アルミナ溶射皮膜のキャビテーションエロージョン特性に 及ぼす皮膜構造の影響

Effect of Coating Structure on Cavitation Erosion Characteristics of Alumina Spray Coating

荻野 邦彦*・大森 明**・沖 幸男*・森本 純司*

Kunihiko OGINO, Akira OHMORI, Sachio OKI and Junji MORIMOTO

(Received August 6, 2004)

Thermal spray conditions have important effects on the formation mechanism of a coating lamination. When thermal spray distance or power is changed, there is an increasing chance of defect being generated during coating formation. Thermal spray distance was chosen from each of 80, 100, 150 and 200 mm. The cavitation erosion strength of the sprayed coatings under the above conditions was examined. The evaluation of cavitation erosion of Al_2O_3 coatings was investigated by magnetostrictive cavitation test at a frequency of 20 kHz and at a horn amplitude of $50\mu\text{m}$. Cavitation erosion at the thermal spraying distance case of 200 mm was five times greater than that at the distance of 80 mm. The results of X-ray diffraction showed that $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ tended to disappear when thermal spraying distance was the longest case of 200 mm. This is attributed to the temperature decrease of particles. The following factors are considered as the reason of the above phenomena. When the distance between the substrate and spraying nozzle is long, the flight time of particles becomes longer. During that time, the heat capacity of particle decreases, which in turn reduces the expansion rate and cohesion strength.

Gas hole was made to be an origin, and it seemed to propagate the fracture damage for defects, voids or cracks, etc.

Key Words: Plasma Spraying, Sprayed Distance, Splat Particle Diameter, Splat Particle Area, Cavitation Erosion, Cavitation Fracture Depth

1. 緒言

著者らはこれまで、溶射皮膜のキャビテーションエロージョン特性について種々検討してきた^{1,2,3)}。その結果、溶射皮膜に対する封孔処理ならびに後熱処理によって、キャビテーションエロージョン特性が大きく改善されることが明らかになった。そこで、本研究では溶射皮膜のキャビテーションエロージョン特性に影響を及ぼす因子を明らかにすることを試みた。溶射条件を変化させた皮膜を用いて、皮膜構造、特にスプラット形態と気孔分布に着目して、これらの因子とキャビテーションエロージョン特性の関係を詳細に検討した。

プラズマ溶射中における溶融粒子が受ける加熱、加速あるいは冷却、基材上での衝突、偏平、そして凝固など短時間でのミクロな現象であるために溶射現象は複雑で多くの

要因が包含されており、パラメータとして40以上におよぶと言われている⁴⁾。これらの多くのパラメータのなかで、溶射材料と基材が決まれば溶融粒子の温度および速度に依存されることから一定の大きさの粉末に対して溶融粒子の温度と速度が重要な因子となる。また、プラズマジエット中で加熱、加速された粒子の温度と速度の測定結果によると、プラズマ出力及びプラズマジエット中における粒子の飛行距離(溶射距離)が顕著に影響をおよぼすと言われている^{4,5)}。このような中で基礎的な皮膜構造について実験的あるいは理論的解析の両面から大森、李⁵⁾はACT-JP試験法による皮膜の摩耗機構を、噴射粒子の衝撃により生じる粒子間の亀裂伝播などから検討し、明らかにしている。一方、超音波振動法によるキャビテーション損傷などに対する機械的強度について、定量的な評価はほとんど明らかにされていないのが現状である。

* 近畿大学理工学部機械工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

Faculty of Science and Technology, Kinki University (3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka 577-8502, Japan)

** 大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘11-1)

Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

本研究では、プラズマ溶射距離を変化させ、皮膜構造の異なる試料を作成した。これらの皮膜の構造を、表面ならびに断面のSEM観察、X-線回折等によって検討し、キャビテーションによる損傷特性に及ぼす溶射距離の影響について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 皮膜作成方法

