

高エネルギー放射光を用いたひずみスキャンニング法による 残留応力分布測定*

町屋 修太郎*¹, 秋庭 義明*², 鈴木 賢治*³
田中 啓介*², 栗村 隆之*⁴, 小熊 英隆*⁴

Measurement of Residual Stress Distribution by Strain Scanning Method using High Energy X-rays from Synchrotron Source

Shutaro MACHIYA*⁵, Yoshiaki AKINIWA, Kenji SUZUKI,
Keisuke TANAKA, Takayuki KURIMURA and Hidetaka OGUMA

*⁵ Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikua-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

A residual stress distribution in thermal barrier coatings can be measured using the strain scanning method with high energy X-rays from a synchrotron source due to its large penetration depth. For the double slits optics, the peak aberration of the measured diffraction becomes large, when the gage volume crosses the surface. The analytical correction method for the peak aberration was proposed in this paper. The surface aberration effect was corrected by taking account of the difference between the center of the goniometer and the optical centroid of the gage volume. Using the correction method, the distribution of the residual stress in thermal barrier coatings were measured from the surface to about 0.26 mm inside. For the as-sprayed top coating, the in-plane residual stress was approximately 30 MPa, and out-of-plane stress increased near by interface. For the coating subjected to the heat cycle (1 773 K), the both residual stress were released.

Key Words: Thermal Barrier Coating, X-ray Stress Measurement, Residual Stress, Strain Scanning, Ceramics, Synchrotron

1. 緒 言

機械構造材料の高機能化のために表面改質あるいはコーティングが多用されているが、その強度特性は表面下の残留応力分布によって大きく影響される場合が多い。残留応力測定法としてはX線応力測定法が広く用いられているが、この手法では10数 μm 領域の応力しか測定できないため、それ以上の深さの残留応力分布を求める方法としては、表面を逐次電解法などで研磨しX線測定を繰り返す逐次研磨法が広く用いられている。

近年、表面からの深さ0.1 mm程度までの表面下の残留応力を測定する手法として高エネルギー放射光が注目されている。高エネルギー放射光では侵入深さが深くなるため深部の表面下の残留応力測定が可能とな

る。しかしながら、従来用いられる $\sin^2\psi$ 法は、精度が高い反面、測定に長時間を要することや面内応力しか求まらないという問題点があった。また、平傾法と測傾法を組み合わせることによって、X線侵入深さを一定にし、逐次研磨に依らずに内部応力を測定することが可能な侵入深さ一定法が秋庭らによって提案されたが、やはり測定には比較的時間を要し、また、ゴニオに y, x 軸制御が不可欠であった。これに対して、精度はやや落ちるが短時間にしかも非破壊的に応力分布を求める手法としてひずみスキャンニング法が提案されている。この方法は、高エネルギーの入射X線束と受光側のスリットで作られたゲージ体積(gage volume)の平均ひずみを測定する。試料を移動することで、ゲージ体積を法線ベクトルの方向に移動させると表面下のひずみ分布を迅速に測定できる⁽¹⁾。中性子回折を用いても同様な計測が可能である⁽²⁾⁽³⁾が、光源の強度が弱くゲージ体積を小さく取るのが困難であり、表面下の急勾配の残留応力分布の精緻な測定には適さない。

ひずみスキャンニング法では、表面極近傍の測定において光学系から決まるゲージ体積が試料からはみ出

* 原稿受付 2005年2月7日。

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

*² 正員, 名古屋大学工学研究科。

*³ 正員, 新潟大学教育人間科学部生活環境学科(☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

*⁴ 正員, 三菱重工業(株)高砂研究所(☎676-8686 高砂市荒井町新浜2丁目1-1)。

E-mail: h034104d@mbox.nagoya-u.ac.jp

ている場合には、このことにより回折ピークがシフトして見かけのひずみが測定されることが指摘されており⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、表面効果 (Surface aberration effect) と称されている。これを克服する手法として受光側に単結晶のアナライザを使用すること⁽⁷⁾が提案されているが、アナライザを使用すると回折強度が大きく低下して精緻な測定が困難になる可能性がある。

