

高エネルギー放射光による EB-PVD 遮熱コーティングの
残留応力分布の解析*鈴木賢治^{*1}, 松本一秀^{*2}, 久保貴博^{*3}
町屋修太郎^{*4}, 田中啓介^{*4}, 秋庭義明^{*4}Analysis on Residual Stress in Electron Beam-Physical Vapor Deposited
Thermal Barrier Coating using Hard Synchrotron X-RaysKenji SUZUKI^{*5}, Kazuhide MATSUMOTO, Takahiro KUBO,
Shutaro MACHIYA, Keisuke TANAKA and Yoshiaki AKINIWA^{*5} Faculty of Education and Human Sciences, Niigata University,
8050 Igarashi-2-no-cho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

The distribution of the residual stress in the thermal barrier coating, which was made by an electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD) method, was determined using X-ray stress measurements. As the bond coating, NiCoCrAlY was low-pressure plasma sprayed on the substrate of austenitic stainless steel. The 8 mass% Y_2O_3 - ZrO_2 was coated on the bond coating using the EB-PVD method as the top coating. The top coating had the preferred orientation with the $\langle 111 \rangle$ axis direction perpendicular to the coating plane. The distribution of the in-plane residual stress in the top coating was measured using laboratory X-rays. The value of the in-plane stresses was determined by the $\sin^2 \psi$ method after the separation of the 133 and 331 diffractions. The distribution of the out-of-plane strain in the top coating was measured using the strain scanning method with hard synchrotron X-rays. The out-of-plane strain was obtained from the 333 diffraction which had strong intensity due to the preferred orientation. The measured value of the in-plane stress in the top coating was a large compression, and steeply decreased near the interface between the top and the bond coating. The distribution of the out-of-plane stress showed a compression, and its magnitude was smaller than that of the in-plane stress.

Key Words: Residual Stress, Experimental Stress Analysis, Thermal Barrier Coating, Synchrotron, Electron Beam-Physical Vapor Deposition

1. 緒 言

ガスタービンエンジンの遮熱コーティングとして電子ビーム物理蒸着法 (EB-PVD: electron beam-physical vapor deposition) 法が期待されている。EB-PVD 法は、基材にまずボンドコートを施し、ついでジルコニアインゴットに電子ビームを当て、遊離したジルコニアをボンドコート面に蒸着させる方法である。近年は、成膜速度の上昇もあり経済的にも実用化が期待されている。EB-PVD 法によるジルコニア膜は、成膜方法をコントロールすることにより多様な結晶成長が可能であ

り、コーティング膜に様々な特性を付与することも期待されている⁽¹⁾。このため、EB-PVD ジルコニアはナノコーティング技術として注目されている⁽²⁾。

ところで、EB-PVD 遮熱コーティングについては、プラズマ溶射コーティング法と比較して研究も少なく不明な点が多い。EB-PVD ジルコニア膜の残留応力を把握することは、強度、信頼性の評価に欠かせないが、EB-PVD ジルコニア膜の残留応力についての研究は少ない。Johnson らは各種コーティング膜のヤング率と残留応力およびせん断強度について検討し、残留応力とコーティング膜の機械的特性を明らかにしている⁽³⁾。しかし、彼らの研究においては膜厚方向の残留応力の分布については触れておらず、深さ方向への面内、面外応力の分布は不明である。

非破壊の方法で膜厚方向の残留応力を測定する有力な方法は、シンクロトロン放射光の高エネルギー X 線

* 原稿受付 2005年2月1日。

*¹ 正員, 新潟大学教育人間科学部 (☎ 950-2181 新潟市五十嵐2の町 8050)。*² (株)東芝電力・社会システム技術開発センター (☎ 235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8) [現: (独)物質・材料研究機構材料研究所 (☎ 305-0047 つくば市千現 1-1-2)]。*³ (株)東芝電力・社会システム技術開発センター。*⁴ 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)。

E-mail: suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

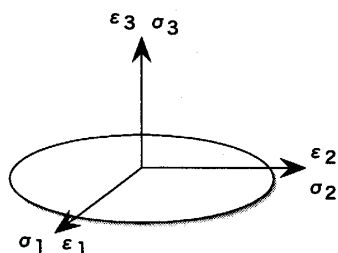


Fig. 1 Coordinate system for stress measurement.

