単軸圧縮負荷下におけるプラズマ溶射遮熱皮膜の応力-ひずみ応答*

脇 裕之^{*1}, 小倉 敬二^{*1}, 西川 出^{*1}Stress-Strain Response of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings
under Uni-Axial Compressive LoadingHiroyuki WAKI^{*2}, Keiji OGURA and Izuru NISHIKAWA^{*2} Department of Systems and Human Science, Osaka University,
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, Osaka, 560-8531 Japan

Mechanical properties and cyclic stress-strain behavior of thermal barrier coatings under uniaxial compressive loading were examined. Specimens of plasma-sprayed ZrO_2 -8% Y_2O_3 , Al_2O_3 , CoNiCrAlY and NiCr were fabricated to test the coating materials independent of the substrate. Stress-strain response was measured using the laser speckle strain/displacement gauge (SSDG). The coatings showed a nonlinear stress-strain response with a considerably lower elastic modulus compared with that of the bulk material. The nonlinearity of the stress-strain response was less significant when the coating contained less microscopic defects and pores. In the case of the coating with many defects, the compliance was found to decrease after the coating underwent a compressive stress and the compliance was also found to decrease with increasing the number of compressive stress cycles.

Key Words: Fatigue, Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings, Nonlinear Stress-Strain Response, Uni-Axial Compressive Loading, Compliance, Elastic Modulus, Laser Speckle Strain Gauge

1 緒 言

高温環境下で基材金属の温度を低下させる遮熱皮膜 (Thermal Barrier Coating) としてのセラミックス溶射皮膜処理は有効な方法である。この遮熱皮膜はプラズマ溶射により作製されるのが一般的である。プラズマによって半熔融状態になった粒子が高速で飛行し、基材あるいは既に積層された皮膜上に衝突して扁平化され、冷却、凝固、積層されて溶射皮膜が形成される。遮熱コーティングを施した金属材料の強度評価を行う際、溶射皮膜自身の機械的特性を明らかにすることは極めて重要である。しかしこれまでのセラミックス溶射材に関する研究は被覆した部材としての強度を測定、検討したものがほとんどであり、溶射皮膜自体の機械的特性に関する報告^{(1)~(6)}は数少ない。これらの研究は溶射皮膜のヤング率を複合はりとして仮定して基材と一体化したまま測定されたもの⁽¹⁾、溶射皮膜を基材から分離した場合でもチャッキング等の問題のため厚膜 (約1~3mm) の曲げ試験^{(2)~(4)}あるいは引張圧縮試験^{(5)~(6)}に

よって測定されたものであった。

本研究は、遮熱コーティングを施した金属材料の高温疲労強度を明らかにする研究^{(7)~(8)}の一環として、セラミックスコーティングとして用いられる ZrO_2 -8% Y_2O_3 , Al_2O_3 溶射皮膜およびボンドコーティングとして用いられる CoNiCrAlY , NiCr 溶射皮膜について、標点部の基材のみを溶融除去することにより作製する試験片を用いて、実機で用いられているオーダーの膜厚での機械的特性を調べることとした。なお遮熱コーティングを施された部材が加熱される際、遮熱皮膜は基材より高い温度にさらされており、皮膜は基材から圧縮の拘束力を被ることが知られているので⁽⁶⁾、本研究では主として圧縮負荷に対する機械的特性を調べることとした。

2 実験方法

2・1 供試材および試験片 セラミックスコーティングとして用いられる ZrO_2 -8% Y_2O_3 , Al_2O_3 溶射皮膜およびボンドコーティングとして用いられる NiCr , CoNiCrAlY 溶射皮膜それぞれの皮膜単独試験片を作製した。試験片はステンレスネジエンドで標点部が円筒状の単軸試験片とした。試験片の作製手順を図1に示す。まず図1(a)に示す様に炭素鋼中空円筒の両端にネ

* 原稿受付 2001年11月2日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科(〒560-8531 豊中市待兼山町1-3)。