そこで、本研究ではアナライザを使用せずに表面効果を補正する手法として、受光側にダブルスリットを用いて回折強度を低下させることなく、かつ解析的な手法を提案する。本研究では測定対象として、まず提案する手法を焼鈍した炭素鋼 (JIS S45C) に対して適用して妥当性を検証した後、ガスタービンの高効率を支える重要な技術であり、強度および寿命などの評価上残留応力分布の有効な評価法が求められているジルコニアの遮熱コーティング (Thermal barrier coating: TBC) 膜中のひずみ測定を行った。TBC は、これまで X 線法による測定が試みられており⁽⁸⁾⁽⁹⁾、使用による酸化や熱応力により界面における破壊⁽¹⁰⁾や離方向の応力の発生⁽¹¹⁾することが報告されているが、これらは $\sin^2 \psi$ 法と逐次研磨法を複合したハイブリッド法であり、測定に長時間を必要とし、しかも厳密には破壊法であるため簡便な手法の開発が望まれていた。

2. ひずみスキャンニング法

2.1 ひずみと応力との関係 図 1 に示すように試験片の表面を基準とした座標系を考え、面内の応力を σ_1 , σ_2 法線方向の応力を σ_3 とし、ひずみも同様に考えると、3 軸応力の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (1)$$

TBC のトップコート表面の残留応力をラボ X 線により測定した結果溶射ままの試験片および熱サイクル負荷した試験片は等二軸応力であった。ここで、 $\sigma_1 = \sigma_2$ とすると $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ となり、

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_3) \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{2\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_1 + \frac{1-\nu}{2\nu} \varepsilon_3) \quad (3)$$

一方、格子面間隔 d とひずみ ε の関係は

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (4)$$

であり、 d_0 は無ひずみの格子面間隔である。格子面間隔 d と回折角 θ は、以下のブラッグの条件で与えら

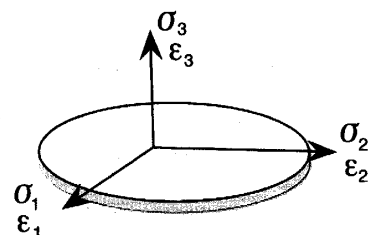
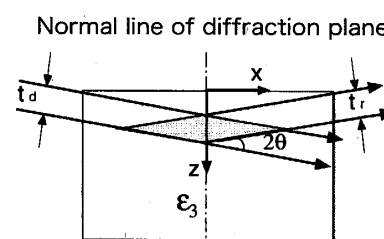
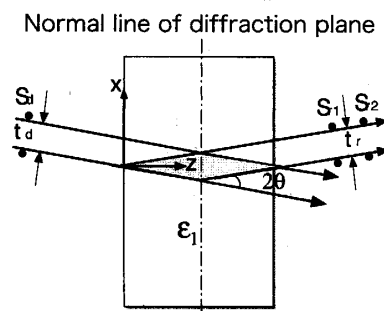


Fig. 1 Coordinates for scanning method.



(a) Reflection



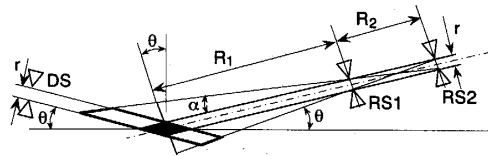
(b) Transmission

Fig. 2 Configuration of gauge volumes.

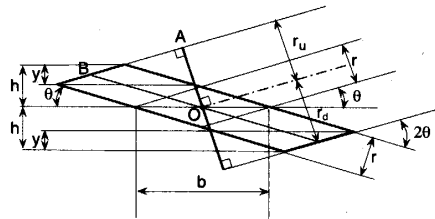
れる。

$$\lambda = 2d \sin \theta, \quad d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

2.2 ひずみの測定 ひずみスキャンニング法により測定する場合、ゲージ体積が重要となる。発散スリットの高さを t_d とし、受光スリット S_{r1} と S_{r2} の高さを t_r としたときの受光側の発散を考えなかった場合のゲージ体積を図 2 に示す。反射法 (Reflection) では ε_3 方向、透過法 (Transmission) では ε_1 方向のひずみがそれぞれ測定できる。受光側の発散を考えない場合の公称ゲージ体積 (Nominal gage volume) はひし形では表されている。実際の測定では、光学系による X 線の発散によりゲージ体積は少し大きくなる。このゲージ体積を装置ゲージ体積 (Instrumental gage volume) と称する。極表面測定で装置ゲージ体積が試料からはみ出



(a) Double slits optics.



(b) Detail of gauge volume.

Fig. 3 Configuration of gauge volumes with slits divergence.

