中性子回折によるセラミックス内部の応力測定*

坂井田 喜久^{*1}, 田 中 啓 介^{*2}, 原田 慎太郎^{*3}
皆 川 宣 明^{*4}, 森 井 幸 生^{*4}, 池 田 泰^{*3}

Measurement of Internal Stress of Ceramics by Neutron Diffraction Method

Yoshihisa SAKAIDA, Keisuke TANAKA, Shintaro HARADA,
Nobuaki MINAKAWA, Yukio MORII and Yasushi IKEDA

The neutron diffraction method is a useful nondestructive technique to measure the internal stress distributed within a ceramic component because the neutron penetration depth for ceramics is more than one millimeter. The diffraction from the Si_3N_4 (321) plane by monochromatic neutrons (wavelength $\lambda=1.99\text{\AA}$) was used for stress measurement. The linear absorption coefficient for Si_3N_4 was 0.69 cm^{-1} , so that the internal stress distributed within specimens less than 5.4 mm thick could be measured by the neutron diffraction method. In order to generate a linear internal stress distribution, a bending moment was applied to a silicon nitride specimen, the thickness of which was 4 mm. The incident beam angle and the widths of the incident and diffracted beam slits were adjusted to limit the diffracting area. The distribution of internal stress was measured by scanning the diffracting area from the tensile side to the compressive side. The stress in the diffracting area was determined from the change in the diffraction angle. The measured stress distribution was almost identical to the applied stress distribution. It is concluded that the internal stress of ceramic components can be measured by the neutron diffraction method.

Key Words: Ceramics, Neutron Diffraction Method, Stress Measurement, Internal Stress

1. 結 言

セラミックスの焼結や研削などによる残留応力は機械的性質に大きく影響するため、これらを正しく評価することは重要である。セラミックスの残留応力測定法としては金属と同様におもに X 線応力測定法が用いられてきた⁽¹⁾。しかし、X 線応力測定では X 線侵入深さが数 10~100 μm と非常に浅く、表面近傍の応力しか測定することができない。一方、中性子は、同程度の波長の X 線に比べて吸収係数が数百分の 1 から数千分の 1 と小さく、その侵入深さは数 mm 以上と深いので、セラミックス内部の応力測定への適用が期待できる⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、セラミックス内部の応力測定に中性子回折を用いた例⁽³⁾⁽⁴⁾は少なく、具体的な測定方法については不十分な点が多い。そこで、本研究では、セラミックス内部の応力測定法として中性子回折を試み、応力測定の可能性と問題点について検討した。なお、

本報では部材内部に存在する応力を内部応力 (Internal stress) と称する。実験では、窒化けい素試験片に四点曲げ応力を負荷して厚さ方向に応力こう配を発生させ、試験片内部から回折される中性子の回折角の変化から応力を求めた。

2. 測 定 原 理

2.1 中性子回折によるひずみ測定 中性子回折は、X 線と同様に Bragg の条件に従う。

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 λ は中性子の波長、 d は回折面間隔である。よって、内部応力によるひずみ $\langle \epsilon \rangle$ は次式のように回折角の変化 $\Delta \theta$ として測定できる。

$$\langle \epsilon \rangle = \Delta d / d = -\cot \theta_0 \Delta \theta \quad \cdots \cdots (2)$$

なお、 θ_0 は無ひずみ時の回折角である。よって、中性子回折においても平面応力状態の場合、X 線応力測定 (例えば、 $\sin^2 \psi$ 法) と同様に試料面法線と回折面法線のなす角度 ψ を変化させることにより内部応力を測定することができる。しかし、中性子のほとんどは試料を透過して回折中性子の強度は著しく小さいので、 $\sin^2 \psi$ 法で応力測定を行うには X 線に比べて 10~100 倍ほど時間がかかり、あまり実用的ではない。