E-mail: waki@me.es.osaka-u.ac.jp

ジを有するステンレス鋼円錐治具を圧入して、試験片基礎部を作製する。次に図 1(b)に示す様に、この試験片基礎部の中央（試験部）に、アルミナグリッド (WA#24) でブラスト処理後、皮膜を溶射する。最後に化学研磨溶液 ($\text{HNO}_3\text{:H}_2\text{O}=1\text{:}1$) で炭素鋼円筒のみを溶融除去することにより、図 1(c)に示す様なネジエンドを有する溶射皮膜試験片を得た。膜厚は $300\text{ }\mu\text{m}$ とした。なお Fig.1(c)において皮膜平行部両端でステンレス治具と皮膜が一体になっているため、皮膜は半径方向への自由変形が拘束されているが、試験片平行部長さ 5mm に対して膜厚 0.3mm でありひずみ計測部（平行部中央）でのその影響は小さいと考えられる。またこの様な肉厚が薄く長い円筒を圧縮する場合座屈が懸念されるが、オイラーの公式より求めた座屈荷重は試験荷重より十分大きいことを確認している。溶射は大気雰囲気中溶射 (APS) としたが、CoNiCrAlY について

Fig.1 Shape and dimensions of the specimen used in this study: (a) steel tube with stainless steel ends before spraying, (b) as sprayed, (c) after dissolve out the carbon steel tube

Table 1 Plasma-spraying powders

	ZrO ₂ -8% Y ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CoNiCrAlY	NiCr
Chemical composition (mass%)	ZrO ₂ , 8% Y ₂ O ₃	98% Al ₂ O ₃	Co, 32% Ni, 21% Cr, 8% Al, 0.5% Y	Ni, 20% Cr
Powder size (μm)	45~75	15~45	5~37	45~106

Table 2 Plasma-spraying conditions

		APS Metal alloy coating	APS Ceramics coating	LPPS Metal alloy coating
Pressure (MPa)		0.1	0.1	0.013
Arc current (A)		500	850	500
Arc voltage (V)		60	35	60
Arc gas	Ar (MPa)	0.69	0.41	0.69
	He (MPa)	—	0.62	—
	H ₂ (MPa)	0.41	—	0.48
Spraying distance (mm)		150	100	360

は減圧雰囲気中溶射 (LPPS) も行った。使用した溶射粉末を表 1 に、溶射条件を表 2 に示す。

2.2 実験方法 溶射皮膜の単軸応力-ひずみ応答を調べるため単調圧縮負荷試験ならびに繰返し圧縮疲労試験を行った。なお、一部の皮膜については引張負荷試験も行った。試験片の負荷には電気・油圧サーボ疲労試験機 (Servo Pulser, $\pm 2\text{kN}$) を用いた。単調負荷試験での負荷速度は 5MPa/sec とし、繰返し試験では片振り圧縮 (応力比 $R = -\infty$)、繰返し速度 10Hz 、正弦波の荷重制御とした。試験温度は常温および 873K としたが、本報では常温での結果のみを報告し、高温での結果については次報で報告することにする。試験片縦断面の観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。試験中の表面ひずみ計測には、前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 同様に非接触で高精度の微小ひずみ計測が可能であるレーザースペckルゲージ (SSDG, Speckle Strain / Displacement Gauge) を使用した。この際ひずみ計測の標点距離は 1mm とした。実験装置の模式図を図 2 に示す。

Fig.2 Schematic illustration of SSDG system.

3 実験結果および考察

3.1 組織構造 組織構造を調べるため SEM により溶射皮膜の断面観察を行った。金属合金皮膜 (CoNiCrAlY, NiCr) およびセラミックス溶射皮膜 ($\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$, Al_2O_3) の断面の様子をそれぞれ図 3、図 4 に示す。なお、図中での皮膜積層方向は左右方向、負荷方向は上下方向である。まず金属合金皮膜について見ると、大気中で溶射した CoNiCrAlY (APS), NiCr 皮膜は酸化物 (図中で黒く見える部分) を巻き込んだ積層粒子構造となっている。一方、減圧雰囲気中で溶射した CoNiCrAlY (LPPS) 皮膜は酸化物がほとんど見られず欠陥の少ない緻密な組織構造である。次にセラミックス皮膜について見ると、 $\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ 皮膜では大きな線状欠陥が認められるのに対して Al_2O_3 皮膜では比較的欠陥の少ない緻密な組織構造である。

(a) NiCr

(b) CoNiCrAlY(APS)

(c) CoNiCrAlY(LPPS)

Fig.3 Microscopic observation in the longitudinal-section of metal alloy-sprayed coatings

(a) ZrO₂-8%Y₂O₃

(b) Al₂O₃

Fig.4 Microscopic observation in the longitudinal-section of ceramics-sprayed coatings