ている場合には、実際の回折に与かる測定ゲージ体積 (Sampled gauge volume) の中心 (centroid) と公称ゲージ体積の中心である光学中心と異なるため回折ピークがシフトして見かけのひずみが測定される表面効果が指摘されている。以下表面効果の補正について検討する。

2.3 反射法による表面効果 ひずみスキャンニング法の反射法における回折角度の誤差は、光学系中心と測定ゲージ体積の重心位置とのずれによって生じ、この補正を考える。図3(a)に示すように、放射光源のX線は発散スリット DS により幅 r で入射する。同様に幅 r の受光スリット RS1, RS2 により回折X線はカウンターに導かれる。受光側のスリットの発散角 α は、

$$\frac{1}{2}\alpha = \arctan\left(\frac{r}{R_2}\right) \quad (6)$$

となる。ここで、濃く着色した領域が公称ゲージ体積となり、薄く着色したところは発散によりゲージが広がった領域である。この着色部分を拡大したものを図3(b)に示す。このひし形が装置ゲージ体積である。回折計の回転中心 O において発散角に対応する幅はそれぞれ上下で r_u, r_d とすると

$$r_u = r_d = (R_1 + R_2) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \quad (7)$$

となる。ここで、 $\alpha \approx 0$ とすると、図中の幾何学関係より各寸法は以下ようになる。

$$b = \frac{r}{\sin\theta} \quad (8)$$

$$y = \frac{b}{2} \tan\theta = \frac{r}{2\cos\theta} \quad (9)$$

$$\overline{BO} = \frac{r_u}{\sin 2\theta} \quad (10)$$

$$h = \overline{BO} \sin\theta + \frac{y}{2} = r_u \frac{\sin\theta}{\sin 2\theta} + \frac{y}{2} \quad (11)$$

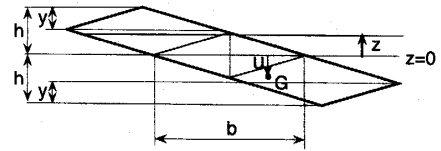


Fig. 4 Centroid transition of gauge volume.

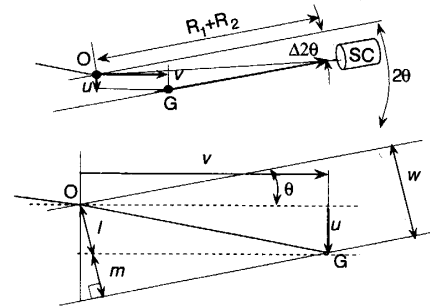


Fig. 5 Error of diffraction angle related to centroid transition.

ここで、図4に示すように、理想的なゲージ体積の中心と試料表面の位置を z とする。試料表面が下方から上方へ移動しながらゲージ体積が変化するので、回折に関係する体積の重心位置 u が試料表面位置 z に従って変化する。重心位置 u については、
 $-h \leq z < -h + y$ のとき

$$u = \frac{2}{3}z - \frac{h}{3} \quad (12)$$

$-h + y \leq z < h - y$ のとき

$$u = \frac{y^2 - 3hy + 3h^2 - 3z^2}{3(y - 2h - 2z)} \quad (13)$$

$h - y \leq z \leq h$ のとき、 $A = z - h + y$ とすると

$$u = \frac{A \left[(h - y)(a + b) + \frac{2a + b}{3}A \right] - by \left(h - \frac{2}{3}y \right)}{aA + b(z + 3h - 2y)} \quad (14)$$

となる。

回折の重心が、公称ゲージ体積の中心 O から u, v だけ移動した場合、

$$l = \frac{u}{\cos\theta}, \quad m = (v - u \tan\theta) \sin\theta \quad (15)$$

$$w = l + m = (v - u \tan\theta) \sin\theta + \frac{u}{\cos\theta} \quad (16)$$

ゆえに、回折角 2θ の測定に与える誤差 $\Delta 2\theta$ は

$$\Delta 2\theta = \arctan\left(\frac{w}{R_1 + R_2 - (v - u \tan\theta) \cos\theta}\right) \quad (17)$$

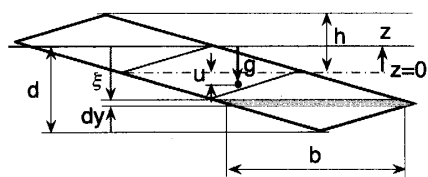


Fig. 6 Configuration of gauge volumes considering X-ray penetration depth.

