

## 熱遮へいコーティング膜の変形特性の X 線的研究\*

鈴木 賢治<sup>\*1</sup>, 町屋 修太郎<sup>\*2</sup>  
田中 啓介<sup>\*3</sup>, 坂井田 喜久<sup>\*4</sup>X-Ray Study on Deformation Characteristics of Thermal Barrier  
Coating FilmsKenji SUZUKI<sup>\*5</sup>, Shutaro MACHIYA,  
Keisuke TANAKA and Yoshihisa SAKAIDA<sup>\*5</sup> Department of Technology and Living Sciences, Niigata University,  
8050 Igarashi-2-no-cho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

Two kinds of thermal barrier coating films with 8 wt% yttria-zirconia were made by atmosphere plasma spraying (APS film) and by low-pressure plasma spraying (LPS film). These films were removed from substrates. The mechanical and X-ray elastic constants of the APS and LPS films were measured by tensile and bending deformation. For the APS film, a lamella structure was formed with solidification of molten zirconia and lamellae were interlaced with each other. Sliding between lamellae is restrained so that the mechanical elastic constants by bending deformation are about the same as that by tensile deformation. For the LPS film, lamellae were piled up regularly and the thickness of the lamellae was thinner than that of the APS film. The mechanical elastic constant of the LPS film measured by bending deformation was lower than that by tensile deformation, because of sliding between lamellae. On the other hand, the X-ray elastic constants of the APS and LPS films were nearly identical, because the X-ray elastic constant was obtained from the strain of the crystalline phase in response to the applied stress.

**Key Words:** Experimental Stress Analysis, Material Testing, X-Ray Stress Measurement, Residual Stress, Elastic Constant, Thermal Barrier Coating, Ceramics

## 1. 緒 言

ジルコニアをプラズマ溶射する熱遮へいコーティング (TBC) は、ガスタービンの高効率を支える重要な技術であり、TBC 膜の強度および寿命などの評価上、機械的特性を明らかにすることが重要である。

コーティングの過程において、ジルコニアの溶滴は高速で基材面に衝突して広がり、膜厚方向に急冷・凝固するために、凝固組織が積層したラメラ構造を呈する。その結果、TBC 膜の変形特性には、気孔だけでなく、ラメラ界面の密着性やラメラ組織の絡みが複雑に影響する<sup>(1)</sup>ので、TBC 膜の複雑な機械的特性については未解決な点が多い。

この複雑な TBC 膜の残留応力を X 線法で評価する

ための X 線の弾性定数を引張り負荷により求めた結果については前報で報告した<sup>(2)</sup>。TBC 膜の機械試験では非弾性的挙動をする研究報告もあり<sup>(2)~(4)</sup>、著者らも長時間の曲げ変形を受けた TBC 膜は永久変形するが<sup>(5)</sup>、引張り変形では永久変形は顕著でないことも確認している<sup>(2)</sup>。このように TBC 膜では、引張りと曲げ変形でメカニズムが異なることが予測される。X 線応力測定に必要な応力定数が変形モードにより異なることがあれば、測定される応力値に大きな差異をもたらす。そのため変形特性の差異を調べ、その原因を明確にすることは X 線による残留応力測定において重要である。

機械的に測定されるひずみは、TBC 膜のき裂、気孔およびラメラ組織のひずみなど全てを含んでいる。他方、X 線のひずみは負荷応力による TBC 膜の結晶の弾性ひずみを測定している。この両者により測定されたひずみの差異が、TBC 膜の複雑な挙動を解明する手がかりを与えることが期待される。TBC 膜の引張り強さは約 30MPa であり<sup>(4)</sup>、実機の残留応力を評価するためには、その低い引張り応力で TBC 膜を評

\* 原稿受付 2000 年 11 月 6 日。

<sup>\*1</sup> 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)。<sup>\*2</sup> 新潟大学大学院。<sup>\*3</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋千種区不老町)。<sup>\*4</sup> 正員, 静岡大学工学部(☎432-8561 浜松市城北3-5-1)。

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

備しなければならない。前報<sup>(2)</sup>では、これに対応する 20MPa の応力範囲で引張り試験を行い、十分な精度を得ることができた。

以上のことから本研究では、大気プラズマ溶射した TBC 膜および減圧プラズマ溶射した TBC 膜の二種類の膜を用意し、引張りおよび曲げ変形による機械的弾性定数と X 線の弾性定数を比較・検討し、TBC 膜の変形特性を明らかにした。また、これらの TBC 膜の変形特性とラメラ組織との関係を走査電子顕微鏡の観察と併せて検討した。