本研究に用いた原料粉末は市販の純度99.8 mass %の電融粉碎アルミナ粉末 (昭和電工, K-11) である。粉末の形状は不定形の角張ったもので、粒子径は5~55 μm で平均粒子径は20 μm であった。その形状をFig. 1に示す。溶射はプラズマダイン社製のPlasmadyne-Mech1装置を用いTable 1に示す条件で行った。本装置では溶射粉末はプラズマガンの内部から、プラズマジェット中に搬送され、溶射粉末はプラズマジェットにより有効に加熱と加速が行われていると考えられる。溶射に際して、プラズマ出力を28 kW一定として、溶射距離を80, 100, 150及び200 mmの4種類に変化させ、基材SS400の $\phi 16$ mmの平面上に300 μm

Fig. 1 SEM photograph showing alumina powders (δ - Al_2O_3).

Table 1 Plasma spraying conditions.

Spraying apparatus	Plasmadyne-Mech 1
Plasma gas	0.42 MPa/cm ²
Auxillary gas	0.42 MPa/cm ²
Powder carrier gas (Ar)	0.56 MPa/cm ²
Hopper setting	1.5 RPM
Spray current	800 A
Plasma power	28 kW
Spray distance	80, 100, 150, 200 mm
Colling air pressure	0.2 MPa

の厚さの Al_2O_3 皮膜を作成した。この時、溶射距離、80 mm, 100 mm, 150 mmでは1パス溶射したのに対し200 mmでは4パス溶射を行った。

2.2 皮膜特性の評価

得られた皮膜は、表面ならびに断面のSEM観察によるスプラット形態の解析、X-線回折による構成相の同定によって評価した。

皮膜表面のスプラット形状の測定は、各々の溶射距離でのSEM写真をイメージスキャナでパソコンに取り込み画像解析用ソフトを用いてスプラット面積を測定した。しかしながらスプラット形態が非常に複雑で境界の判別が困難な場合においては、スプラットの輪郭を手作業で抽出し、抽出されたスプラットの輪郭の上に透明な方眼紙を重ねて、スプラット内部の格子点数を測定し面積を求めた。スプラットの大きさは、この様にして求めた面積と同じ面積をもつ円の直径, d で代表させた^{6,7)}。一方、スプラットの厚さ, δ も、断面のSEM写真から求め、扁平率 d/δ を算出した。

皮膜構成相の同定には、X線回折 (理学電機(株): Rint 200, 40kV, 80mA, $\text{CuK}\alpha$ 線) を用い、皮膜表面から測定した。この時、溶射皮膜表面は機械加工等に伴う種々の応力などの影響を避ける目的で研削加工等は行っていない。

2.3 キャビテーションエロージョン試験

キャビテーション試験は、前報まで^{1,2,3)}と同様、超音波振動試験機、出力: 1.2 kW, 振動振幅: 50 μm 一定として、蒸留水中で行い、60s毎に損傷量を精密電子天秤で秤量し0.6 ksまで行った。

3. 実験結果

3.1 皮膜特性

3.1.1 スプラットの扁平形態

アルミナ皮膜表面の形態の代表例についてFig. 2に示した。Fig. 2 (a) は、溶射距離が80 mmの場合で、扁平粒子のスプラットは非常に複雑で、かつ不規則な形態を示し大きく広がっている。そして (b) 100 mmにおいてもほぼ似たような広がりの形状を示した。しかし (c) 150 mmになると扁平粒子の広がりの形状はやや緩慢となり、半球状あるいは楕円状の形態に変化する傾向が認められた。そしてこの実験で最も溶射距離の大きい (d) 200 mmの場合は、積層粒子全体は、より丸みを帯び、逆に面積はさらに低下する傾向が認められた。個々のスプラットの形状と大きさについて定量的評価を行った⁷⁾結果を、Fig. 3に示した。粒子の平均直径 d と溶射距離の関係はFig. 3(a) のようになる。溶射距離が80mmおよび100 mmにおいては、おおむね d は45~50 μm であった。また溶射距離が150および200 mmになると粒子温度が低下し、このために粘性が高くなり粒子の扁平の割合は小さくなり半球状あるいは半楕円形状の

Fig. 2 SEM micrograph showing surface morphology of plasma-sprayed Al_2O_3 coatings. (a) 80 mm, (b) 100 mm, (c) 150 mm and (d) 200 mm.