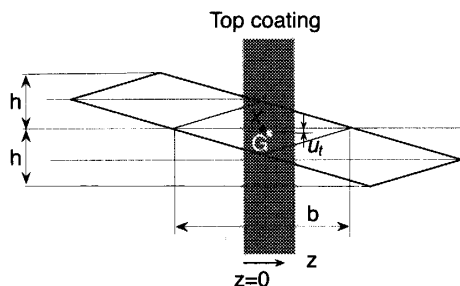


Fig. 7 Configuration of gauge volume for transmission.

となる。

しかし、この補正方法のみでは、無ひずみ材の計測結果と一致せず、表面位置の z の移動により、受光スリットの発散角によるコリメーションの影響以外の要因も考慮する必要がある。

そこで、さらに X 線の侵入深さを考慮した補正を考える。試料表面の移動 z に伴うゲージ体積の重心を図 6 に示す。ゲージ体積が深さ方向に移動するに従い X 線の強度が深さ y により変化する。この場合、深さ g の位置での X 線回折強度 I は、

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\xi}{T}\right) \quad (18)$$

$$T = \frac{\sin \theta}{2\mu} \quad (19)$$

で与えられる。ただし、 I_0 は表面での回折強度、 T は有効 X 線深さ、 μ は材料の X 線吸収係数である。72keV での X 線吸収係数は、計算によって求め、TBC では、 $\mu = 1.728 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、比重は 5.2 g/cm^3 、鉄鋼については $\mu = 0.762 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、比重は 7.82 g/cm^3 の値を用いた。

試料表面の移動 z に伴うゲージ体積の重心の位置 g は、

$$g = \frac{M}{S} \quad (20)$$

$$S = \int_0^d b \exp\left(-\frac{\xi}{T}\right) d\xi \quad (21)$$

$$M = \int_0^d b y \exp\left(-\frac{\xi}{T}\right) d\xi \quad (22)$$

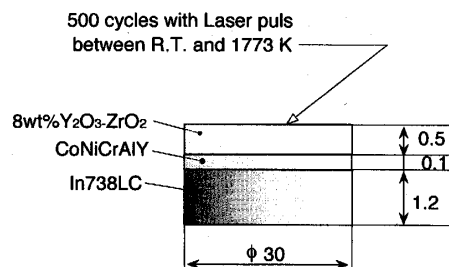


Fig. 8 TBC specimen.

の関係により導かれる。ゆえに、ゴニオの回転中心（理想ゲージ体積中心）からの重心のずれ u は

$$u = z - g \quad (23)$$

となる。

また、反射法においては、 $z=0$ の位置の割り出し精度が確保できずに、深さ方向に相対的にシフトする場合がある。この補正方法として、理論的に計算される積分強度 S の深さ方向での分布を用いて、実測した回折強度の積分強度と比較することで z 位置を最適化し補正することができる。

2.4 透過法による表面効果 透過法については、図 7 に示すようなゲージ形状となる。この場合も、反射法同様にゲージ体積の重心移動による回折角度の誤差が生じる。薄膜材料の場合、ゲージ体積に比較して薄いため、ゲージ体積は平行四辺形のまま一定に平行移動し、試料表面の移動 x と重心位置 u_t の関係は

$$u_t = x \tan \theta \quad (24)$$

となる。

3. 実験方法

3.1 試験片 本実験における試験片は、図 8 に示すように、直径 30 mm の円板状試験片である。Ni 基超合金 (IN738LC) の基材の上にボンドコートとして CoNiCrAlY を減圧プラズマ溶射し、さらにトップコートとして 8 mass% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ を大気プラズマ溶射したものである。各コート厚さは、ボンドコート 0.1 mm、トップコート 0.5 mm である。透過法による X 線の減衰を考慮して、基材は溶射および熱サイクル負荷後に放電加工にて薄くなるように除去した。測定に供した時の基材厚さは、1.2 mm である。

試験片は、溶射したままの試験片 (As-sprayed) およびトップコート面に 500 回の熱サイクルを与えた試験片 (500 cycles) の二種類である。熱サイクル試験は、トップコート表面を室温から 1773 K までレーザー照射して空冷（試験片裏面は強制空冷）するサイクルであ

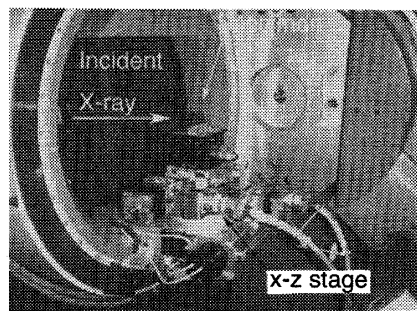


Fig. 9 TBC specimen on the x-z stage and strain scanning in transmission direction.