## 2. 実験方法

**2.1 コーティングおよび試験片** ハステロイ X の基材にプラスト処理を施し、その面に NiCoCrAlY をプラズマ溶射により厚さ約 0.12mm のボンドコートを形成し、その上に 8wt%  $Y_2O_3$  (9 mol%  $Y_2O_3$ ) を含む  $ZrO_2$  を大気プラズマ溶射して TBC 膜を製膜した。TBC 膜の厚さは約 0.37mm である。その TBC された表面を残留応力を生じないように 1  $\mu$ m のダイヤモンドペーストでバフ研磨し、60  $\mu$ m ほど除去した。その後、電解研磨により TBC 膜を基材からはく離させ、はく離させた側の面を同様にバフ研磨にて除去した。最終的に、大気プラズマ TBC 膜試験片の形状は、幅 8mm、長さ 60mm、厚さ約 0.3mm とした。以下、これを APS 膜と称する。

一方、ナイモニック 263 を基材のプラスト処理面に減圧プラズマ溶射により厚さ約 0.12mm の NiCoCrAlY をボンドコートして、その上に 8wt%  $Y_2O_3$  を含む  $ZrO_2$  を減圧プラズマ溶射し、厚さ 0.37mm の TBC 膜を形成した。電解研磨により TBC 膜をはく離させ、APS 膜と同様に仕上げをし、幅 8mm、長さ 60mm、厚さ約 0.3mm の減圧プラズマ溶射 TBC 試験片を用意した。以下、これを LPS 膜と称する。

かさ密度は APS 膜では 5.20g/cm<sup>3</sup> (気孔率 13.9%)、LPS 膜では 5.59g/cm<sup>3</sup> (気孔率 7.5%) である。なお、気孔率はかさ密度と理論密度 (6.04 g/cm<sup>3</sup>) から計算により求めた。

**2.2 引張りおよび曲げ試験方法** TBC 膜に抵抗線ひずみゲージを直接貼る方法では、ゲージセメントが、TBC 膜の気孔、き裂並びにラメラ組織の界面を接着するため、正しい応力-ひずみ関係を測定できない。そのため、本研究では前報と同様にして<sup>(2)</sup>、TBC 膜に対して非接触でひずみを測定する引張り治具により TBC 膜の引張り試験を行い、機械的ヤング率の測定を行った。引張り試験は、オートグラフに TBC 膜試験片を装着して、引張り速度 0.1mm/min で行った。

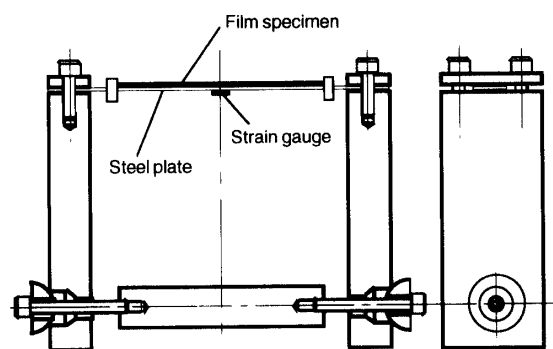


Fig. 1 Bending jig for X-ray stress measurement

一方、TBC 膜の曲げ変形に対する機械的ヤング率を測定するために、スパン間隔  $l = 50$  mm とした TBC 膜の 3 点曲げ試験を行った。荷重点のたわみ  $\delta$  と荷重  $P$  の関係は、平板の円筒曲げ変形を仮定し、

$$P = \frac{4Ebh^3}{(1-\nu^2)l^3} \delta \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $b$  は TBC 膜の幅、 $h$  は膜厚、 $l$  はスパン間隔および  $\nu$  はポアソン比である。この式を用いて曲げ変形によるヤング率  $E$  を測定した。加えて、X 線応力測定に要する時間と同じ 12 時間の死荷重を負荷して、その後たわみ  $\delta$  を測定した。なお、機械的ポアソン比  $\nu$  は、便宜的に 0.3 を使用した。

**2.3 X 線の弾性定数の測定** 引張りの X 線の弾性定数を測定するために、試験片を前報<sup>(2)</sup>と同様に引張り治具に装着し、試験片に引張り変形を与え逐次 X 線応力測定を行った。APS 膜は 0~17.5 MPa までの範囲で 2.5 MPa 間隔で負荷および除荷した。また、LPS 膜は 0~20 MPa までの範囲で 2.5 MPa 間隔で負荷および除荷した。引張り変形による負荷応力を算出する

