

ショットピーニングしたセラミックスの表面下の残留応力分布*

田中啓介^{*1}, 秋庭義明^{*1}, 森下裕介^{*2}Residual Stress Distribution in the Sub-Surface Region of
Shot-Peened CeramicsKeisuke TANAKA^{*3}, Yoshiaki AKINIWA and Yusuke MORISHITA^{*3} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The surface of silicon nitride ceramics was modified by fine particles bombarding (FPB) of high strength steel with 50 μm in diameter and by ultrasonic shot peening (USP) of tungsten carbide shots with 1.1 mm in diameter. The residual stress in the sub-surface region measured by the X-ray diffraction method was compression. For FPB surfaces, the $\sin^2 \psi$ diagram was nonlinear, indicating a steep gradient of the residual stress distribution in the sub-surface region. The distribution of the residual stress was determined by the constant penetration depth method. The stress on the surface was a large compression of about -1.5 GPa and diminished 5 μm below the surface. The compressive stress increased with the shot pressure for FPB. For USP surfaces, the compressive stress was nearly constant with in the layer of 10 μm and increased up to -1.5 GPa with the peening time. The half value breadth of diffraction profiles increased nearly proportionally with the magnitude of the compressive residual stress. The fracture toughness measured by the Vickers indentation method also increased with the compressive residual stress.

Key Words: X-Ray Stress Measurement, Residual Stress, Silicon Nitride, Shot Peening, Fracture Toughness

1. 緒 論

セラミックスは、耐熱性、耐食性、耐磨耗性などの優れた特性のため構造部材としての利用が広がりつつあるが、その脆性に対する対策が望まれている。セラミックスの脆性破壊は残留応力によって大きく支配されるため圧縮残留応力を表面層に積極的に導入することによって、耐磨耗性などの表面強度の向上が期待できる。

金属材料において表面強化法としてショットピーニングは広く利用されている。ピーニングによって、金属表面には圧縮残留応力が導入されるとともに加工硬化によって疲労強度などが大きく向上する⁽¹⁾。この手法はセラミックスに適用する場合、飛翔体であるショットがセラミックス表面へ衝突することによりき裂などの欠陥が導入される可能性が予想されるため、従来ほとんど検討されていない。

Pfeifer ら⁽²⁾⁽³⁾ は窒化けい素およびアルミナの表面に 0.65 mm 直径の WC をショットピーニングしたと

き、表面層には圧縮残留応力が導入されることを X 線測定している。この圧縮残留応力はショット圧力とともに増大し、同時に半価幅も増大することを報告している。さらに、Tomaszewski ら⁽⁴⁾ は、アルミナに 0.6 から 1.1 mm 直径の WC を超音波ピーニングすることにより圧縮残留応力が大きくなることを報告しているが、同時に長時間のピーニングでは表面からの結晶粒が脱落することを観察している。また、Ito ら⁽⁵⁾ は、窒化けい素およびアルミナのピッカース圧こん法による破壊靱性値が、ショットピーニングにより増大したことを報告している。

以上のように、数例ではあるが、ショットピーニングによってセラミックス表面には圧縮残留応力が導入され、表面強度が向上することが報告されている。しかし、残留応力の分布状態は明確でなく、また残留応力と表面強度上昇の関係も明らかでない。さらに、ピーニング条件によっては表面に欠陥が導入される場合もあり、表面を強化するための最適のピーニング条件に関する検討は十分ではない。

本研究では、窒化けい素にピーニング処理をしたときの残留応力分布を X 線で非破壊測定する手法を開発するとともに、ピーニング条件の残留応力分布、および表面の性状への影響を検討する。さらに、ピッカ

* 原稿受付 2005 年 3 月 22 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: ktanaka@mech.nagoya-u.ac.jp

ース圧こん法による破壊靱性を測定することから、最適のピーニング条件を検討する。

2. 実験方法

2.1 材料およびピーニング条件 実験材料には、ガス圧焼結された窒化けい素〔日本特殊陶業(株)製 EC 141〕を用いた。材料のヤング率 320 GPa、ポアソン比 0.27、曲げ強さは 953 MPa、破壊靱性は $6.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ である⁽⁶⁾。試験片は短冊形で、長さ 79 mm、幅 10 mm、厚さ 4 mm の角材であり、79 mm×10 mm 片面にラップ処理を施した。長さ方向には 12 mm 程度の間隔でラップ面に各種異なった条件でピーニング処理を施すとともに、未処理のラップ部分を残した。

ピーニング方法は(1)重力式による微粒子ピーニング(Fine Particle Bombarding: FPB)と(2)超音波ピーニング(Ultrasonic Shot Peening: USP)の2種類である。FPBでは、ショット材に高速度鋼(直径 50 μm)を用い、重力式でショット圧を 0.1~0.8 MPa の範囲で行った。また、USPではショット材に WC(直径 1.1 mm)を用いて、投射時間を 1~4 min の範囲で行った。