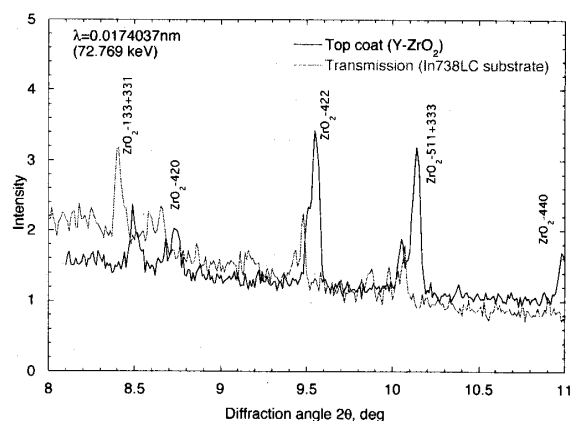


Fig. 10 Diffraction profiles for TBC.

り、トップコート表面加熱まで約 90 sec、室温冷却まで約 60 sec とした。

また、表面効果の補正を検証するため、ほぼ無ひずみとみなせる S45C のアニール材をバフ研磨したものを準備した。試験片寸法は約 18×10 mm で $t=4$ mm である。試験片の厚さから、測定は反射法のみで、透過法による測定は行っていない。

3.2 放射光および測定条件 放射光による応力測定については、(財)高輝度光科学研究センターのシンクロトン放射光施設 (SPring-8) のビームライン

Table 1 Conditions for stress measurement for TBC.

Beam line	BL02B1
Wavelength	17.404 pm (72.769 keV)
Divergent slit (mm)	0.4×2 (height \times width)
Receiving slit 1, 2 (mm)	0.4×5 (height \times width)
Divergent angle of RS	0.7056 deg
Diffraction	511+115+333
Diffraction angle 2θ	10.067 deg
X-ray Young's modulus	143 GPa
X-ray Poisson's ratio	0.267

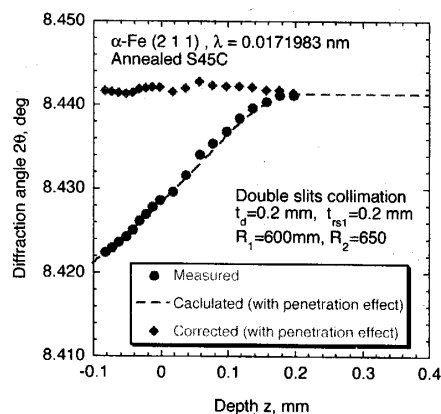


Fig. 11 Diffraction angle and calculated approximation curve of surface related peak aberration.

ン BL02B1 を利用した。TBC のひずみスキャンニング法においては、トップコート表面を $z=0$ とし、反射法においては深さ方向に z 軸ステージを移動してひずみスキャンを行った。 z 位置として 0 から 0.26 mm まで $20 \mu\text{m}$ ステップで移動し、14 点のひずみ測定を行った。一方、透過法による測定の場合は、図 9 に示すように試験片を試料台に垂直に立て x 軸ステージを入射ビーム側に移動させてひずみスキャンを行った。 x 位置として 0 から 0.25 mm まで $50 \mu\text{m}$ ステップで移動し、6 点のひずみ測定を行った。放射光条件を表 1 に示す。ひずみスキャンニング法によりボンドコート界面近くの応力測定を行うため、高エネルギー放射光として約 72.769 keV の X 線エネルギーで、ピーク位置は 4/5 価幅法を用いて決定した。得られた TBC の回折プロファイルを図 10 に示す。図中の実線は反射法と透過法によるプロファイルをそれぞれ示している。S45C については、スリット高さを発散側、受光側ともに 0.2 mm とし、孤立ピークとなる 211 面を利用し、 $z=-0.1$ から $z=0.25$ まで、反射法によるスキャンを行った。

4. 実験結果および考察

4.1 無ひずみ材 (S45C) の測定 S45C のアニール材をバフ研磨した材料を用いて反射法によるひずみスキャンニングを行った結果を図 11 に示す。図中の線はそれぞれ、ゲージ体積の重心のみの影響、および、さらにその補正に X 線侵入深さの影響を考慮した場合において解析によって予測される、回折角度であり、● は実測値である。無ひずみかつ表面効果がなければ、回折角は深さに依存せず一定値となるが、ゲージ体