Table 1 X-Ray conditions for stress measurement

Films	APS	LPS
Characteristic X-ray	Cr-K $\alpha$	
Diffraction	1 3 3 + 3 3 1	
Diffraction angle $2\theta_0$	153.82°	153.99°
$\sin^2 \psi$	0.0 ~ 0.6 (0.05 step)	
Scanning	0.1 deg/step	
Preset time	4 sec	
Tube voltage	40 kV	
Tube current	30 mA	
Filter	V	
Divergent angle	0.64°	
Irradiated area	4 × 8 mm <sup>2</sup>	

場合は、測定したひずみと引張り試験で得られたヤング率を用いた。

一方、TBC 膜に曲げ変形を与えるための治具を図 1 に示す。この治具は、曲げモーメントにより平板に任意の曲率を設定し、その曲率をもった平板に TBC 膜を固定して、所定の曲げ変形を与えた。負荷応力の計算は、平板の円筒曲げ問題として扱った。X 線応力測定には約 12 時間を要するので、12 時間死荷重を与えて測定した 3 点曲げ試験で得られた機械的弾性定数と試験片の曲率から計算したひずみとを掛けて求めた。負荷応力の範囲は、APS 膜の場合は  $-11.5$  MPa から  $11.5$  MPa 間での範囲を 12 等分して測定し、LPS 膜の場合は  $-12.4$  MPa から  $8.27$  MPa の範囲を 12 等分して測定した。

本研究では、高回折角かつ回折強度が強く精度のよい Cr-K $\alpha$  線による  $1\ 3\ 3 + 3\ 3\ 1$  回折を利用した<sup>(6)</sup>。X 線応力測定法は、 $\psi$  一定の並傾法による  $\sin^2 \psi$  法に従った。精度を確保するために  $\sin^2 \psi$  は  $0 \sim 0.6$  までを  $0.05$  ステップで測定し、3 回測定の平均を用いて  $2\theta\text{-}\sin^2 \psi$  線図を作成した。また、応力を負荷した後に試験片を試料台に設置する際に、試料の設置誤差が生じないように十分注意した。その他の X 線条件を表 1 に示す。

X 線の弾性定数  $E_X/(1 + \nu_X)$  は、

$$\frac{s_2}{2} = \frac{1 + \nu_X}{E_X} = -\frac{\cot \theta_0}{2} \left( \frac{\partial M}{\partial \sigma} \right) \quad (2)$$

となるので、負荷応力  $\sigma$  を変えながら  $2\theta\text{-}\sin^2 \psi$  線図の傾き  $M$  を測定することで、X 線の弾性定数が測定できる<sup>(7)</sup>。また、

$$-s_1 = \frac{\nu}{E_X} = \frac{\cot \theta_0}{2} \left( \frac{\partial 2\theta_{\psi=0}}{\partial \sigma} \right) \quad (3)$$

となるので、 $\psi = 0$  における  $2\theta_{\psi}$  の値  $2\theta_{\psi=0}$  と負荷応力  $\sigma$  の関係から X 線の弾性定数  $E_X/\nu_X$  が求められる。なお、残留応力測定で重要な応力定数  $K$  は次式で与えられる。

$$K = -\frac{E_X}{2(1 + \nu_X)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180} \quad [\text{MPa/deg}] \quad (4)$$

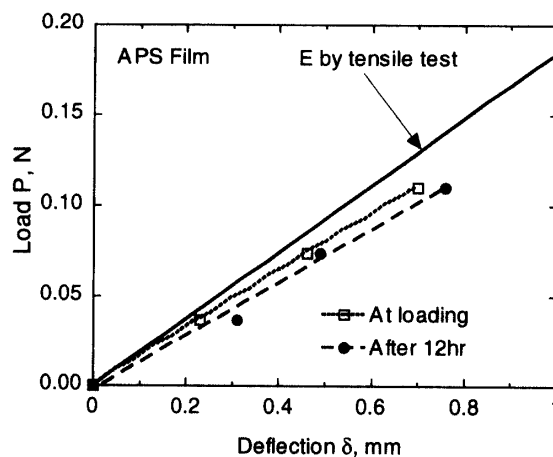
残留応力は測定した  $2\theta\text{-}\sin^2 \psi$  線図の傾きに  $K$  を掛けることにより求まる。