Fig. 3 Effect of spray distances on mean diameter of splat particles (a), particle thickness (b), and ratio of d/δ (c).

(a)

(b)

Fig. 4 SEM photographs showing cross-sections of Al_2O_3 coatings at different spray distances of (a) 80 mm and (b) 200 mm.

スプラットが形成され、 d が $35 \sim 40 \mu\text{m}$ と低下したものと考えられる。

次に、アルミナ皮膜断面の代表例について、**Fig. 4**に示した。溶射距離が80 mmの場合 (**Fig. 4(a)**) では、扁平粒子の積層はスプラットの場合と同様に非常に複雑で、より扁平し、かつ不規則な形態を示した。200 mmの場合 **Fig. 4(b)**は、積層扁平粒子全体はより丸みを帯び、前述したように拡がり面積はさらに低下することに伴って、スプラット厚さは増加する傾向が断面構造においても認められた。

溶射距離の変化に伴ってスプラット厚さに違いが認められたことから、個々のスプラット厚さの形状と大きさについて定量的評価を行った⁵⁾。**Fig. 3(b)**に各溶射距離とスプラット厚さの関係を示した。皮膜断面のSEM写真では粒界の識別が困難なために正確な厚さ測定にバラツキが生じる傾向があった。大森らは、アルミナ溶射皮膜中のき裂、粒子間の未結合部などの空隙に電気めっき法を用いて銅を充填することによって、粒子の扁平状態やき裂、未結合部

などの皮膜構造ならびにスプラット厚さを検討している⁵⁾。厳密にはこのような方法で今後検討すべきであるが、ここではこのような処理は行わず、**Fig. 4**に示した写真から測定した。溶射距離80 mmの場合において、皮膜表面で大きな放射状のスプラットが認められたことに対応して、スプラット厚さはおよそ $6.0 \mu\text{m}$ と、小さな値を示した。一方、溶射距離が100から200 mmになるとスプラット厚さは約 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ と顕著に増加する傾向を示した。200 mmでは80 mmの場合の2倍に達するのが認められた。これらの値はほぼ大森、李⁵⁾の結果に近い値であった。

溶射距離の変化に伴う皮膜表面のスプラット形態およびスプラット厚さの違いが認められた。溶着粒子の性質とスプラットの扁平挙動は種々検討されており⁵⁻⁹⁾、本実験におけるスプラットの扁平率 d/l を**Fig. 3(c)**に示す。図より溶射距離の増加に伴い扁平率は大きく低下し、これは粒子温度、速度の低下によるものと考えられる。

3.2 キャビテーション損傷に及ぼす溶射距離の影響

各アルミナ溶射皮膜のキャビテーション試験を、120 s 間隔で0.6 ksまで行い全体の損傷量と溶射距離の関係について**Fig. 5**示した。溶射距離80 mmから150 mmまでの損傷量は0.6 ks後においては、距離とともに増加するが約20 mgとさほど大きな差異は認められない。しかし溶射距離200 mmの場合は0.6 ks後の損傷量は大幅に増加し、溶射距離80～150 mmまでの値に比べ約5倍の100 mgを呈した。溶射距離80 mmの場合では、先に示したスプラット形態の解析結果からも明らかなように、皮膜を構成する粒子はよく扁平し、スプラット境界の結合力が強いと推測される。これが、キャビテーションによる耐損傷抵抗の増大をもたらしたものと考えられる。他方、溶射距離の最も遠い200 mmの場合では、粒子温度の低下のため粒子の扁平率も小さく扁平積層間の結合力が弱まり、損傷量の増大をまねいたものと思われる。また溶射距離が200 mmの場合、距離80 mmに比べ溶着粒子の温度が低く、粒子間の結合率も減少したためであると考えられる⁴⁾。なお、参考のため**Fig. 5**中にクロム酸による封孔処理を施した試験片について併記したが、各溶射距離の未結合部およびクラックへの

Fig. 5 Cumulative erosion loss as a function of spray distance (after 0.6 ks).

