プラズマ溶射皮膜の残留応力測定に関する研究*

納富 啓**, 児玉 克**, 小野豊明***, 井上好章**, 川野正和****, 谷 昇****

Study on Residual Stress Measurement on Plasma Sprayed Coatings*

by Akira Noutomi**, Masaru Kodama**, Toyoaki Ono***

Yoshiaki Inoue**, Masakazu Kawano****, Noboru Tani****

In order to measure residual stresses in plasma sprayed coatings (Ni-Cr alloy, ZrO_2 -20% Y_2O_3), the authors measured at first X-ray stress coefficient K and Young's modulus E of the coating material and then investigated the effect of plasma spraying conditions on the residual stresses by X-ray diffraction method.

The stress relaxation method with a strain gauge was used also to measure stress values for comparison with the values measured by X-ray diffraction method.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) X-ray stress coefficient K and Young's modulus E of coatings are very small in comparison with those of bulk materials.
- 2) The tensile residual stress values on the Ni-Cr coatings measured by the stress relaxation method are about 30% higher than those measured by X-ray diffraction method.
- 3) The residual stresses on the Ni-Cr coatings are affected neither by coating thickness nor by spraying distance, but are tend to decrease as the temperature of the base metal rises.
- 4) No residual stresses on the ZrO_2 -20% Y_2O_3 coatings are recognized.

Key Words: Plasma spraying, Residual stress, X-ray diffraction, Stress relief method, Youngs' modulus, X-ray stress coefficient

1. 緒 言

溶射技術は、各種の溶射材料を構成部材の表面に被覆させることにより、その部材に優れた機能（遮熱、耐食、耐摩耗など）をもたせることのできる有力な手段である。溶射材料としては、従来金属材料が用いられてきたが、近年ではセラミックスも注目され、各種機器にその適用が進められている。各種機器の性能を溶射によって向上させる場合、皮膜の耐久性が重要視されるが、耐久性に大きな影響を及ぼす残留応力の研究は少ないようである。

溶射皮膜のような薄い層の残留応力を測定するには、非破壊的測定法である X 線応力測定法は有効である¹⁾とされている。しかしながら、X 線法は溶射皮膜のごく表面層の応力を測定しているため、測定値は皮膜の表面状態に影響される。それゆえに、X 線法による測定値の妥当性を検証するためには、機械的測定法の一つである弛緩法（応力解放法）による応力値と X 線法によるそれとを比較検討することも、重要な課題であると考えられる。

また、いずれの測定法においても、応力測定値の評価に必要な溶射皮膜に関する弾性係数のデータは乏しいのが現状である²⁾。したがって、残留応力の測定に先立ちまず溶射皮膜の弾性係数を計測する必要性が生じた。

本報は、高温で使用される溶射皮膜の耐久性を向上させる研究の一環であり、被測定材料として、Ni-Cr 系合

金および部分安定化ジルコニア溶射皮膜を用いた。測定方法は、さきに述べたように、X 線法および弛緩法を採用した。その測定項目は次の通りである。

- (1) 残留応力の測定値の評価に必要な溶射皮膜の弾性係数（X 線応力係数および縦弾性係数）を測定し、
- (2) 残留応力に及ぼす溶射条件（膜厚、溶射距離、母材温度）の影響を X 線法により検討した。さらに、
- (3) 代表的な溶射条件に対して弛緩法により溶射皮膜の残留応力を測定し、X 線法の測定値と比較検討した。

2. 溶射皮膜の弾性係数

2.1 試験片

溶射皮膜の弾性係数を測定するため、皮膜のみを母材からはく離させた膜厚 0.6 mm の板状試験片を作成した。

その作成手順³⁾は、まず、はんだを被覆した炭素鋼板 (5 t × 10 w × 110 l mm) を母材とし、0.7 mm の厚さの溶射被膜を形成した。その後、はんだ層を溶融させ、皮膜のみを取り出し、膜厚差が 0.1 mm 以下となるように研磨した。

Table 1 にプラズマ溶射の条件を示す。溶射材料として 50% Ni-50% Cr 合金 (50 Ni-50 Cr と略記)、80% Ni-20% Cr 合金 (80 Ni-20 Cr と略記) および ZrO_2 -20% Y_2O_3 セラミックス (YSZ と略記) の粉末材料を用いた。なお、数字は重量%を示す。