### 3. 実験結果および考察

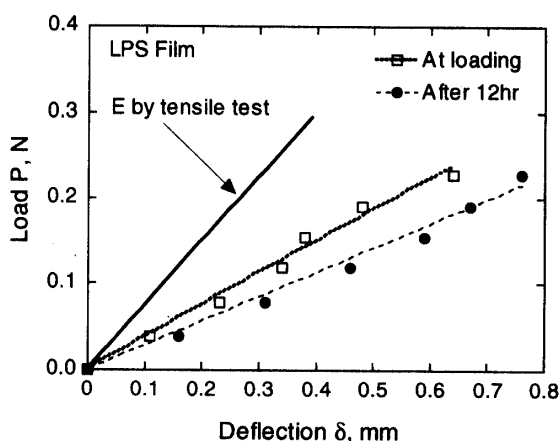
**3.1 機械的弾性定数** TBC 膜の引張り試験を行った結果、前報に示すように引張りの応力-ひずみ関係はよい直線関係を示した<sup>(2)</sup>。その結果は表 2 に示すように、APS 膜の機械的ヤング率  $E$  は  $43.9$  GPa、

Table 2 Measured mechanical Young's modulus

Deformation	Tension	Bending
APS film	43.9 GPa	35.6 GPa
LPS film	103 GPa	42.5 GPa



(a) APS film



(b) LPS film

Fig. 2 Bending test of TBC films

LPS 膜のヤング率  $E$  は  $103$  GPa を得た。両者のヤング率の差異は、APS 膜は気孔率が高いこと、後述するようにラメラ組織のうねりが大きく引張り方向に垂直なラメラ界面が多いために、密着性の弱い組織であるラメラ界面が引張られることも一因と考えられる。

TBC 膜試験片の 3 点曲げ試験の結果を図 2 に示す。比較のために、図 2 には引張り試験片で得られたヤング率を用いて、平板のたわみ  $\delta$  を計算した結果も合わせて示した。気孔を巻込んだラメラの積層により形成される TBC 膜の曲げ変形は完全な弾性体とは異なるが、本研究では単純化のために弾性体の平板の曲げとして解析した。

図 2 (a) の荷重とたわみの直線関係の傾きから式 (1)