2.2 X線応力測定装置 実験室での X 線応力測定には、強力 X 線回折装置(Mac Science, M 21 X)を用いた。回転対陰極から発生した X 線は、多層膜ミラーで平行ビームとなって試料に入射される⁽⁷⁾。また、ゴニオメータは応力測定の側傾法用の傾斜角 χ および並傾法用の傾斜角 ψ を独立に設定することが可能である。X 線源は特性 X 線 Cr-K α 線を使用し、 β - Si_3N_4 の 411 回折を用いた。 β - Si_3N_4 の結晶系は六方晶であり、 $a=0.76044 \text{ nm}$ 、 $c=0.29075 \text{ nm}$ (JCPDS Card: 33-1160)で、回折角は 125.67 deg である。

一方、放射光を用いた応力測定では、大形放射光施設(SPring-8)の共用ビームライン BL 13 XU を使用した。エネルギーレベルは 12.4 keV に設定した。回折角は、回折プロファイルを Gauss 曲線により近似し決定した。 β - Si_3N_4 の 301 回折を使用した、回折角は 33.16 deg である。

2.3 X線応力測定法 X 線測定には通常の $\sin^2 \psi$ 法では側傾法により $\sin^2 \psi$ が 0~0.9 まで測定した。また、FPB 面では、 $\sin^2 \psi$ 線図に非線形が現れ急激な応力こう配が示唆されたため、侵入深さ一定法も使用した。

侵入深さ一定法は、秋庭らによって提案された方法で、並傾法と側傾法を組合わせ侵入深さ一定の状態である $\sin^2 \psi$ に対して、回折角を決定する方法である⁽⁸⁾。いま、並傾法で ϕ_0 傾斜させ、その後側傾法で χ だけ傾けたときの X 線の侵入深さは次式となる。

$$\tau = \frac{\sin^2 \theta - \sin^2 \phi_0}{2\mu \sin \theta \cos \phi_0} \times \cos \chi \quad (1)$$

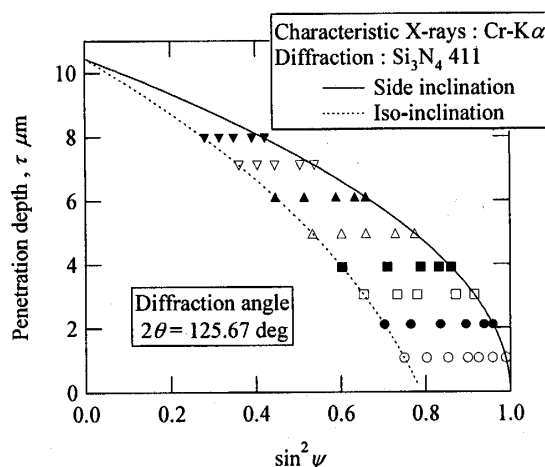
ただし、 2θ は回折角、 μ は線吸収係数である。このとき、 χ を零とし、 ϕ_0 により傾斜角を変化させると、並傾法の侵入深さが求まり次式となる。

$$\tau = \frac{\sin^2 \theta - \sin^2 \phi_0}{2\mu \sin \theta \cos \phi_0} \quad (2)$$

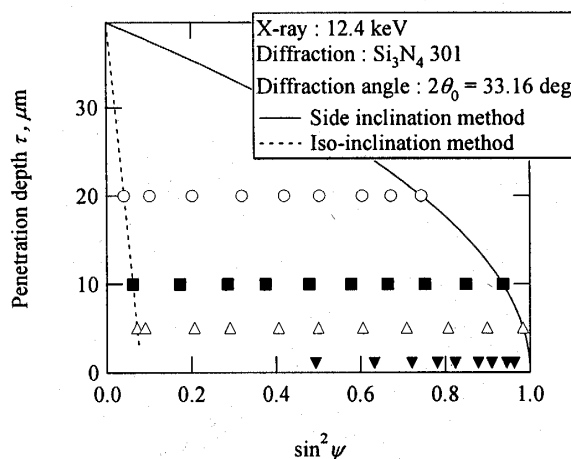
一方、 ϕ_0 を零とし、 χ により傾斜角を変化させると、側傾法の侵入深さが次式で求まる。

$$\tau = \frac{\sin \theta}{2\mu} \cdot \cos \chi \quad (3)$$

本実験条件での側傾法および並傾法を用いたときの、 $\sin^2 \psi$ 値と侵入深さの変化を図 1(a)と(b)に示す。図 1(a)が Cr-K α 線、(b)が放射光によるものである。なお、計算で用いた線吸収係数は Cr-K α 線で $\mu=424.7 \text{ cm}^{-1}$ 、放射光で $\mu=36.05 \text{ cm}^{-1}$ である。



(a) Si_3N_4 411 diffraction by Cr-K α



(b) Si_3N_4 301 diffraction by synchrotron X-rays

Fig. 1 Relation between penetration depth and $\sin^2 \psi$ for Si_3N_4

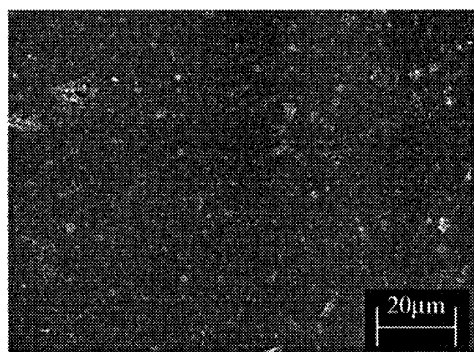
比較すると明らかなように、放射光では低回折角の測定が可能であるので、侵入深さ一定法での $\sin^2 \psi$ の範囲が広い。つまり、侵入深さ一定法は放射光測定に適した方法であるといえる。

