

円筒状収束衝撃波を利用したセラミック粒子の溶射

藤原和人^{*}、富川久男^{**}、松尾日出男^{*}
 廣江哲幸^{*}、福岡廣真^{***}

機械部品において局部的に耐摩耗性を向上させる場合、セラミックスなど耐摩耗性に優れた物質を部品の表面に接合できれば部品の材質をかなり自由に選択することができる。表面改質技術には様々な方法があるが、中でも反応性ガスを用いた爆発溶射では高硬度の皮膜を形成することができる。しかしながら、反応性ガスによって発生するエネルギーはそれほど大きくないため、一回の爆発による溶射量は低く抑えられていた。

ところで、円筒状の爆薬殻を一斉に起爆すると、その中心方向へ伝播する収束衝撃波が生成される。この衝撃波を中心部に収束させると、非常に高い温度、圧力状態が形成される。この収束によって生じる流れは高エンタルピー流体であり、駆動気体として良好に作用するため、この技術は高速流噴射の分野に応用の可能性を有している。

今回、爆薬にPETNを用い、数種のセラミック粒子を軟鉄板に溶射し表面改質実験を行った。様々な条件下での比較実験を行い、軟鉄板表面のセラミックスの付着状況を観察した。その結果、セラミックスを収束容器内に配置した場合、良好な皮膜を得ることができた。収束容器内での加熱により、粒子が十分に溶融されたためと考えられる。また、減圧下での溶射により、最大厚0.2mmの皮膜が形成された。

1. 緒 言

厳しい環境下で使用される機械部品において、耐摩耗性の向上が要求される場合がしばしばある。このような要求に対して、使用環境の影響を最も強く受ける部品表面をセラミックスなどの耐摩耗性を有する物質と接合し表面改質を行えば、部品全体を硬化させるための特別な処理を行う必要はなく、また部品材質の選択の幅も広いものとなる。特に溶射技術を用いた表面改質法には、表面皮膜の形成材料として溶融可能な多くの材料を選択できる、複雑な形状の部品に対しても表面改質を容易に行うことができる、表面改質処理を施される母材自身が比較的低温に保持されるため母材

自体の機能維持が容易であるなどの利点があり、現在注目を集めている。

溶射法にも様々なものがあるが、中でも爆発溶射により形成された皮膜は高硬度で密着性に優れている。また、この方法では、溶射が非常に短い時間で完了するため母材に与える熱的な影響も小さい。従来の爆発溶射法は、反応性ガスの爆発によって高温のガスを発生させ、そのガスと共にセラミックス等の粒子を溶射するものであった。しかし、反応性ガスにより発生するエネルギーはそれほど大きくないため、一回の爆発により溶射できる量は低く抑えられていた。これに対し、収束衝撃波を利用した溶射法では、衝撃波を収束させることにより非常に高いエネルギーを発生させることができるため、大きな質量を溶射することが可能である。

この収束衝撃波は、円筒状に形成された爆薬を一斉に起爆することにより生成される。衝撃波は波面後方のエネルギー密度を増加しつつ円筒の中心方向に伝播し、収束後中心点近傍に高温、高圧の状態が形成される¹⁾。これは、大きな質量の輸送が可能であり、また、駆動気体としても良好に作用するため、飛翔体の高速発射装置に利用されてきた²⁾。しかしながら、この高

1999年4月27日受理

^{*}熊本大学工学部知能生産システム工学科

〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3692

FAX 096-342-3692

^{**}和歌山工業高等専門学校

〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77

TEL 0738-29-2301

^{***}熊本大学大学院自然科学研究科生産科学専攻

〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3692

FAX 096-342-3692

エネルギーは、固体粒子を熔融させ高速で飛翔させることも十分に可能であると考えられる。そこで、今回、衝撃波の収束技術を利用したセラミック粒子の溶射により、表面改質実験を行った。

本論文では、様々な条件下での実験結果をもとに、粒子の熔融過程や良好な皮膜形成のための条件等について議論する。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