Fig. 6 SEM photographs showing cavitation erosion surface morphology after 0.6 kS.

充填により，各溶射皮膜に対して約1/5程度減少の傾向が認められる。

4. 考察

4.1 破壊損傷面の形態

溶射距離の変化によって，キャビテーション試験による損傷量は80 mmと200 mmにおいて顕著な差異を生じた。そこで，この原因を究明するため，キャビテーションによる破壊損傷面についてSEMによる観察を行った。Fig. 6は，溶射距離80 mmの場合について(a)：溶射後の表面，(a')は0.6 ks損傷後を，そして溶射距離200 mmの場合について(b)は溶射後の表面，(b')は0.6 ks損傷後を観察したものである。損傷前の試料表面全体において，Fig. 2でも述べたように(a)の80 mmの場合でのスプラットは大きく偏平し広がった形態が認められる。そして(a')の破壊損傷面において，大きな欠落した表面部分は認められずキャビテーション試験において大きな変化は認められない。

次に溶射距離200 mmの溶射のみの表面，(b)と，0.6 ks後の(b')の場合において，その破壊損傷面中で250 μm $\times$ 350 μm の視野中には直径10～20 μm 程度を示すガス孔が10個ほど存在しているが，これらの部分や，垂直クラックあるいは接合不良等の部位を繰り返しの水撃流によって損傷したものと思われ，そのキャビテーションによる破壊損傷部には，溶射のままの表面が残存した部分，幾分損傷した丘の部分，そして強く損傷した深い谷の部分などが階段状に形成されている。このキャビテーションによる破壊損傷深さは，およそ10～30 μm と大きなキャビテーション試験

Fig. 7 Cavitation fracture area as a function of spray distance.

による損傷跡が認められた。

さらに，Fig. 6の(a') 80 mmおよび200 mm (b')のSEM写真から損傷破壊面積を求めた。2.2項で行ったように，10 mm角の透明な方眼紙をSEM写真に重ねて，破壊した粒子界面部分の面積率を測定し，その結果をFig. 7に示した。測定は試験片の中心部，中間部，そして端面の3カ所について行い，その平均値を示した。250 μm $\times$ 350 μm の有限視野中では溶射距離200 mmの場合は最も大きく，およそ30～50 %の面積にまで損傷破壊の進展が認められ，かつ，これに付随して凹凸も大きく増大した。これに対し80 mmの場合は10 %と非常に低いことがわかる。これらの要因を明らかにするため，キャビテーション損傷とスプラット形態の関係，キャビテーションエロージョン試験前後の

Fig. 8 Effect of spray distance on cumulative intrusion between pore size diameter.

Fig. 9 Relation between pore size diameter and Reynolds number.

表面あらさ,ならびに表面気孔の影響について検討した。

4.2 キャビテーション損傷に及ぼす気孔の影響

溶射距離の変化によって損傷に大きな影響を受けることが明らかになったが, その中で溶射皮膜中に存在する気孔や空隙は皮膜特性を大きく支配する重要な因子であると考えられる¹⁶⁾。そこで, キャビテーションエロージョン特性と表面気孔の関係を明らかにするため, 水銀圧入法による気孔量の測定を行った。測定装置はMicromeritics社製, Auto Poro 9500. V1.05型を用いた。

溶射距離80 mmおよび200 mmの試験片を塩酸に浸漬し皮膜を剥離した。得られた水銀の浸入量と浸入圧力から気孔直径の分布の関係を求めたものがFig. 8である。溶射距離80 mmおよび200 mmの場合の, 気孔直径はともに0.005~110 μmの範囲に分布しており, 0.1 μm~0.005 μm前後にピークを持つ。その中で, 気孔直径0.1~10 μmの間を対比すると, 80 mmでは0.003 (mg/l) であるが, 溶射距離200mmでは0.008 (ml/g) と気孔直径の分布がより顕著で約2.5倍の大きな値を示すことが明らかとなった⁹⁻¹¹⁾。