侵入深さ一定法において、応力は図中に点で示すように一定の侵入深さでの回折プロファイルの計測によって決定する。このとき、応力こう配がある場合にも、侵入深さが一定であるため、 $\sin^2 \psi$ 線図は直線となり、その傾きから特定の侵入深さでの応力が求められる。このときの傾斜角 ψ は ψ_0 および χ と次の関係にある。

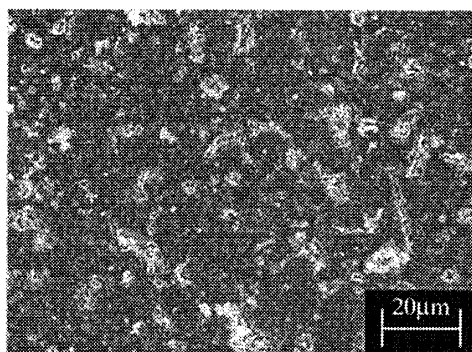
$$\cos \psi = \cos \psi_0 \cos \chi \cdots \cdots (4)$$

上述の侵入深さ一定法による $\sin^2 \psi$ 法は面内等二軸応力状態を仮定している。実際ショットピーニング面の残留応力は等二軸であることが確かめられており、上述の手法が適用できる。なお、等二軸でない場合にも侵入深さ一定法は可能である⁽⁹⁾。

本研究での応力測定は通常の $\sin^2 \psi$ 法および有効侵入深さ一定法で行った。 $\sin^2 \psi$ 線図から応力を算出するときの X 線的弾性定数 $E_X/(1-\nu_X)$ (E_X はヤング率、 ν_X はポアソン比) は、411 回折および 301 回折ともに 260 GPa であり、応力定数は前者で -1 162 MPa/deg、後者で -7 626 MPa/deg である⁽⁹⁾。



(a) Pressure $p=0.1$ MPa



(b) Pressure $p=0.6$ MPa

Fig. 2 SEM micrograph for fine particle bombardment

2.4 表面観察および表面粗さ測定 試験片各部位の表面を走査形電子顕微鏡 (JEOL JSM-6330 F) を用いて観察した。SEM 観察は Au 蒸着を施した後にいった。加速電圧は 10 kV で観察した。

ショットピーニング加工面の表面粗さとして、中心線平均粗さ、および最大粗さを測定した。

2.5 ビッカース圧こんによる破壊靱性評価 試験片各部位にビッカース圧こんを打ち、破壊靱性値を求めた。それぞれの部位に圧こんを 3 点、荷重を 294 N (30 kgf)、押込み時間を 15 s とし、試験を行った。破壊靱性値 K_{IC} [MPa \cdot m^{1/2}] は次式で求めた⁽⁹⁾。

$$K_{IC} = 0.026 \left(\frac{E^{1/2} \cdot P^{1/2} \cdot a}{c^{3/2}} \right) \cdots \cdots (5)$$

ここで、 E はヤング率 (=320 GPa)、 P は圧子荷重 [N]、 c はき裂半長 [m]、 a は圧こんの対角線長さの平均の半分 [m] である。

3. 実験結果および考察

3.1 表面性状 FPB を施した窒化けい素表面の SEM 像を図 2 に示す。図 2(a) のショット圧が 0.1 MPa の場合少し表面傷が認められる。圧力が増加するにつれて表面の傷の割合も増加している。しかし 0.5 MPa 以上の強いショット圧においては傷の状態に大きな変化はなかった。図 2(b) の 0.6 MPa の場合かなりの表面傷が認められる。ショット圧と中心線平均粗さ、および最大粗さの関係を図 3 に示す。各場合 3 回測定し、その平均値を実線で結んだ。平均線中心粗さはショット圧にかかわらずほぼ一定であるが、最大粗さはショット圧の増加とともに増加していく傾向にある。

一方、USP した場合、試験片のエッジ部が欠けるこ

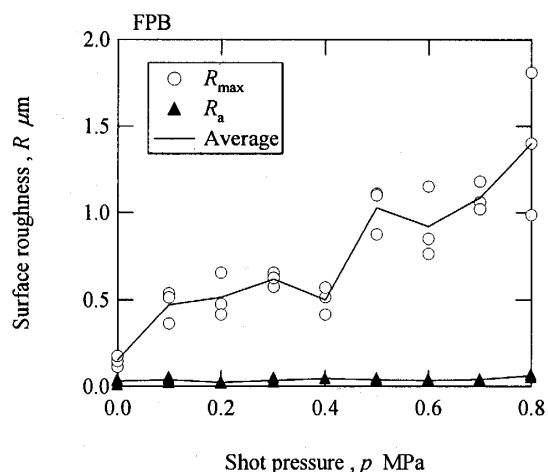
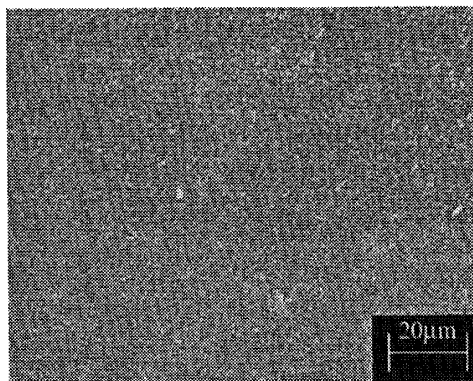