一方、中性子回折では、中性子の侵入深さが数 mm

* 原稿受付 1996 年 1 月 29 日。

*¹ 正員、(財)フラインセラミックスセンター(〒456 名古屋市熱田区六野 2-4-1)。

*² 正員、名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

*³ (財)フラインセラミックスセンター。

*⁴ 日本原子力研究所東海研究所(〒319 茨城県那珂郡東海村白方)。

以上であることを利用して、図1に示すように入射スリットと反射スリットを用いて回折線幅 w を調整する、または試料表面を Cd はく等でマスクすることによって任意位置から回折される中性子のみを検出できる。よって、内部応力状態が不明の場合は、任意位置 (x, y, z) に対して最低6方向から中性子を入射し、それぞれの回折中性子の角度変化から求められるひずみ成分 $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ より内部応力 σ_{ij} を評価することができる。本研究では、スリット幅 w を調整することにより深さ z_0 で表される領域のひずみ成分 $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ を求める方法を検討した。

2・2 中性子の有効侵入深さ 深さ z における微小幅 $dx \times$ 微小厚さ dz の領域から回折される中性子の強度 $dI(z)$ は、入射中性子の強度を I_0 、線吸収係数を μ とすると、

$$dI(z) = C dx I_0 \exp[-\mu \delta(z)] dz \quad (3)$$

と表される(図1参照)。ここで、 C は比例定数、 $\delta(z)$ は中性子が物質内を通過した距離であり、

$$\delta(z) = 2z / \sin \theta \quad (4)$$

である。したがって、表面から深さ z までの領域から回折される強度 I と無限大の深さから回折される全回折強度 I_∞ との比が $I/I_\infty = 1 - e^{-1}$ となる深さを中性子の有効侵入深さ T と考えると、次式のように表される。

$$T = \sin \theta / 2\mu \quad (5)$$

2・3 中性子回折により測定されるひずみ 図2は、有限厚さ t の試験片に対する中性子による応力測定を模式的に示したものである。いま、深さ z 方向のひずみ分布を $\varepsilon(z)$ とすると、深さ z_0 で表される回折領域から中性子回折によって得られるひずみ $\langle \varepsilon(z_0) \rangle$ は次式のような重み付平均値として表される。

Fig. 1 Principle of stress measurement using neutron diffraction method. The diffracting volume can be restricted by adjusting the beam slit widths or masking the surface of specimen

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon(z_0) \rangle &= \frac{\int_{z_1}^{z_2} \varepsilon(z) dI(z) dz}{\int_{z_1}^{z_2} dI(z) dz} \\ &= \frac{\int_{z_1}^{z_2} \varepsilon(z) \exp[-\mu \delta(z)] dx dz}{\int_{z_1}^{z_2} \exp[-\mu \delta(z)] dx dz} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、深さ z における微小領域の幅 dx は z_0 と z の関数であり、次式で定義する関数 $x_i(z_0, z)$ で表される。

$z_1 \leq z \leq z_0$ のとき

$$dx = x_1(z_0, z) = (2z - 2z_0 + w / \cos \theta) / \tan \theta \quad (7)$$

$z_0 \leq z \leq z_2$ のとき

$$dx = x_2(z_0, z) = (-2z + 2z_0 + w / \cos \theta) / \tan \theta \quad (8)$$

一方、スリット幅 w と回折角 θ によって調整された回折領域は、図2に示すように z_0 の深さによって①～⑤のタイプに分けられ、各領域のひずみ $\langle \varepsilon(z_0) \rangle$ は、

① $-w/2 \cos \theta \leq z_0 \leq 0$ のとき、

$$\langle \varepsilon(z_0) \rangle = \frac{\int_0^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} \varepsilon(z) x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_0^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} \quad (9)$$

② $0 \leq z_0 \leq w/2 \cos \theta$ のとき、

$$\langle \varepsilon(z_0) \rangle = \frac{\int_0^{z_0} \varepsilon(z) x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_0^{z_0} x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} + \frac{\int_{z_0}^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} \varepsilon(z) x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0}^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} \quad (10)$$

③ $w/2 \cos \theta \leq z_0 \leq t - w/2 \cos \theta$ のとき、

$$\langle \varepsilon(z_0) \rangle = \frac{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^{z_0} \varepsilon(z) x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^{z_0} x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} - \frac{\int_{z_0}^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} \varepsilon(z) x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0}^{z_0 + (w/2 \cos \theta)} x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} \quad (11)$$