このことはFig. 6の(b')のSEM写真で示した, 気孔直径の値をほぼ裏づける結果となった。このようなことから, 溶射距離200 mmの積層皮膜中に多量の気孔等を包含しており, これらの気孔等を通して, 水撃流が作用しキャビテーションインピンジメントによって破壊が伝播進行したと考えられる。

ここでこの水撃流の作用について, 気孔直径の分布が測定できたことから, このような中で代表的な値の0.5~100 μmまでの気孔を単純化して, 円筒の微細管と考え, それらの部位を水撃流が作用すると考え, その場合のRe数について推算を試みた。ただし, 液体の体積弾性率あるいは管摩擦係数は無視し, 微細管内の粗さはほぼ一定と仮定した。この場合のReは

$$Re = vD/\nu \quad (1)$$

(1) 式で表はされる。式中, Re: レイノルズ数, ν : 動

粘度, D: 気孔径, v : 速度は超音波振動20 kHzで振動振幅が50 μmであることから, $v = da/dt = d/dt (a_0 \sin \omega t) = a_0 \omega \cos \omega t$ (但し a_0 : 振動振幅, ω : 角速度) より求めた。気孔径Dが0.5~100 μmと大きな差があることから, 速度は大きく変化すると思われるが, 直径の減少に伴って, 流入抵抗が大きくなることから, 速度は減少しているものと仮定し試算した。その結果をFig. 9に示したが, ボイド径50 μmの場合においてRe数は550前後を, ボイド径100 μmでは1000前後を示す傾向が認められた。Re数は幾分低い, これは 1×10^{-4} sec当たりの値であることを勘案した場合おそらく, これらの微細部を流れる水撃流は乱流を呈していると推察される。そしてこの乱流に遭遇する割合は溶射距離80mmに比べ200 mmの場合は, 先述した水銀の浸入量が多いことにシフトして2.5倍程度大きいものと考えられる。

一方損傷前後の挙動について, 各溶射距離と表面粗さの関係について, 溶射距離(a) 80および(b) 200 mmの場合の損傷時間0.6 ks後の損傷面の三次元表面粗さ計による代表例をFig. 10に示した。損傷後の粗さは各溶射距離においておおむね7~20 μm増加の傾向が認められた。キャビテーションインピンジメントの応力によって表面が粗面化したことによると思われる。(a) の80 mmにくらべ(b) の200 mmでの粗さは顕著な値を示した。このことはFig. 7の(b')のSEM写真で観察されたようにCFDを反映していることが示唆された。

このように溶射距離の大小によって損傷量ならびに損傷機構に差が生じたことから, 損傷によって排出された損傷粉について検討した。そこで, 溶射距離80 mmおよび200 mmの場合の損傷0.6 ks後の試験液から回収した損傷粉のSEM写真をFig. 11に示した。溶射距離80 mmの場合の損傷粉は, そのスプラットの形態を反映して, 厚みが薄く薄片状のものが多く観察される。一方, 損傷粉の大きさはスプラットの平均直径から考えて小さく, スプラットの亀裂部などから破損することによって脱落したものと考えられ

Fig. 10 Cavitation erosion surfaces of three dimensional surface roughness curves. (a) 80 mm and (b) 200 mm.

(a)

(b)

Fig. 11 Cavitation erosion debris of Al_2O_3 . (a) 80 mm and (b) 200 mm.

Fig. 12 Aspect of bubble collapse.

Fig. 13 (I) Schematic water pressure mechanism at cross section of coated layer in water saturation for types of (a) hole, (b) triangle and (c) meniscus, and (II) erosion characteristics of various spray distances.