Fig.5 Relation between pore ratio and average particle size of spraying-powder

これら皮膜の空孔率と溶射粉末の平均粒径との関係を図5に示す。空孔率は吸水率を測定して求めたものである。ただしここで空孔と称するもののほとんどはき裂に似た粒界の間隙を意味している。図5を見ると例えば ZrO₂-8%Y₂O₃ 皮膜の場合、空孔率は約 12%であり非常にポーラスであることが分かる。この値はこれまでに報告されている値⁽²⁾とも同程度である。また同一材料については粉末粒径が大きくなるほど空孔率も大きくなることが報告されている⁽²⁾。粉末粒径が大きいほど扁平粒子どうしの接触面積が小さくなるため凝固時に雰囲気巻き込みが多くなり、欠陥・空孔が増えることが原因と考えられる。また図を見ると CoNiCrAlY(APS)皮膜より CoNiCrAlY(LPPS)皮膜の方が空孔率が小さいことが分かる。このことから減圧溶射によって雰囲気巻き込みが少なく欠陥の少ない緻密な膜が作製されたことが確認できる。これら溶射条件・溶射粉末粒径の相違により上述のような組織構造の違いが生じたものと考えられる。

3・2 圧縮応力-ひずみ応答 ZrO₂-8%Y₂O₃, Al₂O₃ 皮膜および CoNiCrAlY, NiCr 皮膜試験片の常温下における圧縮変形挙動の典型例をそれぞれ図 6(a), (b)に示す。試験片の荷重方法は以下の通りである。まず O から A まで圧縮荷重を負荷し、その後 B まで除荷した。その後 C まで圧縮荷重を負荷し、D まで除荷した。同様の操作を繰返し段階的に荷重を増加させた。ただし図が煩雑になるのを避けるため、A 点の応力は非線形性が小さいと思われる皮膜(Al₂O₃, CoNiCrAlY)に対しては 150MPa とし、非線形性が大きいと思われる皮膜(ZrO₂-8%Y₂O₃, NiCr)に対しては約 50MPa とした。その後の荷重応力 (C, E, G 点での応力) は概ね 50MPa 刻みで増加させた。図より溶射粉末粒径の大きな NiCr, ZrO₂-8%Y₂O₃ 皮膜の非線形性が大きく、粒径の小さな Al₂O₃, CoNiCrAlY(APS) 皮膜では非線形性も小さいことが分かる。また CoNiCrAlY(LPPS)皮膜は、非線形性がほとんど無く、ほぼ弾性変形をするとともに弾性率も CoNiCrAlY(APS)皮膜より大きいことが分かる。

ここで非線形性が大きい NiCr および ZrO₂-8%Y₂O₃ 皮膜について詳細に応力-ひずみ応答を調べてみる。未荷重応力域に初めて荷重を与えた場合の応力-ひずみ曲線を初期荷重線、ゼロ応力に向かって除荷する場合の応力-ひずみ曲線を除荷線、すでに荷重を被った応力域に再び荷重を与える場合の応力-ひずみ曲線を再荷重線と呼ぶことにする。図 6(a)(b)の NiCr および ZrO₂-8%Y₂O₃ 皮膜の結果を見ると初期荷重時には初期荷重線 OA に示す様にほぼ線形な変形挙動を呈するが、除荷した際には同じ線上をたどるわけではなく、より

勾配の大きな除荷線 AB 上をたどり永久ひずみを残す。除荷線 AB の勾配は除荷直後に大きく、除荷とともに小さくなる傾向にある。再負荷時には除荷線 AB 近傍の再負荷線 BC を通り、これまでに受けた最大圧縮応力を超えると初期負荷線 OA の延長上をたどり変形量が大きくなる。その後、段階的に負荷を増加させた際も同様の变形挙動を呈している。すなわち皮膜は応力履歴を記憶しており圧縮負荷を与えることによって永久ひずみが残留するとともに除荷・再負荷時の变形抵抗が増加している様子が分かる。これは Socie⁽⁵⁾⁽⁶⁾らが報告している単軸圧縮負荷に対する非線形応力-ひずみ応答と同様の变形挙動であった。

Fig.6 Compressive stress-strain response of plasma-sprayed coatings at room temperature

