

大阪大学大学院 正 小倉 敬二 大阪大学大学院 正 西川 出  
大阪大学大学院 学 ○脇 裕之

### 1. 緒言

セラミックス被覆材に関する強度研究は、これまで主に基材にセラミックスを溶射した一体材について行われてきた。皮膜単独の疲労強度研究は数少ないが、E. F. Rejda らは 8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 厚膜溶射材の応力-ひずみ応答と疲労強度について報告している<sup>[1]</sup>。しかし実用的に重要な薄膜材に関する報告は見あたらず、高温疲労負荷下における応力-ひずみ応答に関する報告は皆無である。

そこで本研究では、非接触でひずみ計測可能なレーザスペckル法を用い、アルミナ溶射皮膜およびニッケルクロム合金溶射皮膜の疲労負荷下における応力-ひずみ応答を計測することにより、その疲労メカニズムを検討することとした。

### 2. 試験片と実験方法

本研究で用いた供試材はアルミナセラミックス (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 粉末およびニッケルクロム合金 (Ni-Cr) 粉末である。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Ni-Cr 溶射皮膜のみの機械的特性を評価するために、溶射皮膜単独試験片 (以下膜試験片と称する) を作製した。膜試験片作製の手順を図 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、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒 (98.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1%SiO<sub>2</sub>, 53~15 μm) あるいは Ni-Cr 粒 (80%Ni, 20%Cr, 106~45 μm) をプラズマ溶射した。最後に化学研磨溶液 (HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:1) で炭素鋼円筒を溶解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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Ni-Cr の膜試験片を得た。試験片平行部の膜厚は約 300 μm とした。

圧縮疲労試験は電気・油圧サーボ疲労試験機を用いて、常温下および 873K 下において応力制御、周波数 0.5Hz、正弦波により行った。

膜試験片のひずみ計測には非接触で計測が可能なレーザスペckル法 (SSDG, Speckle Strain-Displacement Gauge) を用いた<sup>[2]</sup>。

### 3. 実験結果および考察

3.1 応力-ひずみ応答 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Ni-Cr 膜試験片の常温下における圧縮変形挙動を図 2 に示す。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜試験片への負荷方法は 0 から A まで圧縮荷重を負荷し、その後 B まで除荷した。さらにその

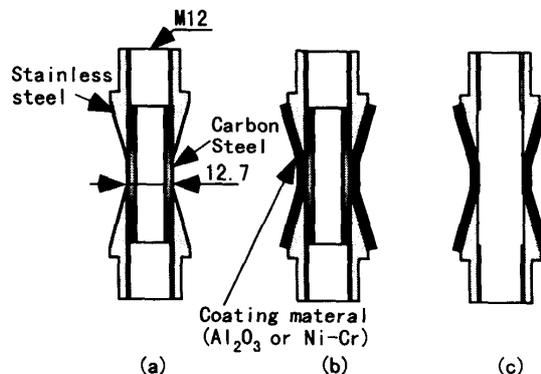


Fig.1 Geometry of a specimen: (a) steel tube with stainless steel ends before splaying, (b) as splayed, (c) after dissolve out the carbon steel shaft.

後 C まで圧縮荷重を負荷した。Ni-Cr 膜試験片への負荷方法は 0 から A まで圧縮荷重を負荷し、その後 B まで除荷した。さらにその後 3 段階に圧縮荷重を増加させ同様の操作を G まで行った。図より Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合、初期負荷線 OA はほぼ線形であり、除荷線 AB では圧縮応力が大きいほど剛性が大きくなっている。また再負荷線 BC はほぼ除荷線 AB を通り、これまでに受けた最大圧縮応力付近を超えると変形量が大きくなり初期負荷線 OA の剛性に近くなっている。Ni-Cr の場合も同様であったが、その非線形度は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> より大きいものであった。これらの非線形挙動は、膜材内で層状に堆積した溶射粒子 (platelet) とそのポーラスな構造により説明できる。以下にこの様な変形挙動について考察する。

platelet の滑りが起こると、変形が大きくなるとともに剛性が小さくなる、一方空孔の圧縮が起こると、変形が大きくなるとともに剛性が増加する。この 2 つのメカニズムが組合わさり、初期負荷時にはほぼ線形な応力-ひずみ曲線となったと考えられる。初期負荷時に滑りを起こした platelet は逆方向には滑らないため、除荷時には空孔の圧縮が変形を支配し圧縮応力が大きいほど剛性が大きくなったと考えられる。再負荷時では、これまでに受けた最大応力を超えると再び platelet が滑り始めるため、その時点から変形量が大きくなったと考えられる。また Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と比較して Ni-Cr の方がその非線形度が大きかったのは Ni-Cr の方が platelet の滑り量が大きかったためと考えられる。

次に弾性係数について検討した。繰返し負荷下に

においては応力-ひずみ曲線は除荷線と再負荷線を通ることになる。そこでみかけの弾性係数を除荷線と再負荷線の平均とし、その挙動について検討した。各応力におけるみかけの弾性係数（その応力前後25MPaの応力-ひずみ曲線から算出したもの）を図3に示す。それぞれの結果は最大4点の平均を取ったものであり、図中には誤差範囲も示してある。 $Al_2O_3 \cdot Ni-Cr$ とも圧縮応力値が増加するとともに、弾性係数が増加している。さらに圧縮応力を増加させれば全ての空孔が閉じたとき、それぞれ焼結アルミナのヤング率 (390GPa)・ニクロム合金のヤング率 (214GPa) に近づくものと考えられる。