④ $t - w/2 \cos \theta \leq z_0 \leq t$ のとき,

$$\langle \varepsilon(z_0) \rangle = \frac{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^{z_0} \varepsilon(z) x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^{z_0} x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} + \frac{\int_{z_0}^t \varepsilon(z) x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0}^t x_2(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} \quad (12)$$

⑤ $t \leq z_0 \leq t + w/2 \cos \theta$ のとき,

$$\langle \varepsilon(z_0) \rangle = \frac{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^t \varepsilon(z) x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz}{\int_{z_0 - (w/2 \cos \theta)}^t x_1(z_0, z) \exp[-\mu \delta(z)] dz} \quad (13)$$

となる。

2・4 内部応力評価 一般に、特定の回折面に対して中性子回折やX線回折により測定されるひずみ $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ と応力 σ_{ij} の関係は、回折面依存性⁽⁵⁾⁽⁶⁾を有し、機械的な弾性定数で一概に表すことができない。すなわち、特定の回折面に対する弾性定数⁽⁶⁾を求める必要がある。本研究では、X線(Cr-K α 線)を用いて321回折に対する弾性定数を求めて応力の算出に用いた。

3. 実験方法

3・1 供試材および試験片 供試材は、ガス圧焼結窒化けい素[EC 141, 日本特殊陶業(株)]である。そのおもな機械的性質を表1に示す。内部応力測定用試験片は、幅10 mm×厚さ4 mm×長さ60 mmの曲げ試験片である。試験片の表面は粒度800番のダイヤモンド砥石で研削加工した後、平均粒径2 μ mのダイヤモンドスラリーを用いてラップ研磨した。

3・2 内部応力の印加 内部応力分布として試験片に一定の四点曲げ応力を負荷し、厚さ方向に応力こう配を与えた。曲げ応力は、試験片の圧縮面側にひずみゲージを貼り付けた後、上スパン44 mm、下スパン

20 mmの四点曲げ治具を用いて負荷した。なお、ひずみゲージから測定した曲げ応力負荷方向の最大圧縮ひずみは $(\varepsilon_x)_{\max} = -1.76 \times 10^{-3}$ であった。

3・3 中性子回折によるひずみ測定 実験は日本原子力研究所の改造3号炉(JRR 3M)で行った。中性子源は中性子導管を通して原子炉外に取り出された熱中性子を用いた。図3は中性子回折装置(DIVE)の外観を示す。回折側に配した一次元検出器と試料台を同時制御することにより θ 2 θ 走査で回折中性子を測定することができる。図4に中性子回折の光学系を示す。熱中性子束は、PG(Pyrolytic graphite)モノクロメータで単色化($\lambda = 1.99$ Å)した後、 2×16 mm²の入射スリットを通して試験片に入射した。また、回折中

Fig. 3 A neutron diffractometer used in an internal stress measurement. A Si₃N₄ specimen subjected to a bending moment was located on the xyz triaxial stage

Table 1 Mechanical properties of material

Density(kg/m ³)	3.23 × 10 ³
4-point bending strength(MPa)	935
Fracture toughness K _{IC} *1(MPa√m)	6.0
Young's modulus E(GPa)	320
Poisson's ratio ν	0.27

*1) K_{IC} was measured by SEPB method.

Fig. 2 Schema of an internal stress measurement by scanning the diffracting area from the one side to the another side of specimen

中性子は ^3He の一次元検出器を用いて $512\text{ ch}=4^\circ$ の範囲を同時測定した。表2に中性子回折のおもな測定条件を示す。なお、中性子回折で得られた回折パターンはガウス分布で近似し、その頂点位置を回折角として求めた。

4. 実験結果および考察

4・1 中性子の線吸収係数 試験片の厚さ方向に中性子を入射し、背面から透過中性子を検出して窒化けい素に対する線吸収係数 μ を求めた。図5は4 mm厚の窒化けい素に入射および透過した中性子の強度分布を示す。中性子の線吸収係数は、強度比 I/I_0 から計算した結果、 $\mu=0.690\text{ cm}^{-1}$ となり、X線の線吸収係数($\text{Cu-K}\alpha: 170\text{ cm}^{-1}$, $\text{V-K}\alpha: 420\text{ cm}^{-1}$)と比べて約 $1/250\sim 1/600$ と非常に小さいことがわかった。