3.3 変形機構 上記の変形挙動は一見、弾塑性変形に似ているが初期負荷時において既に除荷時より変形抵抗が小さいことならびに除荷・再負荷線が上に凸

の曲線になることなどから単純な弾性・塑性変形ではないことが分かる。3.1節で述べたように溶射皮膜は多欠陥で多孔な扁平粒子の積層構造であった。また後述するがゼロ応力付近での応力-ひずみ応答の勾配が焼結セラミックスや一般合金のヤング率と比較して非常に小さい（例えば $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 皮膜の場合 1桁小さい）ことから、これら溶射膜の応力-ひずみ挙動を支配するのは扁平粒子自体の変形ではなく、扁平粒子どうしのすべりや扁平粒子間に存在する空孔の収縮が原因と考えられる。Socie⁽⁵⁾⁽⁶⁾らは扁平粒子どうしのすべり、圧密によってこれらの変形挙動を説明している。すなわち(1)空孔の収縮により応力が増加するに従って変形抵抗が大きくなる挙動、(2)すべりにより応力が増加するに従って変形抵抗が小さくなる挙動、主にこの2つのメカニズムが合わさり皮膜の変形挙動が支配されたものと考えられる。初期負荷時には空孔の収縮と粒子のすべりが重畳し、両者の非線形性が打ち消し合うように働き、非線形性が小さくなったものと考えられる。除荷時には一度すべりを起こした粒子の逆方向へのすべり量が小さく、空孔の収縮による変形が支配的となり上に凸の曲線となったと考えられる。再負荷時にも除荷時と同様に空孔の収縮が支配的であるが、これまでに被った最大圧縮応力を超えると再び粒子のすべり量が大きくなり、初期負荷線と連続したものと考えられる。溶射粉末の粒径が小さいほど、また減圧溶射によって緻密な皮膜を作製するほど線状欠陥や空孔が少なくなるためこれらの非線形性が小さくなったものと考えられる。

3.4 コンプライアンス 得られた応力-ひずみ応答のコンプライアンスについて定量的に検討する。初期負荷、除荷、再負荷線の各応力における接線係数 ($M = d\sigma/d\varepsilon$) を図 7(a)~(e)に示す。なお一部の図には引張負荷によって得られたものもあわせて示している。まず全体的な傾向として、NiCr 皮膜の初期負荷線を除いて全ての材料で圧縮応力が増加すると M の値が増加、すなわちコンプライアンス ($C = 1/M$) の値が低下している。これは応力-ひずみ曲線が上に凸の曲線となっていることを意味する。また除荷線において M 値の応力に対する変化が大きく、初期負荷線において変化が少ないことから、3.2節で述べたように初期負荷線の非線形性は小さく、除荷線では上に凸な非線形性が顕著であることが確認できる。

次に、NiCr 皮膜の初期負荷線のみ他と傾向が異なるので初期負荷線の測定結果を詳細に比較する。 Al_2O_3 , CoNiCrAlY 皮膜では圧縮応力が大きくなると M 値が増加（コンプライアンスが低下）し、 $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ 皮

膜では M 値の変化は少なく、NiCr 皮膜では逆に M 値が減少（コンプライアンスが増加）していることが分かる。溶射粉末粒径が小さく比較的緻密な Al_2O_3 、CoNiCrAlY 皮膜では粒子のすべりが小さく空孔の収縮の方が支配的であり応力-ひずみ応答が上に凸の曲線になったと考えられる。一方、溶射粉末粒径が大きく多欠陥な NiCr 皮膜では粒子のすべりが大きく下に凸

Table 3 Apparent elastic modulus of plasma-sprayed coatings

	ZrO_2 - 8% Y_2O_3	Al_2O_3	CoNiCrAlY (APS)	CoNiCrAlY (LPPS)	NiCr
Elastic Modulus[GPa]	20	40	50	100	50

(c) NiCr

(a) ZrO_2 -8% Y_2O_3

(d) CoNiCrAlY(APS)

(b) Al_2O_3

(e) CoNiCrAlY(LPPS)

Fig.7 Modulus of tangent in stress strain response at each stress

(a) Ratio of unloading to initial loading

(b) Ratio of reloading to initial loading

Fig.8 Permanent change in modulus of tangent at each stress

の曲線になったと考えられる。ZrO₂-8%Y₂O₃皮膜では溶射粉末粒径はNiCr皮膜より小さくAl₂O₃、CoNiCrAlY皮膜より大きい。空孔の収縮、粒子のすべりによる非線形性が同程度となり、これらの非線形性が打ち消し合うように働いたため非線形性が小さくなったものと考えられる。