である。高エネルギー X 線は、ジルコニアに対して大きな侵入深さを持ち、かつ高輝度であるために材料深部の応力状態を測定できる唯一の方法として注目され⁽⁴⁾。これまで $\sin^2\psi$ 法を主とした方法により、遮熱コーティングの残留応力測定の研究が進められている^{(5)~(7)}。また、従来の $\sin^2\psi$ 法に比較し効率よく深部のひずみ測定が可能な方法として、ひずみスキニング法がある⁽⁸⁾。しかし、高エネルギー放射光による EB-PVD 膜の応力測定には、EB-PVD の配向特性を考慮した残留応力解析方法が必要であり、それはまだ未確立である。

本研究では、面内方向の残留応力を逐次研磨して研究室の回折装置で Cr-K α 線（以下、ラボ X 線と表記する）により測定し、面外方向のひずみをシンクロトン放射光の高エネルギー X 線でひずみスキニング法にて非破壊的に測定して、配向性をもつ EB-PVD 遮熱コーティング膜の残留応力分布の解析を行った。

2. 応力解析方法

試験片のコート面を基準に、図 1 のように応力とひずみの成分をとると 3 軸応力の関係は次式で与えられる。

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

後述するように EB-PVD コーティングの面内の残留応力測定結果から、面内応力成分は等 2 軸応力状態 ($\sigma_1 = \sigma_2$) が仮定できる。また、表面では平面応力状態が成り立ち、 $\sigma_3 = 0$ より表面での面外方向のひずみ $\varepsilon_3(0)$ は、表面 ($z=0$) の面内応力 $\sigma_1(0)$ を用いると

$$\varepsilon_3(0) = -\frac{2\nu}{E} \sigma_1(0)\quad (2)$$

で与えられる。本研究では、面内応力 $\sigma_1(z)$ の膜厚方向での分布はラボ X 線を用いた $\sin^2\psi$ 法により逐次研磨して測定する。

一方、高エネルギー X 線によるひずみスキニング法を用いて、面外方向の格子面間隔を測定し、面外ひずみ ε_3 を得る。つまり、面外ひずみ $\varepsilon_3(z)$ は、面外方向の格子面間隔 $d(z)$ を測定すれば、

$$\varepsilon_3(z) = \frac{d(z) - d_0}{d_0}\quad (3)$$

により測定できる。 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れる。

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}\quad (4)$$

ただし、 λ は X 線の波長である。面外ひずみ ε_3 を計算するために必要な無ひずみの格子面間隔 d_0 は、コーティング表面 ($z=0$) において前述の関係を用いて

$$d_0 = \frac{E}{E - 2\nu\sigma_1(0)} \cdot \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{z=0}}\quad (5)$$

から計算した。ただし、 $\theta_{z=0}$ は、ひずみスキニング法で測定した表面の回折角である。また、 $\sigma_1(0)$ はラボ X 線測定により表面で求めた面内応力の値である。

以上により、面内応力の分布 $\sigma_1(z)$ と深さ方向の面外ひずみの分布 $\varepsilon_3(z)$ が得られれば、面外応力の分布 $\sigma_3(z)$ は、

$$\sigma_3(z) = E\varepsilon_3(z) + 2\nu\sigma_1(z)\quad (6)$$

で与えられる。

3. 実験方法

3.1 試験片およびコーティング 板厚 2mm の SUS304 の基材の上に NiCoCrAlY を減圧プラズマ溶射してボンドコートとした。なお、高温酸化、熱サイクルなどでは基材からの拡散があり、基材の材質は実機に近いものを用いる必要があるが、本研究ではコーティング後の EB-PVD 膜の残留応力の測定、解析の基礎的研究を行うことを目的とし、基材の材質として SUS304 を用いた。ボンドコートの厚さは、約 0.14 mm である。ボンドコートの上に、トップコートとして 8 mass% Y_2O_3 - ZrO_2 を EB-PVD 法により成膜した。EB-PVD による成膜時の基材温度は、1143 K とした。断面観察により測定したトップコートの厚さは、平均で 0.32mm であった。

残留応力解析にはトップコートの機械的性質の測定が必要である。トップコート単体の膜を作製するために、電解研磨で基材を除去しようとしたが、電解研磨中にトップコートが破壊してトップコート膜単体の取り出しは困難であった。そのため、EB-PVD トップコート面をバフ研磨してナノインデンテーション法によりヤング率の測定を行った⁽⁹⁾。圧子はパーコビッチ圧子

Table 1 Conditions for laboratory X-rays.