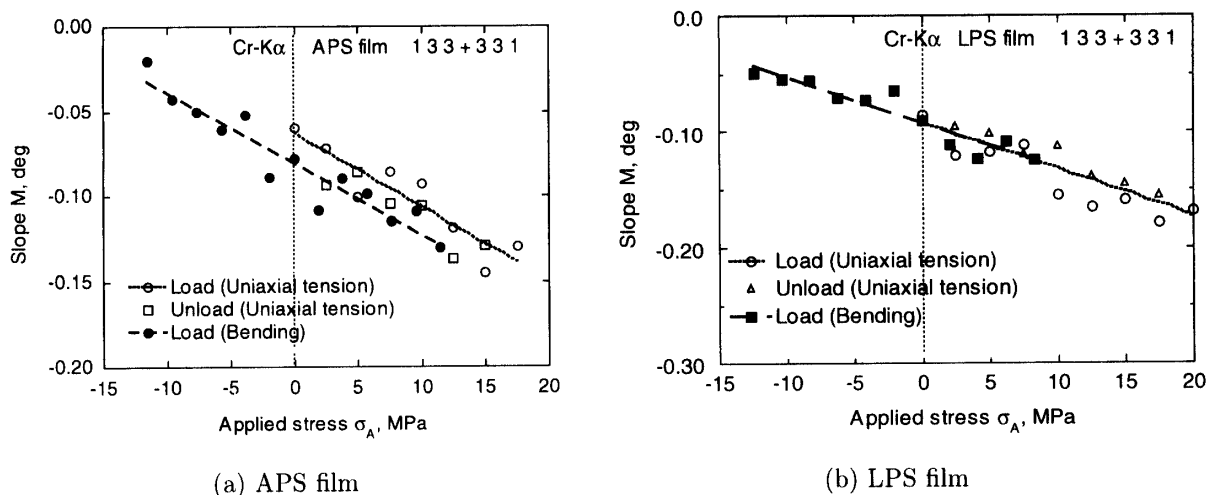


Fig. 3 Relation between slope and applied stress

Table 3 Measured X-ray elastic constants and stress constant

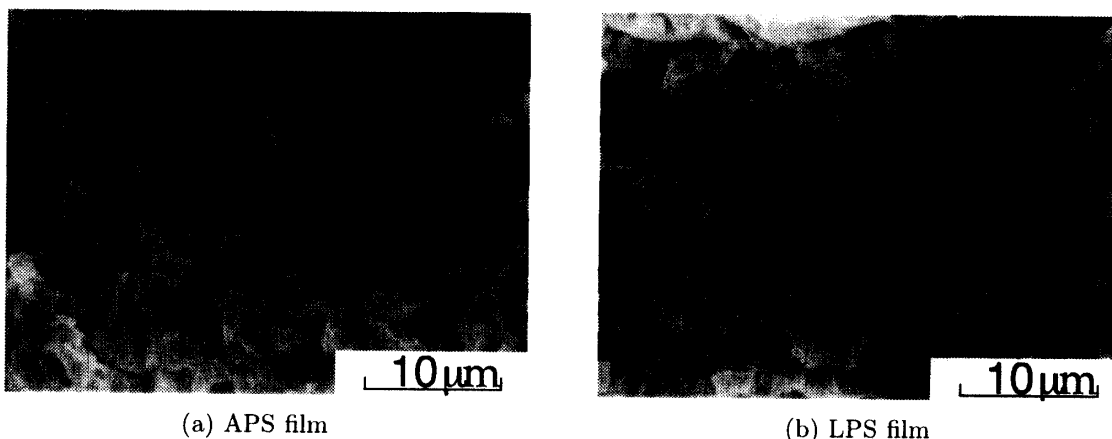
Tensile deformation	X-ray elastic compliances		X-ray elastic constants				Stress constant $K$ MPa/deg
	$(1 + \nu_X)/E_X$	$\nu_X/E_X$	$E_X/(1 + \nu_X)$	$E_X/\nu_X$	$E_X$	$\nu_X$	
Specimen	$\times 10^{-3}/\text{GPa}$	$\times 10^{-3}/\text{GPa}$	GPa	GPa	GPa		
APS film	$8.85 \pm 1.67$	$1.87 \pm 0.51$	113	535	143	0.267	-229
LPS film	$8.71 \pm 1.50$	$1.92 \pm 0.50$	115	521	148	0.284	-232
Bending deformation	X-ray elastic compliances		X-ray elastic constants				Stress constant $K$ MPa/deg
	$(1 + \nu_X)/E_X$	$\nu_X/E_X$	$E_X/(1 + \nu_X)$	$E_X/\nu_X$	$E_X$	$\nu_X$	
Specimen	$\times 10^{-3}/\text{GPa}$	$\times 10^{-3}/\text{GPa}$	GPa	GPa	GPa		
APS film	$8.54 \pm 0.87$	$1.16 \pm 0.39$	117	862	136	0.158	-237
LPS film	$8.07 \pm 0.99$	$0.820 \pm 0.14$	124	1220	138	0.113	-250

よりヤング率を求めた。APS 膜では引張り変形のヤング率より曲げ変形のヤング率がやや小さくなる。また、曲げ荷重を 12 時間保持して求めたヤング率は負荷直後のヤング率よりも少し小さくなる。図 2 (b) の LPS 膜の曲げ変形によるヤング率は、12 時間の荷重保持後のたわみ  $\delta$  がかなり大きくなるために、引張りによるヤング率よりもかなり小さくなった。これは、APS 膜とは明らかに異なる曲げ変形特性である。

図 2 の 12 時間後の荷重とたわみの関係を図中の破線で示すように直線近似し、それより式 (1) で機械的ヤング率を求めた。表 2 中の曲げによるヤング率がその結果である。APS 膜の引張り変形によるヤング率は、き裂などの影響により LPS 膜よりも小さい。しかし、曲げ変形によるヤング率は、引張りのヤング率と大きな違いはない。引張りと曲げによる弾性挙動の差異より、複雑な TBC 膜の変形特性が考察することができる。つまり、APS 膜では引張りと曲げ共にほぼ同様な弾性変形の機構が働いている。一方、LPS 膜の曲げ変形のヤング率は、引張り変形から得られたヤン

グ率の半分以下になるので、LPS 膜の曲げ変形においては、引張りとは異なる変形機構が働いている。この LPS 膜の曲げと引張りの変形機構の差異は、LPS 膜の組織構造に起因するので、この点については、TBC 膜の断面の走査電子顕微鏡観察の結果と併せて後述する。