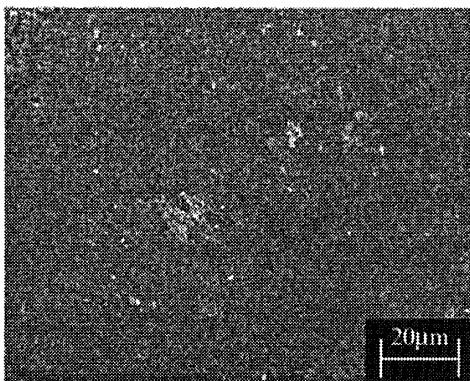
Fig. 3 Relation between surface roughness and shot pressure for fine particle bombardment

とがあったが、中央部ではマクロ的に平坦であった。図4には中央部のSEM像を示す。表面は、FPBに比べ平滑な面である。投射時間が4 minになるとやや表面の荒れが見られる。図5に粗さと投射時間の関係を示す。USPではピーニング未処理部と比較するとピーニング処理を行ったものは中心線平均粗さが増加している。しかし、投射時間が増加すると、粗さはやや増加するようであるが、大きな変化はない。最大粗さも同様の傾向が見られ、ピーニング未処理部と比較すると最大粗さは大きく増加するが、投射時間が長くなるとやや大きくなる傾向があるようであるが、大きな変化はない。

3・2 $\sin^2 \psi$ 法で測定した残留応力 図6にFPBでショット圧0.6 MPaの場合の 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図を示す。測定法は側傾法で、 $\sin^2 \psi$ は0~0.9までとっている。FPBによって残留応力が付与された試験片では、 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図は非線形性を示した。応力の簡便評価のため図中に示すように $\sin^2 \psi$ 値が0~0.5の範囲で直線近似を行い、その傾きから応力を導出した。図1(a)の侵入深さより、7.4~10.6 μm の重み付き平均値で、平均的には侵入深さ9 μm 程度の残留応力値



(a) Peening time $t=2$ min



(b) Peening time $t=4$ min

Fig. 4 SEM micrographs for ultrasonic shot peening

に対応する。また、ショットピーニング面をX線応力測定した結果、残留応力は測定方向によって差はなく、面内等二軸応力であることが確かめられたので、以下では方向を指定せず面内の応力を意味する。

FPBにおける残留応力とショット圧の関係を図7に示す。ここで、図中には68.3%の信頼限界を示す。0.5 MPaまではショット圧が増加すると圧縮残留応力も上昇しており、それ以上のショット圧ではあまり変化が見られない。

USP面の 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図には、いずれの投射時間の場合も図8に示すように非線形性は認められない。つまり、表面下10 μm 程度の傾域では残留応力はほぼ一様になっている。そこで、 $\sin^2 \psi$ が0~0.9の範囲の全データを直線近似してこう配を求め応力を導出した。投射時間と残留応力の関係を図9に示す。68.3%の信頼限界は白丸内である。測定された圧縮残留応力は非常に大きく、また投射時間の増加とともに増加しており、最大で1.7 GPa近くの圧縮となる。

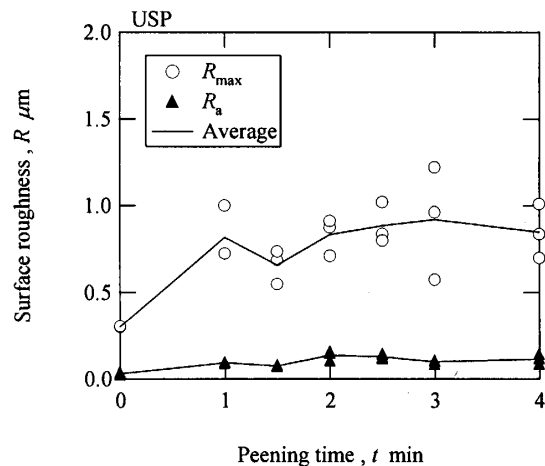


Fig. 5 Change of surface roughness with peening time

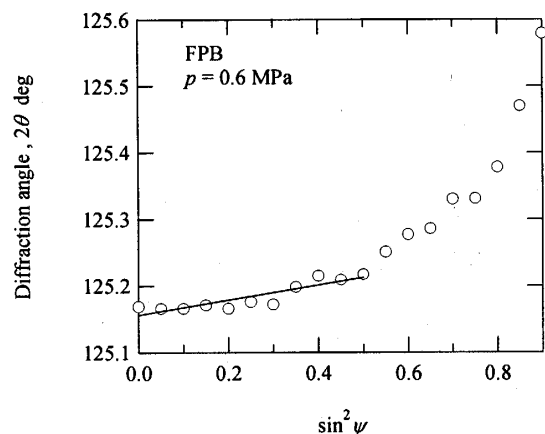


Fig. 6 2θ - $\sin^2 \psi$ diagram for specimen peened by fine particle bombardment at pressure 0.6 MPa