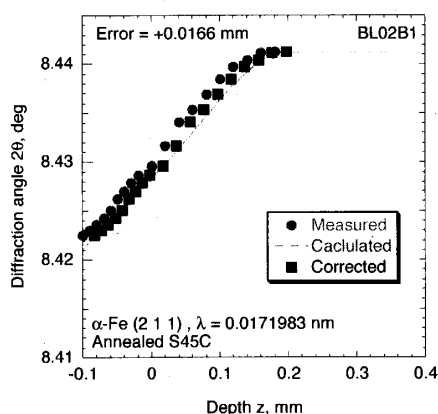


Fig. 12 Depth value correction from error of diffraction intensity curve.

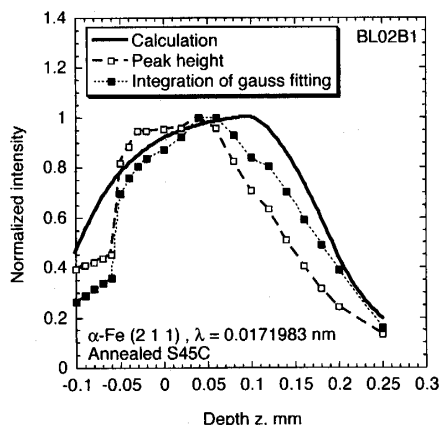


Fig. 13 Diffraction intensity and calculated intensity curve.

積の重心位置の移動により、実測値は z の増加とともにピークが高角側へシフトする。図中の補正結果(◆印)から、受光スリットの発散とゲージ体積の重心の移動による補正のみの場合には、傾きはほぼなくなり、X線侵入深さの影響を考慮した補正を加えることで、表面効果を除去することができる。この補正により、無ひずみ材などの比較材料が得られない材料においても、アナライザーを用いなくとも、表面効果によるピークシフト量が予測可能となり、迅速かつ容易なひずみスキャンニングが可能である。測定精度は、プロフィールから回折を決定する際の誤差と、得られた回折角のばらつきによる誤差に依存する。補正後のデータについて見ると、 2θ に対する68.3%信頼限界は前

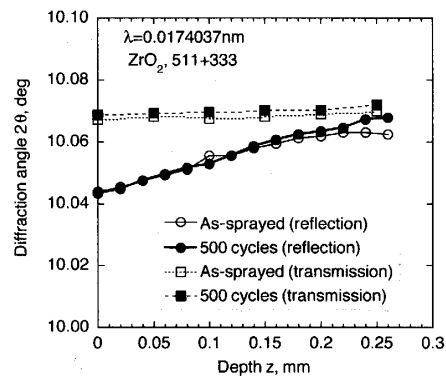


Fig. 14 Diffraction angle by scanning method.

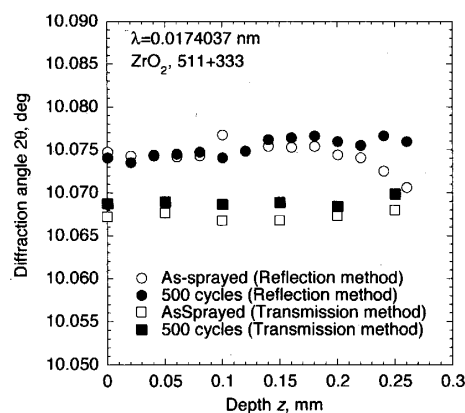


Fig. 15 Corrected diffraction angle for TBC.

者については最大で $\pm 5.83 \times 10^{-4}$ deg、後者については $\pm 9.34 \times 10^{-4}$ degとなり、両者の和として誤差評価をすると応力に換算して ± 29.2 MPaとなる。

図12中の●印に補正前の生データを示すが、このデータでは $z=0$ 位置が深さ方向にずれているため、解析的に予測されるカーブとずれる問題がある。 $z=0$ を補正するために、積分強度を用いた最適化を行った。その深さ方向での積分強度を図13に示す。この積分強度分布形状から誤差が最小となるように最適化することで、 z の補正量0.0166 mmを得た。この深さ方向への補正により、12に示すように、実測値と解析値のカーブはよく一致した。

4.2 TBCの残留応力分布 今回の計測では、粉末による正確な d_0 を得られなかったため、ラボX

Table 2 Surface stress measured by lab. X-ray.