2.2 X 線応力係数の測定

X 線応力測定法では、結晶格子面間隔の弾性ひずみを計測している。それゆえに、ひずみから応力に換算するときに用いる弾性係数は機械的に測定されたそれとは必ずしも一致しない場合がある。したがって、X 線的に弾性係数を求めておく必要がある。X 線法の応力算出式は次式⁴⁾で与えられる。

*原稿受付 昭和63年3月9日 昭和63年度秋季全国大会論文発表講演

**正 員 三菱重工業(株)長崎研究所 Member, Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

*** 三菱重工業(株)長崎研究所 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

**** 長崎総合科学大学 Nagasaki Institute of Applied Science.

Table 1 Conditions of plasma spraying for measurement of elastic modulus

Material	Powder size (μm)	Current (A)	Distance (mm)	Plasma gas (l/min)	Carrier gas (l/min)
50Ni-50Cr	25 104	800	150	Ar (50) He (23)	Ar (5)
80Ni-20Cr	44 104	800	150	Ar (50) He (23)	Ar (5)
ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃	10 44	850	100	Ar (50) He (23)	Ar (9)

$$\sigma = K \cdot M \quad \cdots (1)$$

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \cot \theta_0 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \cdots (2)$$

$$M = \partial^2 \theta \psi / \partial \sin^2 \psi \quad \cdots (3)$$

$$\psi = 90 - \theta_0 + \psi_0 \quad \cdots (4)$$

ここに、 σ は応力、 K はX線応力係数、 M は $2\theta\psi - \sin^2 \psi$ 線図のこう配、 ψ は試料面法線と回折面法線とのなす角度、 $E/(1+\nu)$ はX線の弾性係数、 θ_0 は無ひずみ時の回折角、 $2\theta\psi$ は測定される回折角、 ψ_0 はX線入射角、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比である。

X線応力係数 K は、既知の負荷応力 σ_M を段階的に変化させ、そのときの M を計測すれば、式(1)を変形して、

$$K = \sigma_M / M \quad \cdots (5)$$

から求めることができる。 σ_M は Fig. 1 に示す4点曲げ法により負荷し、次式により算出した。

$$\sigma_M = Pl/Z \quad \cdots (6)$$

ここに、 P は負荷荷重、 l は支点～荷重点間距離 (30 mm)、 Z は断面係数である。試験片は研磨によるひずみを除去するために、Ni-Cr 系溶射皮膜では電解研磨を施

Fig. 1 Equipment for measurement of X-ray stress coefficient

した。なお、 K の測定方法の妥当性を検証するために、板厚 0.7 mm の SUS 304 について、 K を測定した。その結果、 K は実験誤差範囲内で文献値⁵⁾と一致していた。したがって、 K の測定方法には問題ないと判断した。

X線法による応力測定の測定条件を決定する場合、特性X線と回折面の組合せは重要である⁴⁾。応力測定を精度よく行なうにはできるだけ高角度側に鋭い回折線が見られるような特性X線および回折面を選べばよい。そこでX線源に通常の鉄鋼材料の測定に用いられているCrターゲットを用い、 $2\theta = 120^\circ \sim 165^\circ$ の走査範囲におけるX線回折図形を調べた。その結果を Fig. 2(a)~(c)に示す。いずれの図も、上段は溶射前の粉末試料、下段は溶射後の皮膜から得られた図形である。図より、Ni-Cr 系合金では $\text{CrK}\beta$ 線による $\{311\}$ 面、YSZ では $\text{CrK}\alpha$

Fig. 2 X-ray diffraction profile

Table 2 Conditions of X-ray strain measurement

Apparatus	TOSHIBA MDP-112G		
Method	Parallel-beam, $\sin^2\psi$, Iso-inclination		
Material	50Ni-50Cr	80Ni-20Cr	ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃
Target	Cr		
Filter	—	—	V
Crystal structure	FCC	FCC	Cubic
Diffraction plane	{311}	{311}	{331}
Bragg's angle $2\theta_0$	147.80°	153.44°	151.52°
Tube voltage	30 kVp		
Tube current	8 mA		
Incident angle ψ_0	0° (twice), 15°, 30°, 40° (twice)		
Irradiated area	2×10mm ²		
Scanning speed	2°/min		
Time constant	2 sec

(a) Ni-Cr

(b) ZrO₂-20Y₂O₃

Fig. 3 M versus applied stress of plasma sprayed coating for measurement of X-ray stress coefficient (K)