る。

これに対して、溶射距離200 mmの場合の損傷粉はその形状および質量ともに大きく、その粒子の大きさ10～50 μm に分布する傾向を示し、Fig. 1のSEMで示した原料粉末に似かよった形状が認められた。すなわちこのことは、溶射距離の最も遠い200 mmの場合は、個々の偏平積層粒子が、または粒子の集団が損傷により剥離したことを示唆された。

4.3 アルミナ溶射皮膜のキャビテーション損傷に対する考察

キャビテーション損傷は、液体中に発生した気泡が崩壊する際、高速高エネルギーのマイクロジェットとなって試料表面を繰り返し打撃することによって生じる^{13,14,15)}。単一気泡の崩壊の様子をFig. 12(a), (b)に示した。図(b)に示すように、非線形で崩壊し、気体の体積が最小となるマイクロジェットを発生する。その時の速度は130 m/sに達し、材料表面に破壊のピットを形成し、この気泡の崩壊圧力は1Gpaに達すると推定されている^{12~14)}。

そこで、実際の溶射皮膜の偏平積層表面、あるいはクラック部、接合欠陥部あるいは僅かの隙間等に存在した気泡群の発生、繰り返し崩壊による溶射皮膜への応力状態について、その損傷モデルをFig. 13 (I) および (II) に模式的に示した。

溶射皮膜の積層界面あるいは粒子の結合端面について、実際の溶射皮膜の形状は複雑であり、水撃圧力分布はこのように単純ではないと思われるが、(I) (a), (b) および (c) に静水力学の理論¹³⁾を基に模式的に示した。皮膜部における(a)のガス孔やクラック等について、微小な円柱と考え単純化して示し、(b)では粒子の結合端面、会合頂点には傾斜した面、鋸歯状の三角柱のような形状を、そして(c)では曲面のような形状の3つのタイプに分けて微小部分に作用する圧力について検討した。

おおむね形状(a)のガス孔やクラック等では形状がシンプルで屈曲が少ないと仮定した場合、微小な形状部に水撃圧($p = \rho g \int dz + c$ は、式中、 ρ : 液の密度、 g : 重力の加速度、 z : 深さ、 c : 積分定数を表す)が侵入する場合、そのガス孔やクラック近傍などを通り超えて、水撃流はさらに次の下層皮膜表面や結合界面などに分散進行するものと考えられる。一方、粒子界面や会合頂点などにおよぼす水撃圧力は(b), (c)の異なった形状では、受圧面積が比較的大きいことから、縦横に分布(散)した水撃圧力($dP_x = \rho g z dA \sin \theta$, 微小局面 $abcd$ (dA))が働くものと考えられる。

Fig. 10 (II) (a)は溶射距離が80 mm, (b)は200 mmの場合の損傷モデルである。溶射距離の最も大きい200 mmの場合は、溶射粒子の温度・速度が低く、個々のスプラット面積等が減少し、かつこのためにスプラット厚さは増大し、また偏平積層間の結合力が弱まることから、(a)の溶射距離が80 mmの場合に比べ、積層界面では未結合部やクラックなどが多く発生し、それらの中に滲入した水量に支配されられると思われる。すなわち、空隙やクラック等の中に多量に滲入した水は超音波振動によってより大きな力として働く。そしてこれに随伴して泡の崩壊作用があり、この相乗効果によって、界面やクラックなどの深い部分まで進行し、未結合部を通じて破壊が伝播したものと考えられる。

そして、溶射距離80 mmの場合では、溶射粒子の温度・速度が高く、溶融粒子の厚さは薄く、かつ大きなスプラット形態を示したこと等から、偏平積層間は比較的密な結合

を呈している。そしてこの場合の破壊は、主にマイクロクラックを通じて未結合部から伝播したと思われる。このため、損傷はより狭く、そして浅く薄い部分のみとなり、よってキャビテーションによる耐損傷抵抗の増大をもたらしたものと考えられる。

これらの溶射による偏平積層皮膜の接合強度特性試験において、皮膜強度を評価する場合、その破壊損傷進行過程などが、より明確な情報として得られることから、他の試験法の中でも超音波振動によるキャビテーション試験法は近年JISでも採用されており、重要な一つであると言える。