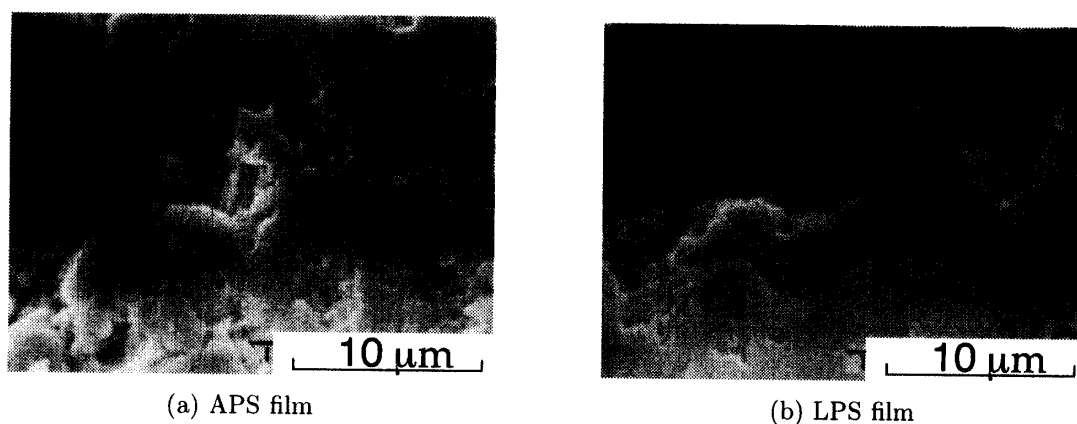
**3.2 X 線の弾性定数** APS 膜および LPS 膜に引張りおよび曲げ変形を与えて、 $2\theta$ - $\sin^2\psi$  線図を測定した。このときの  $2\theta$  と  $\sin^2\psi$  の間に非直線性は認められない<sup>(2)</sup>。その傾き  $M$  を求めた結果を図 3 に示す。図中のそれぞれの直線は、最小自乗法により直線近似したものである。図 3 (a) からわかるように、APS 膜の負荷応力  $\sigma_A$  に対する傾き  $M$  の関係は引張り変形でも曲げ変形でも同じである。APS 膜の引張りの直線関係が曲げ変形による直線関係よりやや上方に移動しているのは、引張り治具に試験片をセットした時にひずみゲージにより圧縮の軸力がかかっているためである。図 3 (b) の LPS 膜の負荷応力  $\sigma_A$  に対する傾き  $M$  の関係は、引張りも曲げ変形もよく一致している。これは、LPS 膜の引張りでは APS 膜の時よりも抵抗



(a) APS film

(b) LPS film

Fig. 4 SEM photographs of fractured cross section of TBC films



(a) APS film

(b) LPS film

Fig. 5 SEM photographs of polished surface of TBC films

線ひずみゲージの弛みをなくすための予荷重が小さいためである。

以上の結果を基に X 線の弾性定数および応力定数を求めた結果を表 3 に示す。APS 膜と LPS 膜との X 線の弾性定数は引張り変形でも曲げ変形でもほぼ一致しており、負荷応力に対する結晶の弾性変形挙動は、引張り変形および曲げ変形に依存しないことを示す。傾き  $M$  から得られる  $E_X/(1+\nu_X)$  の値に比べ  $E_X/\nu_X$  の値は精度が低いので、計算された  $E_X, \nu_X$  の値も精度が低い。ただし、X 線応力測定においては、応力定数を決定する X 線の弾性定数  $E_X/(1+\nu_X)$  の値が重要であり、この値が TBC 膜に依存しないことは X 線残留応力測定において重要である。

一方、表 2 に示すように、LPS 膜では曲げ変形により得られた機械的弾性定数は、引張り変形により得られたものの半分以下になることと考え合わせると、LPS 膜の機械的に測定される変形と X 線的に測定される変形に違いがあることは非常に興味深い。これは、LPS 膜の曲げ変形においてラメラ組織レベルで何らか

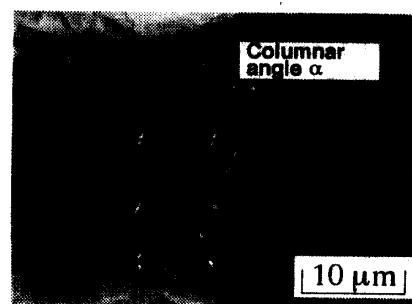


Fig. 6 Definition of columnar angle

のすべりが生じるなどして、非弾性ひずみが生じることが原因と思われる。

**3.3 組織構造と変形特性** APS 膜および LPS 膜を曲げにより破断させ、その断面を走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図 4 に示す。図 4 (a) に示す APS 膜の断面は、急冷され一方向に凝固したラメラ組織の TBC 膜の特徴が現れている。また、ラメラの界面は結合が弱く、界面ではなく離している所も見ら