線による {331} 面が応力測定に適していることがわかる。溶射前後の回折線の形状を比較すると、溶射後では、回折線の強度は低下し、その幅は広がっている。

K の測定条件を Table 2 に示す。K は式(5)で与えられるが、式中の M を定めるには式(4)に示す無ひずみ時の回折角 θ_0 を求めておかねばならない。本報では、溶射前の粉末試料を用い、 $\psi_0=0^\circ\sim40^\circ$ (6点)における $2\theta\psi$ の平均値を $2\theta_0$ とした。 $2\theta_0$ の標準偏差は、いずれの材料とも 0.05° 以下であった。この値は測定誤差とみなされ、粉末試料は無ひずみ状態にあると判断した。なお、各材料の $2\theta_0$ は Table 2 に示している。

K の測定結果を Fig. 3(a), (b) に示す。図 (a) は Ni-Cr 系、図 (b) は YSZ 溶射皮膜の σ_M -M 線図である。いずれの図とも M と σ_M はよい直線関係にあり、この線図のこう配の逆数から K が求まる。

2.3 縦弾性係数の測定

溶射皮膜の縦弾性係数 E は、3点曲げ試験法により皮膜の荷重-たわみ線図を求め、次式により E に換算した。

$$E = Pl^3 / (48 \delta I) \quad \dots\dots(7)$$

ここに、P は負荷荷重、l はスパン (80 mm)、 δ はスパン中央のたわみ量、I は断面二次モーメントである。

Fig. 4 に、Ni-Cr 系合金および YSZ 溶射皮膜の荷重-たわみ線図を示す。荷重は 0.098 N {10 gf} づつ負荷し、弾性範囲内で荷重-たわみ線図を求めた。 δ は、試験片中央の変位を試験片から 200 mm 離れた位置で読み取り顕微鏡により測定した。

溶射皮膜の E を、図中に示す。これらの値は、バルク材^{6,7)} に比べ非常に小さいが、この点に関しては、4.1 で考察する。

Fig. 4 Load-deflection behavior in bending with plasma sprayed coating for measurement of Young's modulus (E)

3. 溶射皮膜の残留応力

3.1 試験片

残留応力の測定には、Fig. 5 に示す円筒状試験片を用いた。母材は、炭素鋼 (STPG 35) およびオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 304) とした。プラスト処理後、溶射皮膜は、母材を回転させながら、その中央部の 100 mm の範囲に形成させた。このときの溶射条件は Table 1 と同じであるが、残留応力に及ぼす溶射条件の影響を検討するために、膜厚、溶射距離および溶射中の母材温度を変化させた。その条件を Table 3 に示す。

母材温度は試験片の中央部にスポット溶接した熱電対で検出し、試験片をガス加熱または強制空冷することにより、設定温度に対して $\pm 5\%$ 以内で制御した。

3.2 X 線法による残留応力の測定方法およびその結果

X 線法を用いて、溶射皮膜表面の軸方向残留応力 (σ_L) および円周方向残留応力 (σ_T) を測定した。測定位置は Fig. 5 に示す試験片の中央である。測定条件は Table 2 と同一であり、X 線応力係数は 2.2 で測定した値を用いた。なお、残留応力は溶射したままの状態で測定し、電解研磨などの表面処理は行っていない。

Fig. 6(a), (b) は残留応力に及ぼす膜厚の影響について調べたものである。図 (a) に Ni-Cr 系合金、図 (b) に YSZ の結果をまとめた。図中のプロットに記入した記号 I は測定値の 68.3% 信頼限界である。

Ni-Cr 系合金では、溶射皮膜の表面に 100~160 MPa 程度の引張残留応力が生じており、膜厚の増加とともに、残留応力はわずかに減少する。この傾向は、本実験条件の範囲内では溶射材料と母材の組合せが異なっても変わらないことがわかる。また、測定方向による残留応力値の差はほとんどなく、 $\sigma_L \approx \sigma_T$ である。

一方、YSZ 溶射皮膜の残留応力は、母材が炭素鋼、SUS 304 のいずれであってもほぼ 0 であり、膜厚の影響は認められない。

Fig. 5 Specimen for residual stress measurement

Table 3 Parameters of plasma spraying condition for measurement of residual stress

Parameter	Condition
Base metal	Mild steel, SUS304
Spraying distance	100, 150, 200 mm
Sprayed thickness	0.2, 0.4, 0.8, 1.6 mm
Base metal temperature	100, 300, 500 °C