Characteristic X-rays	Cr-K α
Tube voltage	30 kV
Tube current	20 mA
Filter	V
Diffractions	ZrO ₂ 133 + 331
Diffraction angle 2 θ_0	153.86 deg
Scanning angle 2 θ	150~159 deg
Scanning step	0.1 deg/step
Preset time	4 sec
sin ² ψ	0~0.7, 0.05 step
Stress constant K	-192 MPa/deg

を用い、トップコート面をバフ研磨した後、300 μN から 1800 μN まで 300 μN の間隔でトップコート深さ方向に押し込み、各負荷レベルで3回測定を行いヤング率を求めた。そのすべてを平均した結果、ヤング率 E として 123 GPa を得た。なお、ポアソン比 ν は 0.3 と仮定した。これらの値は、X線応力測定に用いた。理論的弾性定数を求めることは困難であり、便宜的に本研究では結晶の弾性異方性はないものとし、面内・面外方向のヤング率を同等と仮定した。また、EB-PVD膜の面内と面外方向との機械的ヤング率に差があることが考えられる。特に、柱状結晶が膜厚方向に成長しているために面内方向での圧縮の機械的ヤング率は大きく、引張の機械的ヤング率は小さくなると考えられる。しかし、後述のように測定された残留応力分布は圧縮が主であった。インデンテーション法によるヤング率は圧縮方向の弾性関係を表すので、本法により得られたヤング率を用いて得られた応力も近似的値として妥当であると考えられる。

3.2 ラボX線による面内応力の測定 2θ -sin² ψ 法により面内応力 σ_1 を測定した。そのX線応力測定の条件を表1に示す。EB-PVDされたジルコニア膜は配向特性を持ち、その優先方位もコーティング時の基材温度などの条件に依存するので⁽¹⁰⁾、前もって各 ψ でのプロファイルを測定しガウス曲線で133および331回折ピークを波形分離して、sin² ψ 法が利用できることをあらかじめ確認した。

EB-PVD遮熱コーティングの σ_1 の深さ方向の応力分布は、残留応力を導入しないように粒径1 μm のダイヤモンドスラリーを用いてバフ研磨し、逐次表面除去した面をX線応力測定して求めた。なお、セラミックスの研削残留応力は、砥粒の径に比例して大きい圧縮残留応力が生じるが、1 μm 粒径のダイヤモンドスラリーによるバフ研磨の場合は、ほぼ残留応力を導入することなく研磨除去が可能である⁽¹¹⁾。

Table 2 Conditions for synchrotron X-rays.

Wavelength	17.264 pm (71.793 keV)
Divergent slit (mm)	0.1 \times 8 (height \times width)
Receiving slit 1, 2 (mm)	0.1 \times 8 (height \times width)
Divergent angle of RS	0.0255 deg
Diffraction	ZrO ₂ , 333
Diffraction angle 2 θ_0	10.0389 deg

3.3 高エネルギーX線による面外ひずみ測定 高エネルギー放射光X線による面外ひずみ ϵ_3 測定は、放射光施設 SPring-8 の産業用ビームライン BL19B2 で行った。その測定条件を表2に示す。入射側スリットおよび受光側ダブルスリットによりゲージ体積を決定した。試料は、ゴニオメータの試料台に z 軸ステージをセットし、試料を z 方向に移動させて逐次回折を測定した。測定した回折曲線をガウス関数で近似してピーク位置を回折角 2θ とした。