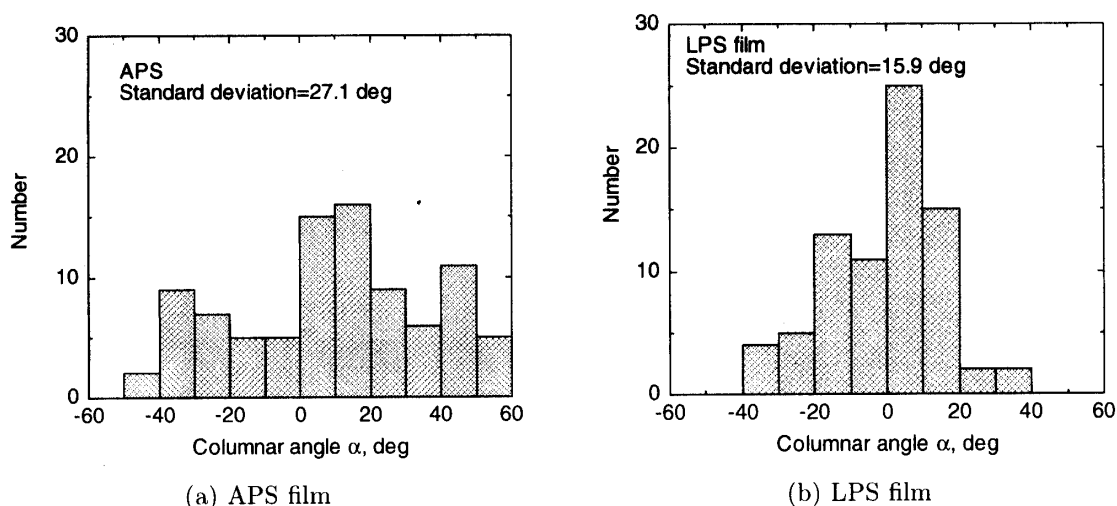


Fig. 7 Distribution of direction columnar structure

れる。図 4 (b) の LPS 膜も APS 膜と同様に TBC 膜の特徴を示している。しかし、図 4 (a) と (b) の SEM 写真を比較すると、APS 膜はラメラが厚く、しかもラメラのうねりが大きく絡み合っている様相を示している。LPS 膜は、APS 膜よりもうねりが少なくより整然と層状に重なっている。また、ラメラ組織の凝固方向の厚みを比較すると APS 膜の方が LPS 膜よりも厚くなっている。

APS 膜および LPS 膜の研磨面の SEM 写真を図 5 に示す。図 5 (a) のように、APS 膜のラメラ組織は絡み合っ垂直にうねり、研磨した表面に凝固方向組織が観察される。これに対して、LPS 膜の研磨面ではラメラ組織のうねりが少なく、そのような個所は見られない。LPS 膜の研磨面のくぼみには、図 5 (b) のようにやや傾斜したラメラ組織がはく離してできたものが多い。

ラメラ組織のうねりを定量的に調べるために、断面の SEM 写真上に正方形の格子点を設け、その位置のラメラ組織の厚みと凝固方向を図 6 のように定義して測定した。その結果を図 7 にまとめた。図中の角度は、コーティング面法線方向を 0 度としてラメラの凝固方向の左右の角度を示している。図の (a) と (b) を比較すると、APS 膜の方が角度の分散が大きく、LPS 膜よりもラメラ組織が大きくうねり、ラメラ組織の絡まりが強い。なお、APS 膜の凝固方向の角度の標準偏差は 27.1 度、LPS 膜の凝固方向の角度の標準偏差は 15.9 度であった。また、ラメラの凝固方向の厚みの平均は、APS 膜が  $4.4 \mu\text{m}$ 、LPS 膜が  $1.9 \mu\text{m}$  であり、厚みもかなり異なっている。

ラメラ組織観察の結果から引張りと曲げ変形による機械的弾性定数の違いについて検討する。LPS 膜は

APS 膜よりもラメラ組織の絡まりが小さく、整然と積層している。また、ラメラ界面は密着性が弱いので、変形に際して界面はすべりを生じやすい部分が多い。その結果、曲げ変形ではラメラ界面がすべるために純粋な平板の曲げのようなひずみ分布とは異なり、曲げ変形による見かけのヤング率は引張りに比較して低下する。