Fig. 7 は残留応力に及ぼす溶射距離の影響を 50 Ni-50 Cr について調べた結果である。図より溶射距離を 100 ~ 200 mm の範囲で変化させても、残留応力には顕著な変化が認められないことがわかる。

Fig. 8 は母材温度の影響を示したものである。残留応力は、母材温度が 100°C から 500°C に上昇するにしたがって低下し、この傾向は、母材が SUS 304 の場合に著しい。また、各温度における応力値は、SUS 304 の場合のほうが炭素鋼の場合よりも低い。

3.3 弛緩法による残留応力の測定方法およびその結果

X 線法による溶射皮膜の残留応力を測定した後、同一の試験片を用いて弛緩法により残留応力を測定した。Fig. 9 に示す手順で残留応力を解放した。

ひずみ変化量は、各段階 (I ~ IV) ごとに測定し、次

(a) Ni-Cr

(b) ZrO₂-20Y₂O₃

Fig. 6 Effect of sprayed thickness on residual stress

Fig. 7 Effect of spraying distance on residual stress

Fig. 8 Effect of base metal temperature on residual stress

式により残留応力に換算した。

$$\sigma_L = -E(\epsilon_L + \nu\epsilon_T)/(1-\nu^2) \quad \dots\dots(8)$$

$$\sigma_T = -E(\epsilon_T + \nu\epsilon_L)/(1-\nu^2)$$

ここで縦弾性係数 E は、2.3 で測定した値を用い、ポアソン比 ν は、バルク材に近いものと仮定して、Ni-Cr 系合金、YSZ の両者とも 0.3 とした。

Fig. 10 に、各段階において解放された応力を示す。なお、これらの値は、その段階までのひずみ変化量の累積値から求めたものである。図より、50 Ni-50 Cr の場合、段階 I では、軸方向の応力変化が大きいことがわかる。また、段階 II から III においては（母材を溶射皮膜の界面

Fig. 9 Process of stress relief of plasma sprayed coating

Fig. 10 Stress measured by stress relief method

まで取り除く), σ_L , σ_T とも約 50 MPa 大きくなることかわかる。段階 IV における溶射皮膜の残留応力値は、円周方向で約 180 MPa, 軸方向で約 160 MPa で、3.1 の X 線法で測定した値より大で、約 1.3 倍である。

一方、YSZ 溶射皮膜の残留応力の変化は、各段階において認められず、応力値は X 線法と同様にほぼ 0 である。

4. 考 察

4.1 弾性係数

本実験結果で得られた弾性係数とバルク材のそれ⁵⁻⁸⁾を比較すると Table 4 のようになる。ただし、X線法の場合、実測した K から式(2)および Table 2 に示した θ_0 を用いて、 $E/(1+\nu)$ で整理した。なお、Ni-Cr 系合金のバルク材の $E/(1+\nu)$ は不明であったので、溶射皮膜が同じ結晶構造であり、測定条件も同じであるオーステナイト系ステンレス鋼の値⁵⁾を用いて比較した。

表から明らかなように、機械的に測定された溶射皮膜の E はバルク材のそれの1/4~1/18であり、とくに Y-SZ において E の低下が著しい。一方、X線の弾性係数 $E/(1+\nu)$ も E の場合と同様に低下するが、その程度はいずれの材料とも、機械的測定に比べて大きくない。

弾性係数は応力とひずみの比であるから、溶射皮膜の機械的に測定された縦弾性係数が大きく低下したことは、一定の応力に対してバルク材よりも大きなひずみが生じることを意味している。その一因として、溶射皮膜は、溶射粒子がたい積して形成されるため、粒子間には気孔や酸化物が含まれており、そこでは粒子内部よりも外力に対する変形が大きいことが考えられる。

一方、X線法で測定した弾性係数は機械的に測定されたそれよりも、低下の程度が小さい。その理由は、X線法では、おもに溶射粒子内部のひずみを計測しているため、外力に対してひずみの大きく出る粒子間のひずみは計測されにくかったことが考えられる。この考え方を裏づける例として、YSZ の場合があげられる。すなわち、YSZ には 4.2 で後述するように微細な割れが観察されており、このような割れを含む材料の E_C/E_B は、他の材料のそれよりも著しく小さい値となっている。

このように、溶射皮膜の弾性係数はバルク材よりも小

さく、バルク材の弾性係数を用いて残留応力を算出すると、実際よりも大きな値を評価することになる。したがって、残留応力の計測に当っては、溶射皮膜の弾性係数もあわせて測定することが必要である。