Table 2 Neutron diffraction conditions for stress measurement

Equipment	DIVE(Diffraction Image Visualization Equipment)
Diffraction	321($\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$)
Diffraction angle $2\theta_0(\text{deg})$	95.79
Wave length of neutron ($\text{\AA}$)	1.99
Slit (mm)	A:30 ϕ B:Non C:2 $\times$ 16 D:2 $\times$ 16
Monochromator	Pyrolytic graphite (002)
Detector	$^3\text{He}-1\text{ D PSD}$
Acquisition time (hr)	8

4・2 窒化けい素の中性子回折パターン 応力測定を行う前にリードベルト解析⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾によって窒化けい素の中性子回折パターンを求めた。図6は窒化けい素に $\lambda=1.99\text{ \AA}$ の中性子を照射したときの回折パターン

Fig. 4 Geometry of a neutron diffractometer

Fig. 5 Attenuation of a transmitted beam intensity due to neutron absorption

Fig. 6 Neutron diffraction pattern calculated from reitveld method in contrast to x ray diffraction pattern

を示す。縦軸は111回折の強度を100として規格化した。なお、比較のためCr-K α 線を用いて測定したX線回折パターンをあわせて示す。中性子による回折パターンはX線回折結果とほぼ一致した。しかし、X線回折が外周電子による散乱であるのに対して、中性子回折は原子核による散乱であり、回折強度の比はX線回折パターンと異なる。したがって、応力測定に用いる回折面の選択には注意を要する。

4・3 内部応力測定条件 本研究では、有限厚さ t の窒化けい素試験片に一定の曲げ応力 σ_x を負荷し、試験片厚さ方向の応力こう配を中性子回折によって測定する場合を検討した。まず、スリット幅 w をできるだけ小さくして試験片厚さ方向の応力こう配を精度よく測定する必要がある。そこで、スリット幅を調整し、幅10 mmの試験片に対して10時間程度の照射で十分な回折強度が得られるような条件を検討した。その結果、スリット幅は最小2 mm以上必要であることがわかった。よって、ここではスリット幅を $w=2$ mmとした。また、式(2)においてひずみの測定精度を上げるためには一般に130~160°程度の高角度側の回折

面を選択するほうがよいが、高角度側の回折面を選択すると回折領域の形状が菱形⁽⁵⁾になり、位置分解能が低下して応力こう配を精度よく測定できない。よって、図6の中性子回折パターンから、応力測定用の回折線として90°近傍に存在する321回折を選択し、回折領域がほぼ正方形になるようにした。図7は、DIVEで測定した321回折の中性子回折パターンを示す。

また、図8は窒化けい素の321回折に対する中性子の回折強度比 I/I_∞ を示す。図8の点線と交わる深さ z が有効侵入深さ T を示す。中性子の有効侵入深さはX線と比べて2けた深く、中性子回折では約5.4 mm程度の深さまで応力測定可能であることがわかる。よって、本研究では曲げ試験片の厚みを $t=4$ mmとした。

4・4 曲げ応力分布の測定結果

4・4・1 321回折面の弾性定数

Table 3 X ray elastic constants for the Si₃N₄(321) plane

	$E/(1+\nu)$ (GPa)	E (GPa)	ν
X-ray elastic constants	246	314	0.276

Fig. 7 The diffraction profile from the Si₃N₄ (321) plane by monochromatic neutrons

Fig. 8 Relation between I/I_∞ and penetration depth of several radiations for the Si₃N₄ (321) plane. The depth crossed the dotted line shows an effective penetration depth

Fig. 9 $2\theta - \sin^2\psi$ diagram under several applied strains

Fig. 10 Changes in slope and intercept with applied strain

弾性定数はX線(Cr K α 線)を用いて求めた。実験は、試験片に $\varepsilon_A=0\sim 1500\times 10^{-6}$ の負荷ひずみを負荷し、321回折に対する $2\theta\sin^2\psi$ 線図をそれぞれ求めた。なお、回折角は重心法により求めた。