以上の結果は、キャビテーションエロージョン損傷に開口気孔が大きく影響することを示唆するものである。したがって、著者らがこれまで行ってきた、各種封孔処理による耐キャビテーションエロージョン特性向上の試み^{1,2,3)}は有効な処方であることを裏付けるものである。

3. まとめ

プラズマ溶射距離を変化させた場合のアルミナ皮膜構造、すなわちスプラットの表面形態、偏平粒子の平均直径や偏平粒子断面における偏平粒子の平均厚さ、あるいは粒子内き裂等についてSEM観察等によって検討し、キャビテーションによる損傷特性に及ぼす溶射皮膜因子の影響について評価を行った結果は次の通りである。

- 1) プラズマ溶射距離を変化した場合の皮膜構造において、溶射距離がノズルと基材とが近い80 mmの場合は、アルミナ溶融粒子のスプラットの偏平粒子の平均直径は大きくなり、また偏平粒子断面におけるスプラットの平均厚さは薄くなる傾向であった。一方、溶射距離が200 mmと長くなると、スプラットの平均直径は小さくなった。この結果は、溶射距離が長くなるに伴い溶着粒子の温度、速度が低くなっていることを示唆するものであり、この結果、スプラット間の接合力の低下などを招いたと考えられる。
- 2) キャビテーションによる損傷量は、溶射距離200 mmの場合、溶射距離80 mmの場合に比べて約5倍大きい値を示した。また損傷量の増加にともない損傷破壊面積及び深さも増加し、溶射距離に顕著に依存することが明らかとなった。
- 3) 皮膜表面からの開口気孔は、溶射距離80 mmでは1.2から20 μm のものが支配的なものに対して、溶射距離200 mmの場合には10から30 μm の気孔が最も多く存在することが明らかとなった。
- 4) キャビテーション損傷後の試料表面のSEM観察の結果、損傷は主として上記の気孔を起点として接合強さの弱いスプラット積層部あるいはクラック部などを破壊伝搬、進行する傾向を示した。また、損傷量の大きい溶射距離200 mmの皮膜では、損傷がスプラット単位あるいは開口気孔で囲まれた幾つかのスプラットの剝離で損傷が進行しているのに対して、損傷量の小さい溶射距離80 mmでは個々のスプラットに対してき裂部分からの損傷が生じてい

る。以上の結果は、キャビテーションエロージョン特性が開口気孔とスプラットの接合強さに強く依存することを示している。

引用文献

- 1) 大森 明, 荻野邦彦: 高温学会誌, **24-Supplement** (1998) 222-2226.
- 2) 大森 明, 荻野邦彦, 森本純司: 高温学会誌, **25-Supplement** (1999) 260-267.
- 3) 大森 明, 荻野邦彦, 原田良夫, 足立慈: 高温学会誌, **26-Supplement** (2000) 254-257.
- 4) 大森 明: 高温学会誌, **16-Supplement** (1990) 244-252.
- 5) 李 長久: セラミック溶射皮膜の構造と物性の評価に関する研究, 大阪大学博士論文 (1989) 2.
- 6) G. J. Dienes and H. F. Klemm: J. Applied Phys., **17** (1946) 458.
- 7) 沖幸男, 山川昌文, 合田進: 溶射協会誌, **35** (1998) 279.
- 8) 田中康德, 福本昌宏: 溶接学会論文集, **18-1** (2000) 26.
- 9) 黒田: 金材研研究発表概要集, 平成5年11月10.
- 10) W. Biltz, A. Lemeke, u. K. Meisel: Z. anorg, **186** (1930) 373.
- 11) H. C. Stumpf: Ind. Eng. Chem., **42** (1950) 1398.
- 12) 加藤洋治: “キャビテーション”, 横書店, (1999) 21-57.
- 13) Kling, C. L. and Hammit, F. G.: J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, **94-4** (Dec. 1972) 825-833.
- 14) Plesset, M. S. and Chapman, R. B.: J. Flude Mech., **47-Part 2** (1971) 283-290.