4.2 残留応力

溶射粒子は、熔融状態で母材に衝突して付着し、皮膜を形成するが、母材に熱を奪われ、冷却される。この冷却によって生じる溶射皮膜の収縮は、母材によって拘束され、溶射皮膜に熱応力が生じ、これが残留応力となる。この熱応力が生じはじめる温度を T_C とし、残留応力に及ぼす影響因子の解釈を簡単にするため、次のように仮定する。

(1) 溶射皮膜の縦弾性係数および線膨張係数は、温度に依存するが、 T_C から室温 T_0 までの間で一定として、それぞれ E_C , α_C とする。

(2) 溶射層は、溶射粒子のたい積によって形成されるが、ここでは、溶射皮膜は一度に溶射されたものとする。

(3) 熱応力は、平面熱ひずみ問題で近似できる。

以上の仮定をおけば、円筒の端から十分離れた位置での残留応力 σ_R は、軸方向と円筒方向で等しく次式で表される。

$$\sigma_R = \frac{E_C E_M A_M}{(E_C A_C + E_M A_M)(1-\nu)} \{ \alpha_C (T_C - T_0) - \alpha_M (T_M - T_0) \} \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 T_M は溶射皮膜が T_C になった時の母材の平均温度、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比、 α は線膨張係数、 A は断面積、添字 C は溶射皮膜、 M は母材を表す。

この式(9)と Ni-Cr 系溶射皮膜における残留応力の実測値の傾向を比較すると、次の通りである。

式(9)右辺大括弧内に着目すると、 α および T の値いかなんでは、 σ_R は、引張りにも圧縮にもなりうる。そこで参考のために、 α の値を Table 5 に示す⁹⁾。本報で用いた材料では Table 5 から $\alpha_M > \alpha_C$ であるので、これは式(9)より圧縮応力側の要因である。しかしながら、 T_C は T_M よりかなり高温であると推察され、Fig. 6 (a) に示したように溶射皮膜には引張りの残留応力が生じたものと考えられる。

また、Fig. 6(a) は溶射皮膜の厚さが厚くなると残留応力は、僅かに低下する傾向にあるが、式(9)からもこの傾向になることがいえる。すなわち、式(9)において、 T_M は本実験の範囲では変わらないと考え、 A_C だけが変わる場合を考えると、 A_C が大きくなるほど残留応力が小さくなることがわかる。

Fig. 8 において、母材温度が高いほど残留応力が低下し、この低下の程度は母材が炭素鋼の場合に比べ、SUS 304 の場合の方が大きいという傾向を示しているが、この傾向も式(9)から説明できる。すなわち、式(9)より T_M が大きくなるほど残留応力は小さく、かつ、 α_M が大きくなるほどその傾向が顕著になることがわかる。 α_M は Table 5 に示すように、SUS 304 の場合の方が大きいので、SUS 304 の場合の低下が著しいという実験結果の傾向とよく合っている。

一方、YSZ 溶射皮膜の場合、残留応力は、Fig. 6(b)、Fig. 10 で示したようにX線法および弛緩法によってほとんど認められなかった。この原因を考えるために、YSZ 溶射皮膜表面の SEM 観察を行なってみると、

Table 4 Comparison between elastic modulus of plasma sprayed coatings and bulk materials

Material	E_C (GPa)	E_B (GPa)	$\frac{E_C}{E_B}$	$\frac{E/(1+\nu)_C}{E/(1+\nu)_B}$ (GPa)	$\frac{E/(1+\nu)_C}{E/(1+\nu)_B}$
50Ni-50Cr	48	200 ⁵⁾	$\frac{1}{4.2}$	80	$\frac{1}{1.9}$
80Ni-20Cr	42		$\frac{1}{4.8}$	118	$\frac{1}{1.3}$
ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃	10	180 ⁸⁾	$\frac{1}{18}$	76	$\frac{1}{2.0}$

Subscript c: sprayed coating, B: bulk material

Table 5 Thermal expansion coefficients of base metals and plasma sprayed coatings

Material		$\alpha: R.T. \sim 500^\circ C$ ($^\circ C^{-1}$)
Base metal	Mild steel	14.1×10^{-6}
	SUS304	18.1×10^{-6}
Sprayed coating	50Ni-50Cr	10.0×10^{-6}
	80Ni-20Cr	13.4×10^{-6}
	ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃	9.6×10^{-6}

