. P. Klug and L. E. Alexander, "X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials," pp. 291, 635 (1974) John Wiley.
- 15) M. Kurita, "Role of Fracture Mechanics in Modern Technology," p. 863 (1987) Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland).
- 16) E. Macherauch, Exp. Mech., **6**, 140 (1966).
- 17) E. Macherauch and U. Wolfstieg, Mater. Sci. Eng., **30**, 1 (1977).
- 18) 本間 仁, 春日屋伸昌, "次元解析・最小 2 乗法と実験式", p. 92 (1982) コロナ社.
- 19) 栗田政則, 塑性と加工, **26**, 869 (1985).
- 20) M. Kurita, Advances in X-ray Analysis, **31**, 277 (1988).