3.3 侵入深さ一定法で測定した残留応力分布

FPB 面は $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図が非線形性を示したため、侵入深さ一定法によって一定の深さにおける応力を測定した。FPB 面の侵入深さ一定法で得られた $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図を図 10 に示す。各侵入深さでの $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図は直線近似可能であり、侵入深さ一定法の有効性が認められる。異なる侵入深さのデータは $\sin^2\psi$ が 0.45 近傍ではほぼ交わっている。直線のこう配も侵入深さが深くなるほど小さくなり、圧縮残留応力が内部で減衰している。

実験室系の特性 X 線による測定では、侵入深さが浅いため、より深部の値は得られず、またさらに表面近傍では、強度が弱いため十分な S/N が得られずに応力が求められない。そこで、放射光を用いて深部と極表面の応力を求めた。放射光の測定では、理論回折角で式(1)の τ が一定となるように決定したが、実際のスキニングは $\theta\text{-}2\theta$ スキャンで回折プロファイル

を記録した。このとき回折角が低角であるために 1 スキャンをする間に大きく侵入深さが変わり、回折に預かる結晶数が変化しているために、プロファイルの形状は高角側で強度が強くなっており、ピークの非対称性が現れているので、これを次のように補正する。回折 X 線の強度と侵入深さの関係は次式のように表される⁽⁷⁾。

$$I_{tot} = \int_0^{\infty} I_0 \exp(-z/\tau) dz = \tau I_0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 I_0 は X 線が試料に入射するときの強度である。上式により強度を正規化し、その後、回折角の決定を行った。

得られた $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図を図 11 に示す。実験室での測定と同様、直線のこう配は侵入深さが深くなるほど小さくなる。また、 $\sin^2\psi$ 線図で測定される範囲は大きくしかも深い侵入深さのデータが得られている。異なる侵入深さのデータは $\sin^2\psi$ が 0.45 近傍ではほぼ

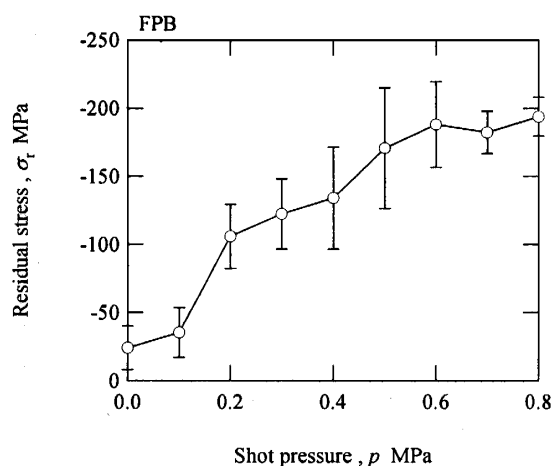


Fig. 7 Relation between residual stress and shot pressure for fine particle bombarding

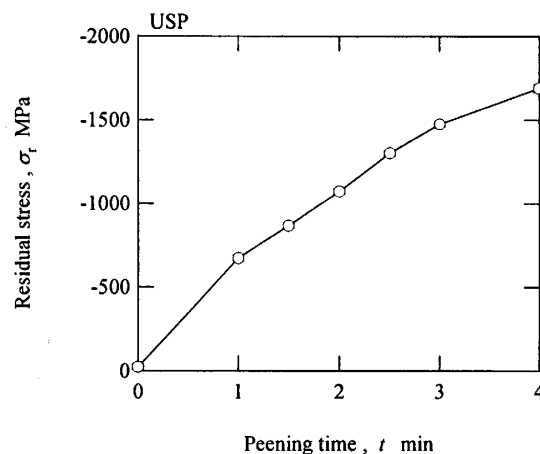


Fig. 9 Relation between residual stress and peening time for ultrasonic shot peening

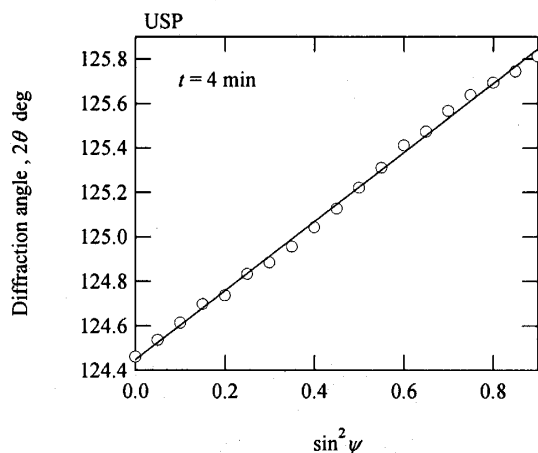


Fig. 8 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ diagram of specimen modified for 4 min by ultrasonic shot peening

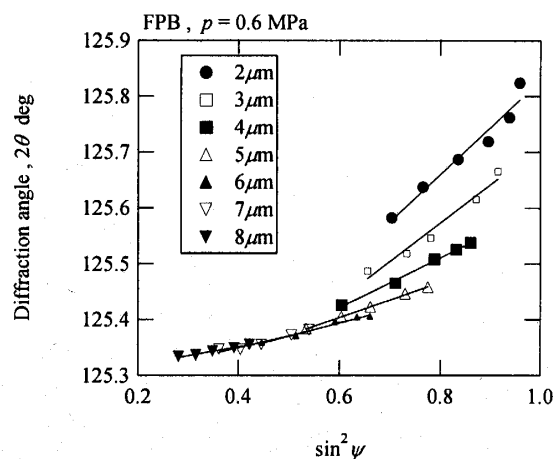


Fig. 10 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ diagram for fine particle bombarding at $p=0.6$ MPa (Cr-K α)