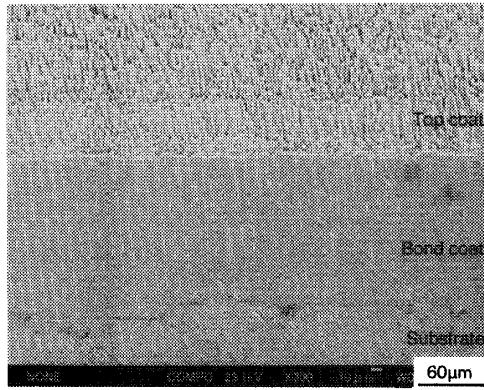
4. 実験結果および考察

4.1 EB-PVDコーティングの微視的観察 試験片の切断面の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を図2(a)に示す。図に示されるように、ジルコニアトップコートはボンドコート面から厚さ方向に有向性を持ちながら結晶成長している。その柱状結晶の径は小さく、その方向はやや傾きを持っている。トップコートには、顕著なき裂、気孔および粒界の空隙はみられず、緻密な様相を呈しているが、ボンドコート界面付近では結晶方位の乱れが多い。

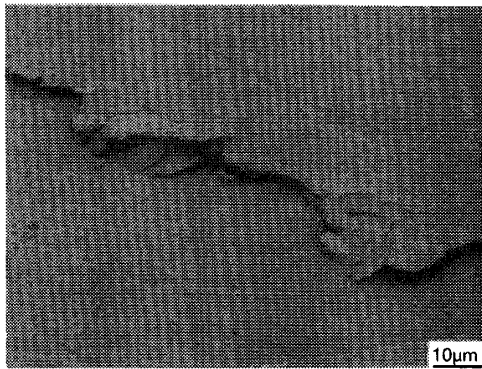
NiCoCrAlY ボンドコートは、SEM 写真に示されるように気孔などの欠陥はみられない。また、トップコートとボンドコートの界面は粗さがほとんどないが、ボンドコートと基材の界面はある程度粗さがある。トップコートとボンドコートの界面には、明瞭な熱成長酸化物 (thermally grown oxide) などの層は見あたらない。

一方、電解研磨によりボンドコートとトップコートとの界面部がくさび状に融解する。その際にトップコートにき裂が発生し、トップコートの破壊が生じた。成膜したままのトップコート面にき裂は存在せず、かつ破壊した破片の強度もあるので、この破壊は、電解研磨による残留応力の解放で大きな変形が生じるためと考えられる。

トップコート表面のき裂のSEM写真を図2(b)に示す。一般に、面内方向の残留応力が引張りであれば、き裂は開口する。しかし、トップコートのき裂は図に示されるように開口せず、面外にせり出している様子がいたるところで確認された。き裂面は圧縮を受けてせん断破壊している様相に近く、このことから面内方

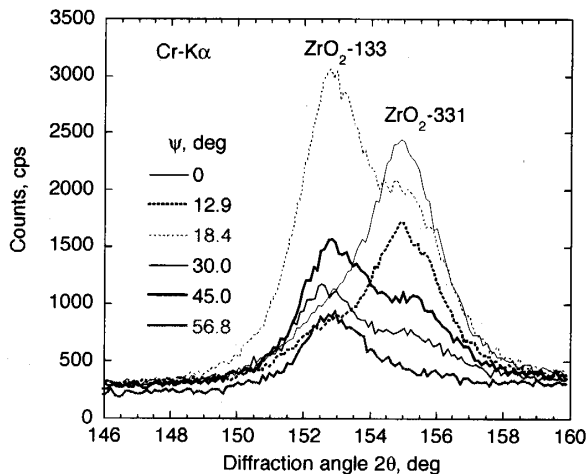


(a) Cross section



(b) Cracking on the surface of EB-PVD coating

Fig. 2 Scanning electron micrographs of EB-PVD coatings.

Fig. 3 Diffraction profiles for each ψ angle.

向には大きな圧縮の残留応力があることが予測される。

4.2 ラボX線による面内応力分布 EB-PVD法によるジルコニアトップコートは、前節のSEM観察により配向膜であることがわかった。EB-PVD遮熱コーティング膜の応力評価の重要な課題は、配向特性を持つ膜の応力評価方法である。本研究では、EB-PVDに