これに対して、APS 膜はラメラ組織の絡み合いが多く、ラメラ界面のすべりが抑制される。その結果、曲げ変形は平板の曲げに近いひずみ分布となり、引張りと曲げ変形による機械的弾性定数に大きな差異が生じない。さらに、X 線の弾性定数が APS 膜と LPS 膜ではほぼ等しいことから、応力を受け持っているのはラメラ界面よりむしろ結晶部分であることがわかる。

以上のように、TBC 膜の曲げ変形においては、ラメラ組織の界面のすべり挙動とラメラ組織の絡み合いが、互いに影響しながら変形する。したがって、TBC 膜の挙動を解析する場合は、これらラメラ組織と変形特性を考慮して解析する必要がある。従来のモデルでは<sup>(4) (8)</sup>、このような TBC 膜の特有の機構については言及されていない。X 線法は、結晶の弾性ひずみを測定しているので、ラメラ組織の界面のすべりに影響されず、真の残留応力を測定するのに優れた方法といえる。

#### 4. 結 言

本研究では、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引張りおよび曲げ変形を与えたときの機械的弾性定数と X 線の弾性定数を測定し、それらを比較して熱遮へいコーティング膜の変形メカニズムを検討した。得られ

た結果を以下にまとめる。

(1) 機械的弾性定数は負荷応力に対する機械的ひずみから測定されるので、機械的ひずみは、気孔、き裂およびラメラ組織界面の影響を含む。その結果、減圧プラズマ溶射膜に比較して、気孔やき裂の多い大気プラズマ溶射膜は引張りのヤング率が小さくなる。

(2) 大気プラズマ溶射膜は、ラメラ組織が厚く、かつ絡み合いがよく発達している。しかし、減圧プラズマ溶射膜はラメラ組織が薄く、しかもラメラ組織の絡み合いが乏しい。その結果、曲げ変形に対してはラメラ界面のすべりを生じやすく、曲げ剛性が低くなり、曲げ試験で得られた機械的ヤング率は小さくなる。

(3) X線の弾性定数は、負荷応力に対する結晶の弾性ひずみを測定しているため、引張りおよび曲げ変形に対して大気プラズマ溶射および減圧プラズマ溶射に関係なく、ほぼ等しい値を与える。また、ラメラ組織の界面よりも、ジルコニアの急冷・凝固したラメラ組織の結晶部分が応力を受け持つ。

なお、本研究は、(財)新潟鉄工百年記念工業技術振興財団の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

(1) Haddadi A. Grimaud, A., Denoirjean, A., Nardou, F. and Fauchais, P., "Crystalline Growth within

- Alumina and Zirconia Coatings with Coating Temperature Control during Spraying", *Thermal Spray Science and Technology*, Pub. by ASM Int. Oh. USA., (1996), pp. 615-622.
- (2) 鈴木賢治, 町屋修太郎, 田中啓介, 坂井田喜久, "熱遮へいジルコニアコーティングの X 線の弾性定数と残留応力分布", *日本機械学会論文集, A 編*, **67-3**, (2001-3), pp.417-423.
- (3) 谷昇, 石田毅, 川野正和, 納富啓, 井上好章, "プラズマ溶射皮膜の残留応力評価", 第 26 回 X 線材料強度に関する討論会講演論文集, 日本材料学会, (1989), p. 59.
- (4) Socie, D. and Rejda, E., "Cyclic Deformation and Fatigue of Plasma Sprayed Thermal Coatings", *Fatigue '99*, Higher Education Press, (1999), p. 1905.
- (5) 鈴木賢治, 町屋修太郎, 田中啓介, 坂井田喜久, "熱遮へいコーティング膜の力学挙動の X 線的研究", *材料*, **49-1**, (2000-1), pp. 117-122.
- (6) 町屋修太郎, 鈴木賢治, 田中啓介, 坂井田喜久, "プラズマ溶射された TBC 膜の X 線的研究", 第 35 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, (1999), p. 132.
- (7) X 線材料強度部門委員会, "X 線応力測定標準—セラミックス編—", 日本材料学会, (2000), p. 77.
- (8) Scardi, P., Leoni, M., Bertini, L. and Bertamini, L., "Residual Stress in Partially-Stabilized-Zirconia TBCs: Experimental Measurement and Modeling", *Surface and Coatings Technology*, **94-95**, (1997), pp. 82-88.