### 3. 2 疲労負荷下における応力-ひずみ応答

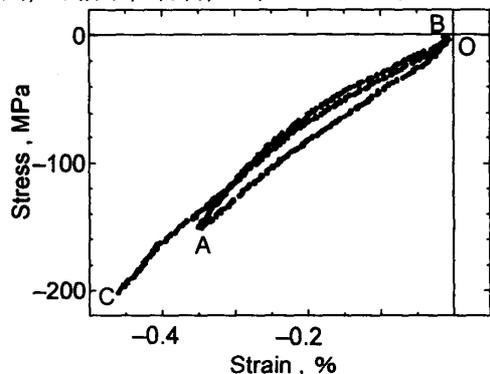
圧縮疲労負荷下における応力-ひずみヒステリシスを計測し、その疲労挙動について検討した。 $Al_2O_3$ の常温および873K下で得られた結果を図4に示す。繰返し数  $N=1$  で大きなヒステリシスを描くが、それ以降では小さなものであった。また両者とも繰返しに伴いヒステリシス幅が減少していく様子が分かる。これは繰返し数が増加するとともに滑りを起こすplatelet数が減少し、負荷時と除荷時の剛性が同じ値になるためと考えられる。

### 4. 結言 略

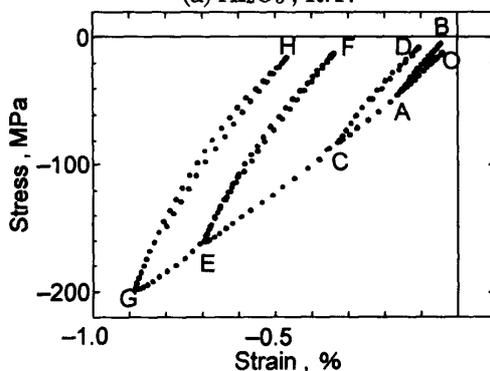
なお、実験を行うに際して藪内愛智君（本学部生）の協力を得た。記して謝意を表します。

### 参考文献

1. E.F.Rejda, D.F.Socie and B.Beardsley, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 20-7, 1043(1997)
2. 西川, 小倉ら, *材料*, 43, 1290(1994)

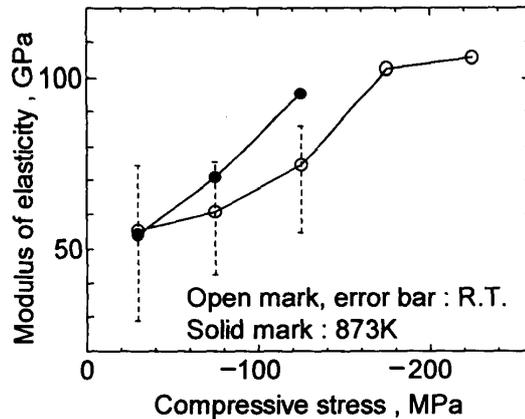


(a)  $Al_2O_3$ , R.T.

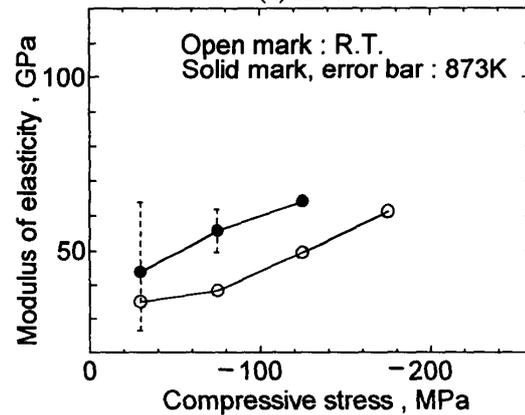


(b) Ni-Cr, R.T.

Fig.2 Stress-strain response.

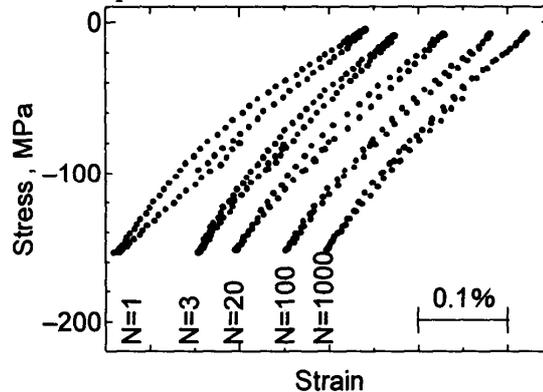


(a)  $Al_2O_3$

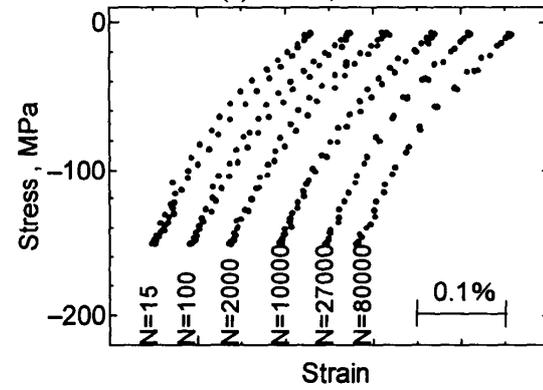


(b) Ni-Cr

Fig.3 Modulus of elasticity plotted against compressive stress.



(a)  $Al_2O_3$ , R.T.



(b)  $Al_2O_3$ , 873K

Fig.4 Stress-strain hysteresis curve against number of cycles.