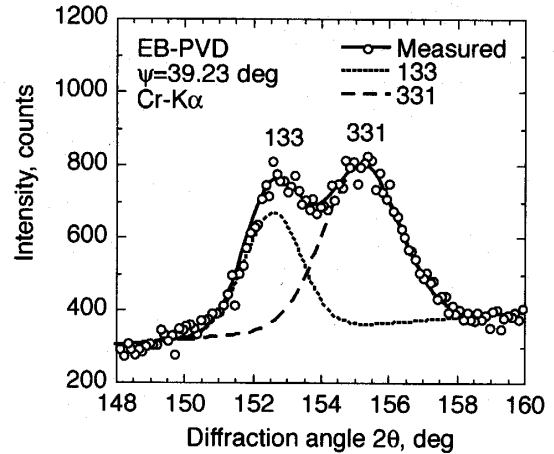
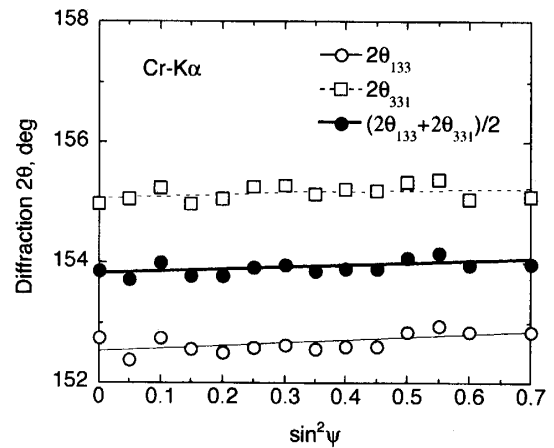


Fig. 4 Separation of 133 and 331 diffraction.

Fig. 5 2θ - $\sin^2\psi$ diagram.

よる配向をもつ膜の面内応力測定に $\sin^2\psi$ 法を適用することを試みる。

その配向特性を明確にするために、回折プロファイルを測定した。その結果、ジルコニアトップコートは〈111〉の優先方位が強く、その他〈110〉優先方位も弱いながら認められた。応力測定に使用する $\text{Cr-K}\alpha$ 線による 133+331 回折の各 ψ におけるプロファイルを図3に示す。配向の影響で回折強度が変化しているが、各 ψ で回折曲線が得られるので、 $\sin^2\psi$ 法が適用できる可能性がある。ただし、133と331回折で強度が変化するので、回折2重線のままではピーク決定はできず、それぞれの回折ピークに波形分離する必要がある。

実際に133と331の回折ピークをガウス関数で近似して波形分離した例を図4に示す。きれいに各回折ピークに分離されていることがわかる。そこで、各 ψ についてもガウス関数近似により波形分離して 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を作成した。

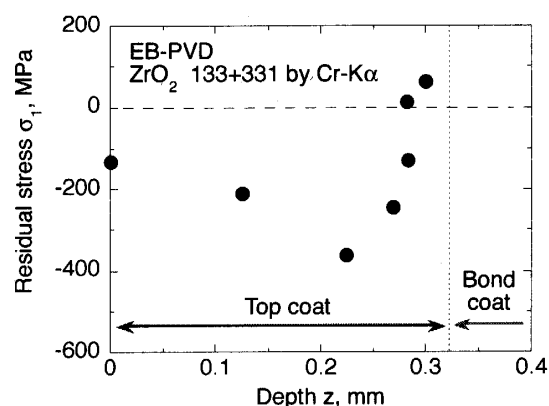
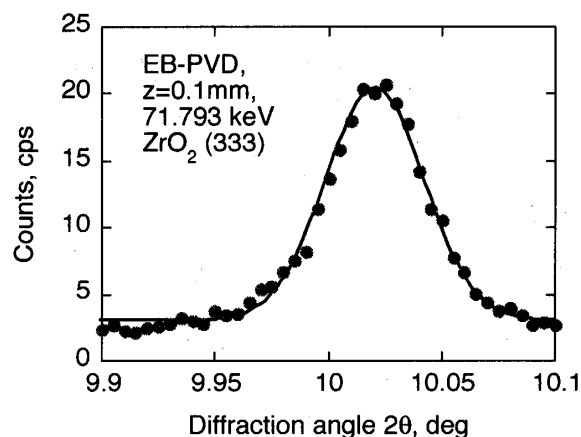


Fig. 6 Distribution of in-plane stress in top coating.