Specimen	As-sprayed	500 cycles
σ_x (MPa)	38.30	8.97
σ_y (MPa)	30.10	8.26
Mean (MPa)	34.2	8.6

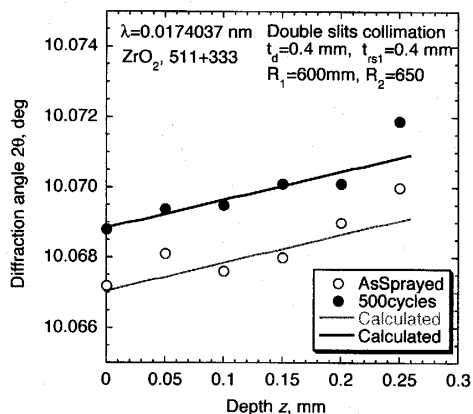


Fig. 16 Diffraction angle in Transmission.

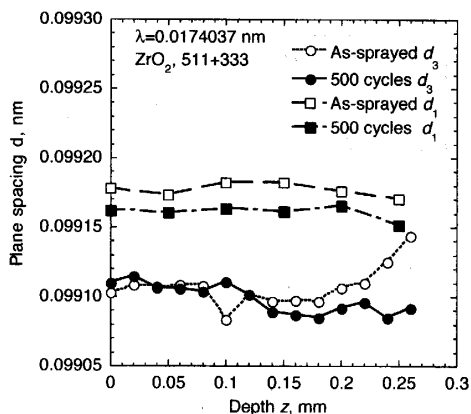


Fig. 17 Plane spacing distribution for TBC.

線の計測値から d_0 を補正して求めた。まず、ラボ X 線を用いて、90 度異なる方向で試験片表面の残留応力測定を行った結果を表 2 に示す。結果より、ほぼ同等 2 軸平面応力と考えることができ、平均した応力値がひずみスキャンニングの応力値と等しくなるように d_0 を求め、 ε_1 方向では 0.09916 nm、 ε_3 方向では 0.09912 nm を得た。

次に、TBC をひずみスキャンニング法により測定した回折角と深さの関係を図 14 に示す。反射法では、ゲージ体積の影響から、 z が深くなるに従い、徐々に回折角が上昇している。これに解析的にゲージ体積の補正を行ったものを図 15 に示す。同様に、透過法についても補正を行っている。図 16 に透過法における回折角と表面効果の計算値を示す。反射法に比べ誤差の原因となる重心位置の変化が微小ではあるが、回折角度はどちらの試験片においても増加傾向にあり、無ひずみ材ではないものの、増分の傾向は、計算とほぼ

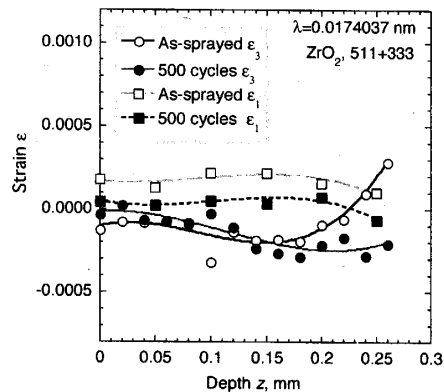


Fig. 18 Strain distribution for TBC.

一致している。

次に、回折角から、式 (5) より格子面間隔 d を求めたものを図 17 に示す。さらに d_0 と式 (4) を用いて、ひずみを計算した結果を図 18 に示す。図中の実線は深さとひずみの関係を多項式で近似した曲線である。本研究では、ほぼデータを近似できる関数として 3 次多項式を用いたが、本質的な意味は無い。

得られたひずみから、応力を計算するためには、各深さでの ε_1 および ε_3 が必要になる。ここで、得られた近似式と式 (2), (3) から σ_1, σ_3 の応力分布を求めることができる。得られた残留応力分布を図 19 に示す。

コーティングしたままの試験片 (as-sprayed) の σ_1 は表面から深さ方向では、ほぼ引張りの 32 MPa で一定であった。一方、500 回の熱サイクルを与えた試験片 (500 cycles) は、試験片表面は亀甲状のき裂が目視でき、表面から深さ 0.2 mm までの残留応力もほぼ 0 となり、熱サイクルによって応力は解放している。