図9は、負荷ひずみ ε_A に対する $2\theta\sin^2\psi$ 線図を示す。図中の直線は最小二乗法による回帰直線である。また、図10は ε_A に対する回帰直線の傾き M と $\sin^2\psi=0$ における切片 $2\theta_{\psi=0}$ の変化である。負荷ひずみに対する M と $2\theta_{\psi=0}$ の傾きから、321回折面のヤング率とポアソン比を求めた結果を表3に示す。321回折面の弾性定数は、ほぼ機械的な弾性定数と等しくなった。中性子のひずみデータから応力を求めるときこの弾性定数を使用する。

4.4.2 回折角の変化 式(2)より、回折角 2θ は、次式のようになる。

$$2\theta=2\theta_0-2\tan\theta_0\cdot\langle\varepsilon(z_0)\rangle\quad (14)$$

ここでは、負荷応力として曲げ応力 $\sigma_x(z)$ のみを考えている。したがって、曲げ応力による z 方向のひずみ

$\varepsilon(z)$ は直線のひずみこう配を示し、

$$\varepsilon(z)=\varepsilon_0+Az\quad (15)$$

と表される。ここで、 ε_0 は $z=0$ におけるひずみ、 A はひずみこう配である。また、 $\varepsilon(z)$ と $\sigma_x(z)$ の関係は、 y 方向のひずみは拘束されている($\varepsilon_y=0$)と仮定して、次式で与えられる。

$$\varepsilon(z)=-\frac{\nu(1+\nu)}{E}\sigma_x(z)\quad (16)$$

ただし、上式の E 、 ν は機械的ヤング率とポアソン比である。本研究では、 $t=4$ mm、 $w=2$ mmより、 $\varepsilon_0=-6.51\times 10^{-4}$ 、 $A=3.26\times 10^{-4}$ mm $^{-1}$ となる。

図11は、回折領域の深さ z_0 と回折角 2θ の変化を示す。○印は実験値であり、実線は式(6)を式(14)に代入して計算した値である。また、点線は無ひずみ時の回折角 $2\theta_0$ を示す。回折角(図11の○印)の変化は計算結果とほぼ同じ傾向を示した。中性子は回折領域の深さ z_0 が約-1.45 mmの位置から回折し始め、回折領域が試験片の圧縮側表面を突き抜ける5.45 mmの位置まで回折する。入射側表面近傍の回折角は無ひずみ時の回折角 $2\theta_0(=95.79^\circ)$ に比べて高角度側にシフトし、圧縮ひずみが存在することがわかる。また、深さ z_0 が増加するにつれて回折角は低角度側に変化し、曲げ応力によるひずみ分布の変化とよい一致を示している。以上のように、中性子回折によって4 mm程度の厚さの試験片内部の応力の変化を測定できることがわかった。しかし、測定された回折角の変化量 $\Delta\theta$ は計算値に比べて大きくばらつき、測定精度は低い。今回の測定では、測定時間とデータ点数を最小限にしたため、精度の点では不十分な結果となったが、測定精度の向上に関しては今後の課題である。なお、 $2\theta_0$ は無負

Fig. 11 Variation of diffraction angle with the position of diffracting area within a bent Si $_3$ N $_4$

Fig. 12 Weighted average strain distribution obtained from neutron diffraction. Circle marks show measured strains calculated from Eq. (2)

Fig. 13 Relation between measured stress and applied stress in the diffracting area within a bent Si $_3$ N $_4$

荷状態での $z_0=2\text{ mm}$ における実験値を用いた。

4・4・3 中性子回折による曲げひずみ測定 図12は、式(6)から計算される重み付平均ひずみ $\langle \epsilon(z_0) \rangle$ を回折領域の深さ z_0 に対してプロットした結果を実線で示す。また、○印は回折角の変化量 $\Delta\theta$ を式(2)に代入して求めた実験値である。中性子回折により測定された曲げひずみは、321回折面の弾性定数を用いて計算した重み付平均ひずみ $\langle \epsilon(z_0) \rangle$ の分布とほぼ同じ傾向を示した。