図5にEB-PVDトップコートの 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を示す。133回折および331回折に波形分離した 2θ - $\sin^2\psi$ 線図の勾配がほぼ同じ値を示していることから、波形分離の信頼性が評価できる。ここでは、分離された133回折および331回折のピーク角度の相加平均から $\sin^2\psi$ 線図の勾配を計算して、面内応力 σ_1 の値を得た。なお、試験片の表面における σ_1 および σ_2 の値を測定したところ、それぞれ -197 MPaおよび -176 MPaであり、面内応力は等2軸応力状態が成り立つ。

以上の方法により 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を作成して、深さ方向の面内残留応力の分布を測定した。また、表面除去による残留応力の再分布を考慮して補正を行った⁽¹²⁾。その結果を図6に示す。表面で大きな圧縮の残留応力があり、内部に向かってさらに大きな圧縮応力となる。しかし、深さ z がおよそ 0.2 mmを過ぎる付近からボンドコートとの界面に向かい圧縮残留応力が急激に減少している。室温下のトップコートの残留応力測定の範囲での検討として、以下のように説明できる。ボンドコート表面から成長した初期のジルコニア結晶は任意の方位をもった種結晶からなり、結晶の成長過程で膜厚方向に $\langle 111 \rangle$ 方位の結晶が優先的に発達する。そのため、ボンドコート付近ではジルコニアの結晶の乱れによる微小な空隙が生じ、ひずみが吸収される。その結果、トップコートの残留応力がボンドコート界面付近で減少すると考えられる。もし、EB-PVD法において $\langle 111 \rangle$ の結晶成長を一方方向でなくランダム方向に成長を制御できれば、断熱性の付与と残留応力の軽減ができることを示唆しおり、興味深い。

トップコートの面内応力分布が圧縮側にあることと、前節のトップコートに発生するき裂が発生して面外にせり出している様相とはよく対応している。また、成膜時の高温から冷却される過程で基材より熱膨張係数の小さいジルコニアトップコートに圧縮の残留応力が

Fig. 7 Measured diffraction curve from ZrO_2 333 with hard synchrotron X-rays.

測定されたことは、このことに合致する。

4.3 高エネルギー放射光による面外ひずみ解析

高エネルギー放射光により測定された回折曲線の例を図7に示す。これは、ゲージ体積中心が表面より 0.1 mm深くなった所の結果である。50秒の計数時間を設定して1000カウント以上を得ており、十分な精度を確保している。 ZrO_2 の $\langle 111 \rangle$ 配向をうまく利用することで、ひずみスキニングが可能となる。つまり ZrO_2 の333回折は、 $\langle 111 \rangle$ 配向のために強い回折を示した。その結果、ゲージ体積が試料表面下から深くても十分な回折強度が得られ、測定が可能であった。ひずみスキニングのゲージ体積は小さく、また表面から深さ方向に沈み込むために、コーティング深さ方向のデータを測定するには、X線光源強度の十分得られるシンクロトロン放射光を利用することが必要である。また、 $\langle 111 \rangle$ 配向により511, 115回折のピークが現れないので、単一のガウス関数できれいに近似できる利点もある。

高エネルギーX線により測定した ZrO_2 333回折の回折角 2θ とゲージ体積の深さ z の関係を測定した結果を図8に示す。図8に示すように、測定された回折角 2θ が表面から内部に向かい大きく変化している。これは、受光スリットの発散およびゲージ体積中のX線侵入深さによる回折強度の影響により、ゴニオメータの幾何重心とゲージ体積の回折強度の重心との位置が異なるために生じる誤差である。アナライザを利用して補正する方法についての報告⁽¹³⁾もあるが、アナライザによる強度の減衰が大きく回折強度が得られなかった。アナライザによるひずみスキニング法には、アンジュレータなどの強い光源を利用する必要がある。本研究では、筆者らが提案した表面効果による誤差を

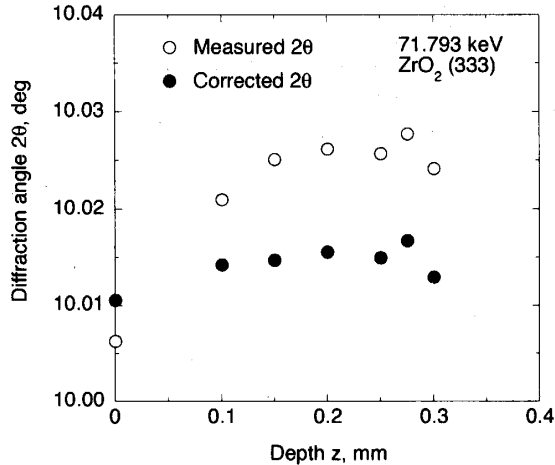


Fig. 8 Diffraction angles measured by strain scanning method and corrected by taking account of surface effect.