Fig. 11 SEM photograph of plasma sprayed coating ($\text{ZrO}_2\text{-}20\text{Y}_2\text{O}_3$)

Fig. 11 に示すように粒子内には微細な割れが認められた。このことが、残留応力が検出されなかった原因の一つであると思われる。ただし、この現象が他のセラミック系溶射皮膜についても必ず生じるとはいえず、セラミック系の溶射皮膜の残留応力が常に0を意味するものではない。

最後に、残留応力値の測定方法による相違について考察する。Fig. 10 に示したように、50 Ni-50 Cr 溶射皮膜のX線法による残留応力値と、弛緩法によるそれとに1.3倍程度の差があった。この原因の一つとして、X線法は、表面からX線侵入深さ(30~50 μm)までの微視的な格子ひずみを測定しているのに対し、弛緩法は巨視的で膜厚の平均的ひずみ変化を測定しており、測定されたひずみ領域の違いがあげられる。また、溶射皮膜の表面粗さは大きく、X線法で測定される応力値の中には、残留応力が低いと考えられる凸部の応力も含まれているので¹⁰⁾、これは、X線法による測定値が弛緩法によるそれよりも低くなる要因である。一方、YSZの場合、弛緩法による残留応力値は0であり、この場合にはX線法でも0であった。

以上のことにより、測定方法の特性を考慮すれば、それらの測定値は、いずれの方法とも妥当なものであると判断される。したがって、X線法による残留応力測定は、溶射皮膜に関する耐久性を非破壊的に評価する手段として有効であると考えられる。

5. 結 言

Ni-Cr 系および $\text{ZrO}_2\text{-}20\text{Y}_2\text{O}_3$ のプラズマ溶射皮膜の残留応力をX線法および弛緩法により測定した。測定値は、いずれの方法とも妥当なものであると判断された。得られた主な結果は、下記の通りである。

(1) 溶射皮膜の機械的に測定された縦弾性係数は、Ni-Cr 系では、バルク材の約1/4、 $\text{ZrO}_2\text{-}20\text{Y}_2\text{O}_3$ では約1/18であった。一方、X線の弾性係数は、いずれの材料でもバルク材の約1/2であった。したがって、残留応力を評価する場合には、いずれの測定法においても弾性係数を調べておく必要がある。

(2) Ni-Cr 系の溶射皮膜の残留応力は、X線法および弛緩法ともに引張の残留応力が認められた。ただし、弛緩法により測定した残留応力値は、X線法のそれの約1.3倍であった。

(3) $\text{ZrO}_2\text{-}20\text{Y}_2\text{O}_3$ 溶射皮膜の残留応力は、X線法および弛緩法のどちらの測定法においてもほとんど認められなかった。

(4) 残留応力に及ぼす膜厚、溶射距離の影響は、本試験条件の範囲内では、ほとんど認められなかった。これに対して、母材温度を高くすると、引張残留応力の低下が認められ、特に SUS 304 母材でこの傾向が著しかった。

参 考 文 献

- 1) 蒲地一嘉, 谷昇, 石田毅, 植野軍二: X線回折法による溶射部材の研究, 日本溶射協会誌, 21-3 (1984. 12), p.849~854
- 2) H. E. Eaton, R. C. Novak: A Study of the Effect of Variations in Parameters on the Strength and Modulus of Plasma Sprayed Zirconia, Surface and Coating Technologies, 27 (1986), p.257~267
- 3) 蓮井淳, 北原繁: プラズマジェット溶射皮膜における残留応力について—プラズマジェットの材料加工への応用に関する研究(第6報)—, 金属材料技術研究所研究報告11-1 (1968), p.79~88
- 4) 日本材料学会編: X線応力測定法, 養賢堂 (1981), p.54~83
- 5) 日本材料学会編: X線応力測定法標準 (1982)
- 6) Samuel, L. Huyl: Metals and Alloys Data Book, Reinhold Publishing Co.(1952), p.428
- 7) 窯業協会編: セラミックスの機械的性質, 技報堂 (1984), p.25~47
- 8) 田中啓介, 栗村隆之, 秋庭義明: 部分安定化ジルコニア研削加工面のX線残留応力測定, 日本材料学会第24回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p.214~218 (1987)
- 9) 日本機械学会編: 伝熱工学資料 (1986)
- 10) 本山盛太郎, 榎並豊一郎, 堀沢寛, 加藤紀久雄: X線残留応力測定に及ぼす試料表面の影響, 材料学会, 12-123 (1963), p.882~888