交わっている。

3・4 表面からの残留応力分布 X線法で測定されるひずみはX線の減衰を考慮した表面の重み付き平均であり次式で表される⁽¹¹⁾。

$$\sigma(\tau) = \frac{\int_0^\infty \sigma(z) \exp(-z/\tau) dz}{\int_0^\infty \exp(-z/\tau) dz} \quad (7)$$

ここで、 z は表面からの距離、 τ はX線の強度が $1/e$ となる侵入深さである。実際の応力分布 $\sigma(z)$ は、ラプラス逆変換によって求められる。

$$\sigma(z) = L^{-1}[\sigma(\tau)] \quad (8)$$

実験室と放射光における測定で得られた測定応力と侵入深さとの関係の例を図12に示す。この関係を次式で近似した。

$$\sigma(\tau) = a_0 + \frac{a_1}{1 - a_2(\tau + a_3)} \quad (9)$$

上式を逆ラプラス変換すると次式となる。

$$\sigma(z) = a_0 + \frac{a_1}{1 - a_2 a_3} \exp\left(\frac{a_2}{1 - a_2 a_3} z\right) \quad (10)$$

図12中に上2式の関係を示す。式(9)は測定点をよく近似している。実際の応力分布 $\sigma(z)$ は、表面内部で急激に減衰しており、 $5\mu\text{m}$ 程度内部ではほぼ零になっている。

図13には同様に求められた残留応力分布を示す。いずれの場合も表面では -1GPa 以上の非常に高い圧縮となっているが、表面下 $4\sim 5\mu\text{m}$ あたりで圧縮の残留応力は減衰している。

3・5 半価幅 実験室X線で測定した $\psi=0$ の回折像の半価幅と残留応力の関係を図14に示す。ただし、残留応力は $\sin^2 \psi=0\sim 0.5$ で直線近似して求めた。図中には各ピーニング手法で、ショット圧、投射時間は区別していない。導入されている圧縮残留応力値が高いほど半価幅も大きい。半価幅は結晶の微視的なひずみに対応するパラメータと考えられるが、このひずみが大きいほど大きな圧縮残留応力が付与されて

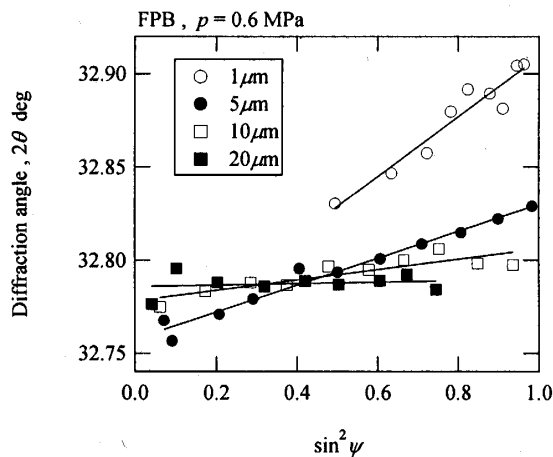


Fig. 11 2θ - $\sin^2 \psi$ diagram for fine particle bombardment at $p=0.6\text{ MPa}$ (Synchrotron)

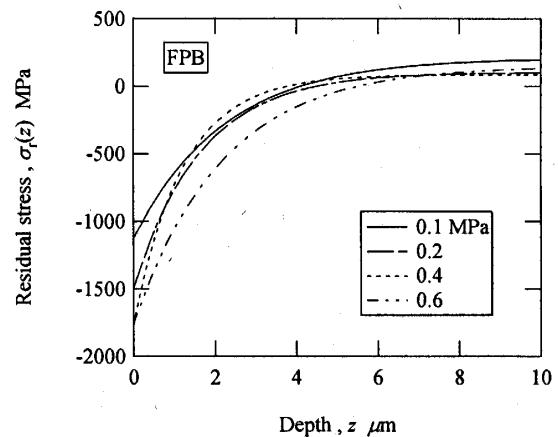


Fig. 13 Distribution of residual stress for fine particle bombardment

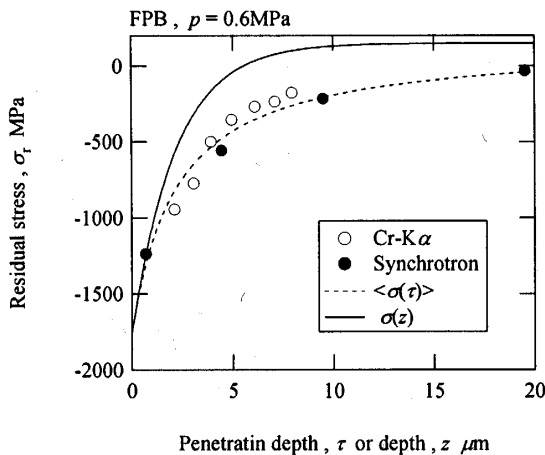


Fig. 12 Distribution residual stress for fine particle bombardment at $p=0.6\text{ MPa}$