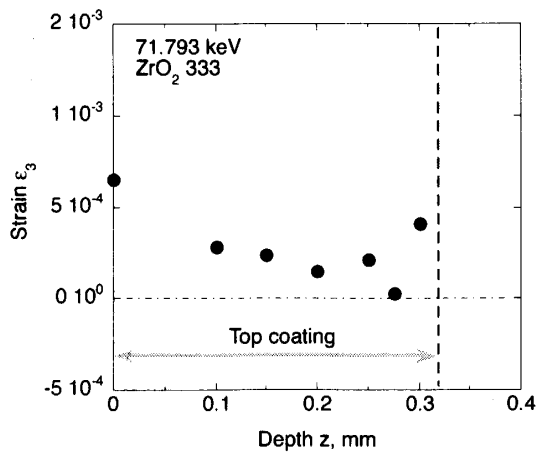


Fig. 9 Distribution of out-of-plane strain in top coating.

解析的に補正する方法⁽¹⁴⁾を使用した。補正を行った結果を図8に併せて示した。

回折角から格子面間隔 d を式(4)から得ることができる。試料表面 ($z=0$) では平面応力状態になるので、面外応力 σ_3 が0になる。本研究では、式(5)により無ひずみの格子面間隔 d_0 を決定し、その d_0 を用いて面外ひずみ $\epsilon_3(z)$ の分布を式(3)により計算する。面外ひずみ ϵ_3 の分布を図9に示す。トップコートには圧縮の残留応力があるために、概ね面外ひずみ ϵ_3 は正の値を示している。

図6で測定された面内応力 σ_1 および図9で得られた面外ひずみ ϵ_3 をもとに式(6)から面外応力 σ_3 を計算した。その結果を図10に示す。図には、図6で示し

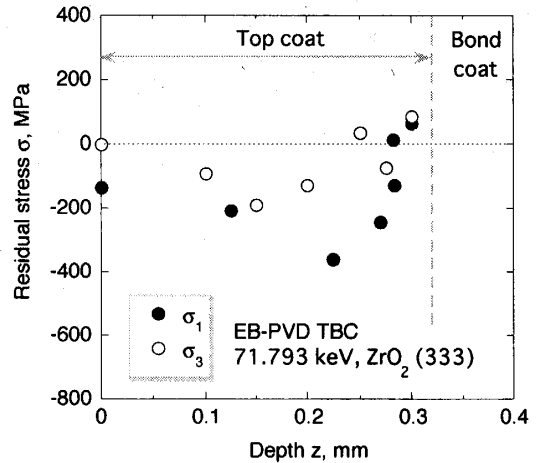


Fig. 10 Distribution of residual stresses in top coating.

た面内応力 σ_1 の分布も併せて示す。面外応力 σ_3 の深さ z 方向の分布をみると内部に向かい圧縮を示した後、面外方向の残留応力はボンドコート界面近くで減少している。ただし、面内の圧縮残留応力と比較して大きな圧縮にはなっていない。つまり、はく離応力 σ_3 は内部で圧縮を示すが、面内応力成分 σ_1 よりもその絶対値は小さく、ボンドコートとの界面付近で大きな引張を生じていないので、膜のはく離には至っていない。

図10に示すように、EB-PVD遮熱コーティングの面内方向、面外方向の応力分布を比較すると、面内方向の大きな圧縮残留応力が存在する。もし、トップコートの一部がはく離した時、面内圧縮残留応力が解放され、それが変形を引き起こしてき裂が発生する。トップコートが冷却時に圧縮残留応力で破壊する場合は、トップコート内部の面内圧縮残留応力の低減が必要である。EB-PVDに際して基材を回転させることにより、ジルコニアをうねりながら成長させることも可能である⁽¹⁵⁾。このようなコーティングは、トップコートの密度も小さく隙間が多いので、圧縮残留応力を低減させ、かつ断熱効果も期待できる。