ここでこれらの絶対値を文献等のヤング率と比較する。ゼロ応力付近の勾配（初期負荷、除荷、再負荷線の平均値）を表3に示す。焼結セラミックスや一般合金のヤング率と比較すると、ZrO₂-8%Y₂O₃、Al₂O₃皮膜の場合10%程度、NiCr、CoNiCrAlY(APS)皮膜の場合25%程度、CoNiCrAlY(LPPS)皮膜の場合50%程度の小さな値となっていることが分かる。また溶射粉末粒径、溶射条件、膜厚が異なるので厳密な比較はできないが、例えばZrO₂-8%Y₂O₃皮膜の場合19~41GPa⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾、Al₂O₃皮膜の場合13~88GPa⁽²⁾⁽⁹⁾、NiCr皮膜の場合42GPa⁽³⁾が厚膜（1~3mm）の曲げ試験によって報告されている。

最後に図7を見ると初期負荷線の M 値と除荷線や再負荷線の M 値が異なっていることから、圧縮負荷を与えることによって M 値したがってまたコンプライアンスが変化していることを確認できる。ここで初期負荷線と除荷線の M 値の比、初期負荷線と再負荷線の M 値の比をそれぞれ図8(a),(b)に示す。図8(a)を見ると初期負荷線と除荷線の M 値比はCoNiCrAlY(APS)、CoNiCrAlY(LPPS)皮膜の場合、応力に依存せずほぼ1に近い値であるが、NiCr、ZrO₂-8%Y₂O₃、Al₂O₃皮膜では圧縮応力が増加するに従って大きな値となっている。特にNiCr皮膜では大きな圧縮応力（-175MPa）が加わると M 値が約3.5倍にもなることが分かる。また図より空孔率の大きい皮膜の方が M 値すなわちコンプライアンス C の変化が大きいことが確認できる。また図8(b)も同様の傾向であるが、図8(a)と比較すると再負荷線と初期負荷線の M 値比は除荷線と初期負荷線のそれより小さな値であり、コンプライアンス C の変化が比較的小さいことが確認できる。

3.5 繰返しひずみ挙動 前節までの結果より、単調圧縮負荷によって溶射皮膜のコンプライアンスが変化することが分かった。溶射膜が繰返し負荷を被る際には除荷、再負荷が繰返されることになるが、繰返しによって除荷線・再負荷線のコンプライアンスも変化することが予想される。そこで圧縮疲労試験を行い、繰返し圧縮負荷による応力-ひずみヒステリシス曲線の変化の様子について調べた。図9はコンプライアンスが変化する場合と変化しない場合の典型例として、ZrO₂-8%Y₂O₃およびCoNiCrAlY(APS)皮膜の応力-ひ

ずみヒステリシス曲線を繰返し数に対して並べたものを示している。ZrO₂-8%Y₂O₃皮膜では繰返しが増加するにしたがって一定の応力幅 $\Delta\sigma$ の下における全ひずみ幅 $\Delta\varepsilon$ が減少し、コンプライアンス($C = \Delta\varepsilon / \Delta\sigma$)が減少している。一方、CoNiCrAlY(APS)皮膜では応

Fig.9 Stress-strain response at each number of cycles

Fig.10 Strain range plotted against number of cycles

Table 4 Ratio of strain change

	ZrO ₂ -8%Y ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CoNiCrAlY (APS)	CoNiCrAlY (LPPS)	NiCr
Cyclic loading [$\times 10^5$ /cycle]	0.82	1.02	1.00	1.06	0.79
Monotonic loading [/cycle]	0.81	0.99	0.91	1.00	0.55

力繰返しに伴うひずみ幅の変化はなく、コンプライアンス変化は認められない。

図 10 は各種溶射膜の全ひずみ幅と繰返し数の関係をまとめて示している。また繰返し後期のひずみを初期ひずみで基準化したもの（これを平均繰返しひずみ変化比と称する）を表 4 に示す。なお、表中には 3・2 節で測定した単調負荷実験において初期負荷時に発生するひずみと除荷・再負荷時に発生するひずみの比（これを単調ひずみ変化比と称する）もあわせて示している。繰返しによるひずみ幅の変化は圧縮応力が大きいほど顕著であると思われるので厳密な比較はできないが、表 4 を見てセラミックス皮膜どうしを比較すると、比較的応力であるにもかかわらず ZrO_2 -8% Y_2O_3 皮膜の方が Al_2O_3 皮膜より平均繰返しひずみ変化比が小さな値となっている。また金属合金皮膜についても同様に比較的応力であるにもかかわらず NiCr 皮膜の方が CoNiCrAlY 皮膜より平均繰返しひずみ変化比が小さな値となっている。表 4 中にあるように ZrO_2 -8% Y_2O_3 および NiCr 皮膜では単調ひずみ変化比も小さな値である。このように繰返し圧縮に対しても単調圧縮の場合と同様に、粒径が大きく多欠陥であるものほどひずみ変化（コンプライアンスの変化）が大きいようである。ただし単位サイクル当たりの平均繰返しひずみ変化比は単調ひずみ変化比よりかなり小さいことから、繰返し圧縮による除荷・再負荷線のコンプライアンスの変化は単調圧縮によるものと比較して影響が小さい。この様な繰返し圧縮によるコンプライアンス低下は、単調ひずみ変化比減少の要因と同様に、繰返しの増加とともに扁平粒子どうしのすべり変形が減少したため生じたと考えられる。