また、はく離方向の応力となる σ_3 は、熱サイクル試験片では、表面でほぼ 0 となり、深くなるに従って、圧縮方向の残留応力が漸増しているが、一方、As-sprayed 試験片では、熱サイクルを荷した試験片に比べ、表面から界面に近づくにつれて、はく離方向の応力は 0 から約 60 MPa まで増加しており、As-sprayed 試験片の製膜時にボンドコート界面において導入されていた、引張りの残留応力は熱サイクルによって緩和し約 -40 MPa の残留応力が導入された。この緩和は、熱サイクルによって、界面ではく離やき裂などの破壊が生じたことに起因するものと考えられる。なお、 α -Fe 2 1 1 回折とは回折角度が若干異なるが、同様の誤差を仮定すると、このときの 68.3 % 信頼限界は、応力で約 ± 23.5 MPa となる。

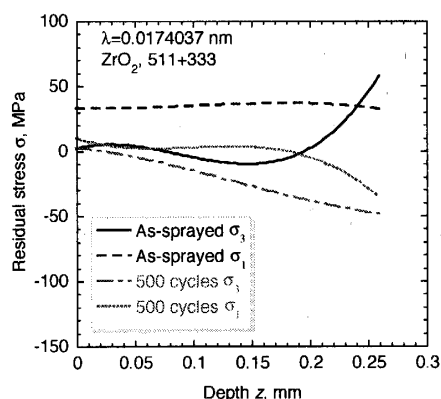


Fig. 19 Residual stress distribution for TBC.

5. 結 言

本研究では、S45C 無ひずみ材およびジルコニアを大気プラズマ溶射および減圧プラズマ溶射した熱遮へいコーティング膜の残留応力分布を高エネルギー放射光を利用したひずみスキャンニング法を用いて測定した。また、ひずみスキャンニング法における問題点であるゲージ体積の効果について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) ダブルスリット光学系を使ったひずみスキャンニング測定において、受光スリットの発散によるゲージ体積の増加および、試料表面下のX線侵入深さによる重みを考慮してゲージ体積の重心位置の変化 x から回折角 2θ の移動を求めることで、ゲージ体積位置と試料表面の効果을 予測、補正することができことを明らかにした。

(2) ひずみスキャンニング法により溶射したままのTBC(As-sprayed)と500回の熱サイクルを与えた試験

片の残留応力分布を非破壊的に測定した。熱サイクルによりコーティング界面付近の、 σ_1 方向の応力は、解放され、膜厚方向の σ_3 の引張りの残留応力(約 60 MPa)は緩和され、約 -40 MPa の圧縮の残留応力が導入されることを明らかにした。

なお本研究は、(財)高輝度光科学研究センターの共同利用研究(2003B0161-NMD1-np)において行ったものである。

文 献

- (1) P. J. Webster, G. B. M. Vaughan, G. Mills and W.P. Kang Mater. Sci. Forum Vols 278-281 (1998) 323-328.
- (2) R. A. Owen, R. V. Preston, P. J. Withers, H. R. Shercliff, P. J. Webster, Mater., Sci., Engineering, **A346**, (2003), pp. 159-167.
- (3) K. Tanaka, Y. Akiniwa and M. Hayashi, Mater. Sci. Res. Int., **8**, 4 (2002) 165-174.
- (4) 坂井田喜久, 田中啓介, 原田慎太郎, 皆川宣明, 森井幸生, 池田泰, 日本機械学会論文集, A 編, **62**-600, (1996), pp. 1294-1930.
- (5) 皆川宣明, 盛合敦, 森井幸生, 第 38 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 日本材料学会, (2003), pp. 202-205.
- (6) 齋藤徹, 皆川宣明, 盛合敦, 森井幸生, 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 第 38 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 日本材料学会, (2003), pp. 206-210.
- (7) P. J. Withers, M. Preuss, P. J. Webster, D. J. Hughes and A. M. Korsunsky, Mater., Sci., Forum, **404-407**, (2002).
- (8) 鈴木賢治, 町屋修太郎, 田中啓介, 坂井田喜久, 日本機械学会論文集, A 編, **67**-3, (2001-3), pp. 417-423.
- (9) 鈴木賢治, 町屋修太郎, 田中啓介, 坂井田喜久, 材料, **49**-1, (2000-1), pp. 117-122.
- (10) K. W. Schlichting, N. P. Padture, E. H. Jordan, M. Gell, Mater., Sci., Engineering, **A342**, (2003), pp. 120-130.
- (11) 鈴木賢治, 田中啓介, 秋庭義明, 川村昌志, 西尾光司, 尾角英毅, 日本機械学会論文集, A 編, 掲載予定.