4・4・4 中性子回折による曲げ応力評価 図13は、曲げ応力 σ_x の厚さ方向の変化に対して、式(16)を式(9)～(13)に代入して中性子回折により得られる応力値 σ を計算した結果を実線で示す。また、○印は回折角の変化量から求めたひずみデータを基に内部応力を実験的に評価した結果である。中性子回折により得られる内部応力は曲げ応力 σ_x に対してほぼ1対1の比例関係を示すが、中性子の回折領域が試験片からはみ出すとき応力零の方向にずれる。また、曲げ試験片の引張面側から中性子を入射したため、中性子の吸収によって全体が点線よりわずかに圧縮側にシフトした。実験値は、計算結果よりさらに圧縮側にシフトしたが、厚さ4 mmの窒化けい素試験片の曲げ応力の変化をほぼ評価できたといえる。

以上のように、中性子回折によって得られる回折角の変化量 $\Delta\theta$ を測定することによってセラミックスの応力測定が可能であることがわかった。特に、X線応力測定では測定することが不可能な数mmオーダーの厚さの試験片内部の応力分布を非破壊で評価できることが確かめられた。なお、中性子による二次元および三次元応力分布の評価方法や特定の回折面に対する弾性定数の精密な測定ならびに応力分布評価の分解能向上については今後の課題である。

5. 結 言

セラミックスの内部応力測定法として中性子回折法を試み、窒化けい素の曲げ応力分布を測定した結果次のようなことが明らかになった。

(1) 波長 $\lambda=1.99\text{ \AA}$ の中性子を用いて窒化けい素

に対する吸収係数を求めた結果、 $\mu=0.69\text{ cm}^{-1}$ であった。このことから中性子回折によって約5.4 mm程度の深さまで内部応力測定が可能である。

(2) 窒化けい素の中性子回折パターンはX線回折結果とほぼ一致した。しかし、回折強度比はX線とは異なるため、応力測定用の回折面の選択は中性子回折の結果を用いなければならない。

(3) 中性子回折の入射と反射スリットの幅を調整し、厚さ4 mmの窒化けい素試験片の応力こう配を測定するための条件を検討した。その結果、十分な回折強度を得るための最小スリット幅は2 mmであった。また、応力こう配の測定分解能を向上するために、回折角が90°近傍に位置する321面を選択した。

(4) 窒化けい素試験片に一定の曲げ応力を負荷した状態で中性子回折を行い、厚さ方向のひずみ分布を回折角の変化量 $\Delta\theta$ から評価した。その結果、中性子回折によってX線応力測定では測定することが不可能な数mmオーダーの内部応力を非破壊で評価することが可能であることを確認できた。

最後に、中性子回折パターンのリードベルト解析に際して日本原子力研究所の石井慶信副主任研究員ならびに新潟大学教育学部の鈴木賢治助教授に有益なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- (1) 田中啓介, 機論, **59** 559, A(1993), 505-511.
- (2) Hutchings, M. and Krawitz, A. (編), *Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction*, (1992), 3, Kluwer Academic Publishers.
- (3) Pintschovius, L., Pyka, N., Kussmaul, R., Munz, D., Eignmann, B. and Scholtes, B., *Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction*, (1992), 473, Kluwer Academic Publishers.
- (4) Wang, X., Hubbard, C. R., Alexander, K. B., Becher, P. F., Fernandez-Baca, J. A. and Spooner, S., *Advances in X-Ray Analysis*, **36** (1993), 499, Plenum Press.
- (5) 林真琴・石渡雅幸・皆川宣明・船橋達・Root, J. H., 材料, **44** 504 (1995), 1115-1120.
- (6) 田中啓介・服部光芳・田中拓, 材料, **44** 504 (1995), 1110-1114.
- (7) 泉富士夫, セラミックス, **23** (1988), 557-560.
- (8) 泉富士夫, 応用物理, **59** (1990), 2-17.