4 結 言

膜厚 300 μ m の単軸溶射皮膜試験片を作製して、 ZrO_2 -8% Y_2O_3 、 Al_2O_3 、CoNiCrAlY および NiCr 溶射皮膜の単調圧縮応力-ひずみ応答ならびに繰返し圧縮応力-ひずみ応答を測定した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 溶射粉末粒径が大きい皮膜では多欠陥で空孔の多い組織構造となり、粒径の小さな皮膜では比較的欠陥が少なく緻密な組織となった。減圧溶射した場合にはさらに酸化物や欠陥が少なく緻密な組織であることを確認した。
- (2) 溶射粉末粒径が大きく比較的欠陥の多い皮膜では、圧縮応力-ひずみ応答が大きな非線形性を呈した。す

なわち圧縮負荷を与えて除荷した際には同じ履歴をたどるわけではなく、より勾配の大きな曲線上をたどり永久ひずみが残留した。除荷線の勾配は除荷直後に大きく、除荷とともに小さくなった。再負荷時には除荷線近傍を通り、これまでに受けた最大圧縮応力を超えると初期負荷線の延長上をたどり変形量が大きくなった。

- (3) 上記 (2) の皮膜では、繰返し圧縮負荷を与えることによってもコンプライアンスが低下することが分かった。ただし単調負荷時のコンプライアンス低下と比較して影響は小さかった。
- (4) 溶射粉末粒径が小さく比較的緻密な組織である皮膜では、応力-ひずみ応答の非線形性は小さかった。
- (5) 上記 (4) の皮膜では、繰返し圧縮にともなうコンプライアンスの変化はほとんど認められなかった。
- (6) 減圧溶射の場合、大気溶射と比較して応力-ひずみ応答の非線形性が小さく、ほぼ弾性変形を呈するとともにその弾性係数も大気溶射と比較して大きかった。
- (7) 溶射皮膜の見かけの弾性係数は焼結セラミックスや一般合金のヤング率と比較すると小さく、 ZrO_2 -8% Y_2O_3 、 Al_2O_3 皮膜の場合 10%程度、NiCr、CoNiCrAlY (APS) 皮膜の場合 25%程度、CoNiCrAlY (LPPS) 皮膜の場合 50%程度の値であった。

最後に、試験片の溶射にご協力いただいた大阪大学接合科学研究所の大森明教授・永山力人氏、実験に協力いただいた当時大阪大学 4 年生の藪内愛智・熊谷知久君に謝意を表す。

文 献

- (1) 鹿島寛士・荒井正行・岩田宇一・佐久間俊雄・井上裕嗣、岸本喜久雄、機構論, 01-1(2001), 279-280.
- (2) Shi, K., Qian, Z. and Zhuang, M., J. Am. Ceram. Soc., 71(1988), 924-929.
- (3) 納富啓・児玉克・小野豊明・井上好章・川野正和・谷昇、溶接学会論文集, 6-3(1988), 341-347.
- (4) 伊藤義康・亀田常治・岡村隆成・永田晃則、材料, 48-7(1999), 740-745.
- (5) Socie, D. F., Rajda, E., Int. Conf. on Materials and Mechanics'97, (1997), 597-601.
- (6) Rejda, E. F., Socie, D. F. and Beardsley, B., Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 20(1997), 1043-1050.
- (7) 脇裕之・西井雅宏・小倉敬二・西川出、機論, 66-648, A(2000), 1520-1525.
- (8) 脇裕之・小倉敬二・西川出・長沼博貴・西井雅宏、機論, 67-659, A(2001), 1148-1154.
- (9) Lutz, E. H., J. Am. Ceram. Soc., 77(1994), 1274-1280.