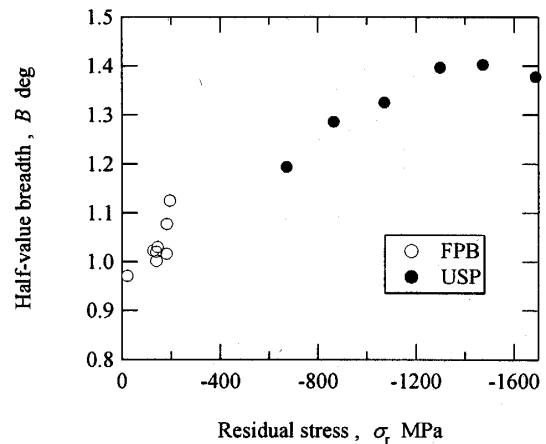
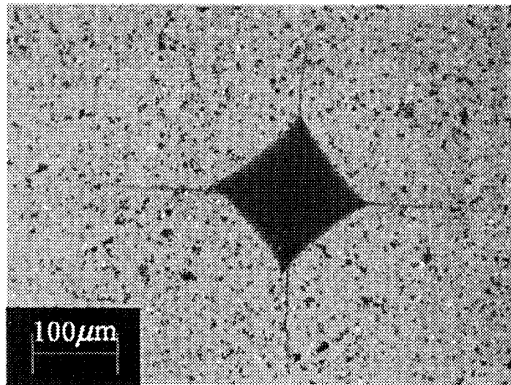


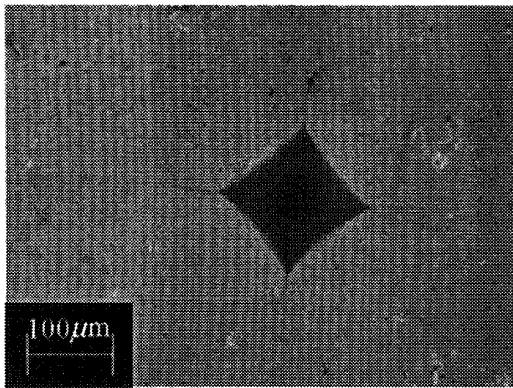
Fig. 14 Relation between half-value breadth and residual stress

いる。このことは脆性的な材料であるセラミックスもピーニングによって圧縮非弾性変形をすることを意味しており、残留応力形成機構を追求する点で重要である。

3・6 ビッカース圧こんによる破壊靱性評価 図15には、FPBおよびUSPの場合のビッカース圧こんを示す。後者のほうが明らかにき裂長さが短い。



(a) FPB ($p=0.1$ MPa)



(b) USP ($t=1$ min)

Fig. 15 Optical micrographs of Vickers indentation

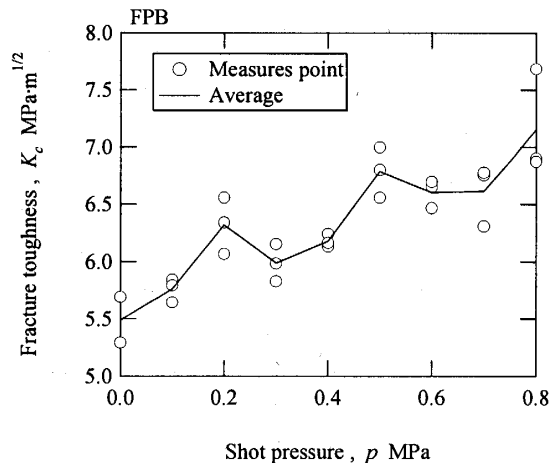


Fig. 16 Relation between fracture toughness and shot pressure for fine particle bombarding

ビッカース圧こん法で求めた破壊靱性と、ショット圧の関係を図16に示す。図中の各ショット圧では3点ずつ測定した。ピーニング処理されていない部位(ショット圧0 MPa)では報告されている窒化けい素の破壊靱性値($6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)とほぼ一致する。FPBではショット圧が増加するにつれ破壊靱性値も大きくなっており、ショット圧が0.5~0.8 MPaの試験片ではピーニング未処理材に比べおよそ1.3倍程度の増加となる。

一方、USPの場合の破壊靱性と投射時間の関係を図17に示す。USPによって大きく破壊靱性は増加し、2.5倍程度向上する。また、投射時間とともにやや大きくなる傾向がある。

図18は、FPBとUSPに関する破壊靱性とX線測定した表面圧縮残留応力との関係を示す。圧縮残留応力が大きいほど破壊靱性は大きくなる。

ピーニングとしては、表面の圧縮残留応力を大きく

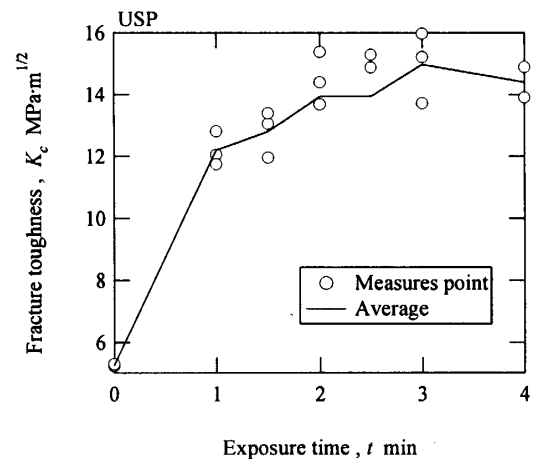


Fig. 17 Relation between fracture toughness and peening time for ultrasonic shot peening