本研究では、界面からやや成長した所に大きな圧縮の面外応力が認められる。原因としては、結晶方向の差異による微視的応力により、面外応力が生じている可能性がある。結晶方位がそろっている表面側では結晶方位差による微視的応力が生じにくい。また、結晶成長の方位が乱れて空隙のある界面側では結晶同士があまりぶつかり合わず、微視的応力が生じにくい。これに対して、界面からやや成長した付近では結晶成長の差異が大きくなり、それらのぶつかり合いも大きくなり、面外方向の圧縮応力が大きくなると考えられる。いず

れにしても今後、他の回折面方位による面外応力の測定などの検討が必要である。

5. 結 言

ラボX線および高エネルギー放射光X線を組み合わせ、EB-PVDによる遮熱コーティングの残留応力を解析した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) EB-PVDによるジルコニアトップコーティングは〈111〉配向が支配的であり、その他〈110〉配向も少し見られた。面内応力分布は、Cr-K α 線による133+331回折を波形分離して、 $\sin^2\psi$ 法にて測定できる。

(2) 面外応力分布は〈111〉配向による強い回折を逆に利用して、333回折によるひずみスキャンニングを行った。解析的方法でひずみスキャンニング法の表面効果の補正を行い、EB-PVD遮熱コーティングの面外方向のひずみ分布が測定できる。

(3) 面内応力は表面から内部に向かい大きな圧縮を示し、ボンドコート界面近くで急激に減少した。また、トップコートに生じるき裂は面内の大きな圧縮残留応力により開口せず、面外にせり上がる様子が観察された。

(4) 面外応力分布は、内部に向かい圧縮を示した後、ボンドコート界面近くで減少している。しかし、面外の圧縮の残留応力は面内の圧縮残留応力よりも小さい。

最後に、本研究を遂行するに当たり、高輝度光科学研究センターのトライアルユース(2003B0947-RInp-TU)をはじめ放射光共同研究(2003B0217-NM-np, 2003A0161-NMD1-np, 2002B0158-NDI-np)の援助をいただいた。また、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)の援助を得た。ここに記して感謝の意を表し

ます。

文 献

- (1) Yamaguchi, N., Wada, K., Kimura, K. and Matsubara, H., *J. Ceramic Soc. Japan*, **111** (2003), 883-889.
- (2) 松原秀彰, 香川豊, 吉田豊信, *セラミックス*, **36** (2001), 646-651.
- (3) Johnson, C.A., Ruud, J.A., Bruce, R. and Wortman, D., *Surface and Coating Technology*, **108-109** (1998), 80-85.
- (4) 鈴木賢治, 田中啓介, 秋庭義明, 川村昌志, 西尾光司, 尾角英毅, *材料*, **52**, 7 (2003), 756-763.
- (5) 鈴木賢治, *機械の研究*, **56-3**, (2004), 340-346.
- (6) 鈴木賢治, 田中啓介, 秋庭義明, 川村昌志, 西尾光司, 尾角英毅, *機論*, **70-693 A** (2004), 724-730.
- (7) Suzuki, K. and Tanaka, K., *Textures and Microstructures*, **35**, 3/4 (2003), 207-217.
- (8) Withers, P.J., *Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation*, ed. by Fitzpatrick, M.E. and Lodini, A., 170-189 (2003), Taylor & Francis.
- (9) Oliver, W.C., Pharr, G.M., *J. Mater. Res.* **7-6** (1992), 1564-1583.
- (10) Wada, K., Yamaguchi, N. and Matsubara, H., *Surface and Coatings Technology*, **184** (2004), 55-62.
- (11) 田中啓介, 鈴木賢治, 中川平三郎, *砥粒加工学会*, **34** (1990), 17-24.
- (12) 田中啓介, 峰典明, 鈴木賢治, 川瀬良一, *材料*, **40-448** (2003), 96-101.
- (13) Withers, P.J., Rreuss, M., Webster, P.J., Hughes, D.J. and Korsunsky, A.M., *Material Sci. Forum*, 404-407 (2002), 1-12.
- (14) 町屋修太郎, 秋庭義明, 鈴木賢治, 田中啓介, 栗村隆之, 小熊英隆, *材料*, **54**, 11, 掲載予定.
- (15) Wada, K., Yamaguchi, N. and Matsubara, H., *Surface and Coatings Technology*, **191** (2005), 367-374.