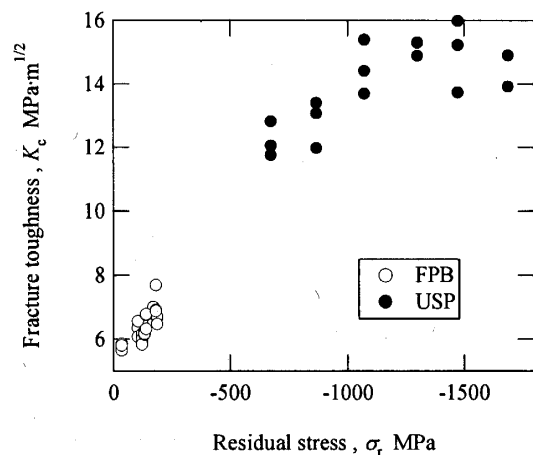


Fig. 18 Relation between fracture toughness and residual stress

導入し、破壊靱性を向上させる一方で、表面粗さで代表される表面欠陥を極力少なくする条件が最適である。この意味では、本実験結果の範囲では、重力式FPBではショット圧を0.5 MPa程度以上になると粗さが増すため0.5 MPa程度が最適である。一方USPでは、2 min程度が最適である。この場合、2 min以上では残留応力は増加するが、破壊靱性はほぼ一定である。このとき半価幅もほぼ一定で対応している。破壊靱性値は残留応力の分布も関係しており、今後の詳細な検討が必要である。

4. 結 言

窒化けい素セラミックスに微粒子ピーニング(FPB)および超音波ピーニング(USP)を各種条件で行った場合の、表面性状、残留応力分布および破壊靱性について検討した。得られた主な結果をまとめると次のようになる。

(1) FPB面では表面に傷が形成されその程度はショット圧とともに大きくなる。また、表面粗さも増加する。一方、USP面では表面傷は認められないが、表面は粗くなる。投射時間にはあまり関係しない。

(2) FPB面の残留応力は急こう配を有しているため、 $\sin^2 \psi$ 線図は非線形となる。 $\sin^2 \psi$ が0~0.5で直線近似して求めた残留応力値は圧縮でその大きさはショット圧とともに増大する。

(3) 侵入深さ一定法で求めたFPB表面下の残留応力分布は、極表面で1~1.5 GPaの圧縮であり、5 μm 程度内部では減衰する。

(4) USPでは、 $\sin^2 \psi$ 線図は直線で、侵入深さ10 μm 程度の領域では残留応力はほぼ一定の圧縮となる。圧縮残留応力は投射時間とともに大きくなり、

1.5 GPaに達する。

(5) ピーニング条件によらず、X線回折線の半価幅は圧縮残留応力が大きくなるほど大きくなる。

(6) ビッカース圧こん法で求めた破壊靱性値は、FPBにおいてショット圧とともに大きくなり、1.3倍程度向上する。一方、USPによって大きく破壊靱性は増加し、2.5倍程度向上する。また、投射時間とともにやや大きくなる傾向がある。

本研究において放射光測定は、大形放射光施設SPring-8 ビームラインBL13XUにおいて課題番号2004 A 0309-ND1 d-npで行ったものである。また、微粒子ピーニングをしていただいた(株)不二機販、USPをしていただいた東洋製鋼(株)に感謝する。

文 献

- (1) 小川一義・浅野高司・鈴木憲一・相原秀雄・下田健二, 機論, **61**-582, A (1995), 23-28.
- (2) Peifer, W. and Rombach, M. (Ericsson, T., Oden, M. and Andersson, A 編), *Proc. ICRS-5*, (1997), 302-307, Linköping University.
- (3) Peifer, W. and Frey, T., *Mater. Sci. Forum*, **404**~**407** (2002), 101-105.
- (4) Tomaszewski, H., Godwod, K., Diduszko, R., Carrios, F. and Duchazeaubeneix, J. M., *Proc. ICRS-7*, (2004), CD-ROM.
- (5) Ito, T., Uchimura, S., Moon, W. J. and Saka, H., *Proc. ATEM03*, (2003), CD-ROM, GSW 0171.
- (6) 田中啓介・秋庭義明・服部光芳, 材料, **44** (1995), 1110-1114.
- (7) 田中啓介・秋庭義明・河合雅典・伊藤登史政, 材料, **54** (2005), 704-709.
- (8) 秋庭義明・田中啓介・鈴木賢治・柳瀬悦也・西尾光司・楠見之博・尾角英毅・新井和夫, 材料, **52** (2003), 764-769.
- (9) 田中啓介・秋庭義明・河合雅典・森下裕介, 日本機械学会2004年年次大会講演論文集, **1** (2004-9), 247-248.