実験装置の基本的な構造をFig.1～3に示す。装置は、加速管とその上部に位置する圧力容器、そして加速管下部の真空容器及び真空ポンプで構成される。圧

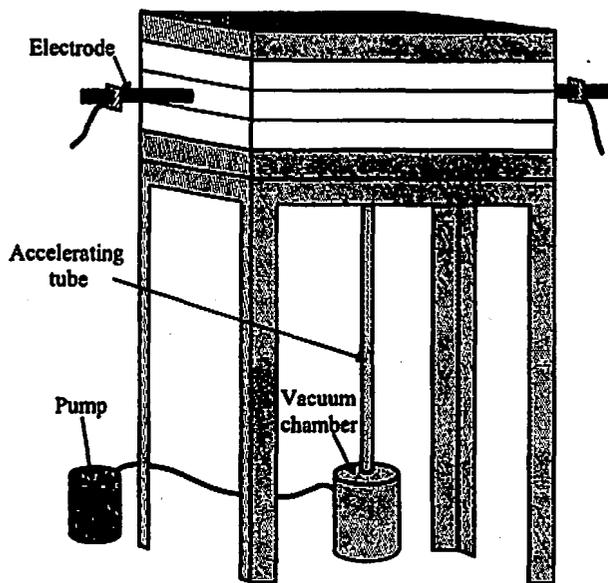


Fig. 1 Schematic drawing of thermal spray system

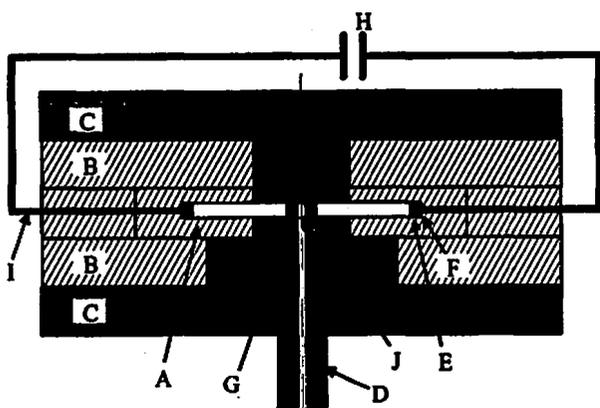


Fig. 2 Thermal spray utilizing a cylindrical shock : (A)cylindrical shock generator (B)insulator blocks (C)reinforcing steel end plates (D) accelerating tube (E)cylindrical explosive shell (F)copper wires (G) ceramics (H) condenser (I)electrode (J)Al-diaphragm

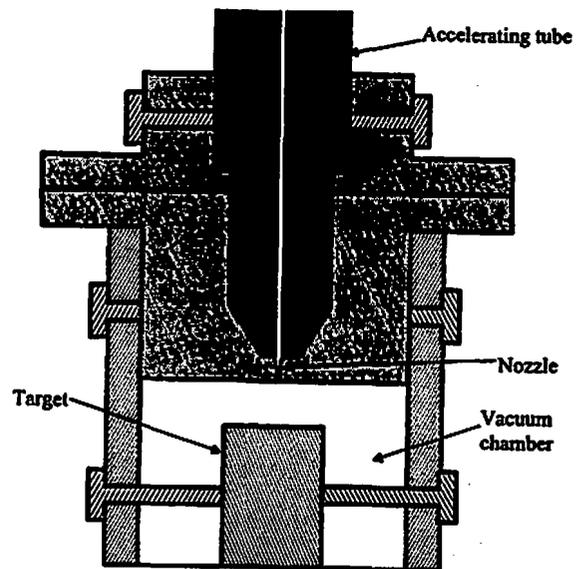


Fig. 3 Nozzle and target

力容器は、円筒状のPETN爆薬殻35g(内径100mm, 厚さ10mm, 高さ10mm)を耐衝撃性ポリエチレン(UHMW)製の収束容器及び絶縁板を用いて支持し、その外側より、厚さ50mmの鋼製の固定板で固定される。円筒の中心には加速管(長さ506mm, 内径5mm)を立て、その先端に噴射範囲を絞るための噴射ノズル(材質:S45C)を取り付ける。噴射ノズルは真空チャンパーに開口させ、チャンパー内には表面改質の対象となる材料(以下ターゲットと略記)を配置した。

爆薬殻の中心部付近にセラミック殻を設け、溶射する皮膜材料としてセラミック粒子が装填してある。また、爆薬殻の外周には直径0.2mmの銅細線が装着されており、その細線に衝撃大電流(20kV, 30kA)を40 μ Fのコンデンサより放電させると細線爆発が生じ、その衝撃で爆薬を爆発させることができる。

この爆発により衝撃マッハ数10程度の強い衝撃波が形成され、収束点近傍において収束する。収束時の気体温度は13000K~34000Kにも達し²⁾、この高温気体はセラミック粒子の表面温度を上昇させ、かつ加速管中で粒子を加速させる。加速終了時の粒子の平均飛翔速度は2500m/s以上となる。

溶射雰囲気減圧する場合、噴射ノズル先端を真空チャンパーに接続し、1000Pa程度に減圧する。また、収束波が伝播する収束容器内の空気は、加速管入口部に設けてあるアルミニウム膜の仕切により大気圧に保たれている。噴射ノズルを真空中に配置するのは、先行衝撃波の反射によってセラミック粒子速度が減速するのを防ぐためである。また、ノズル先端内径2mmに対してターゲットとのギャップをあまり近づけ過ぎると反射波の影響が及ぶことが予想された(Fig. 4)。

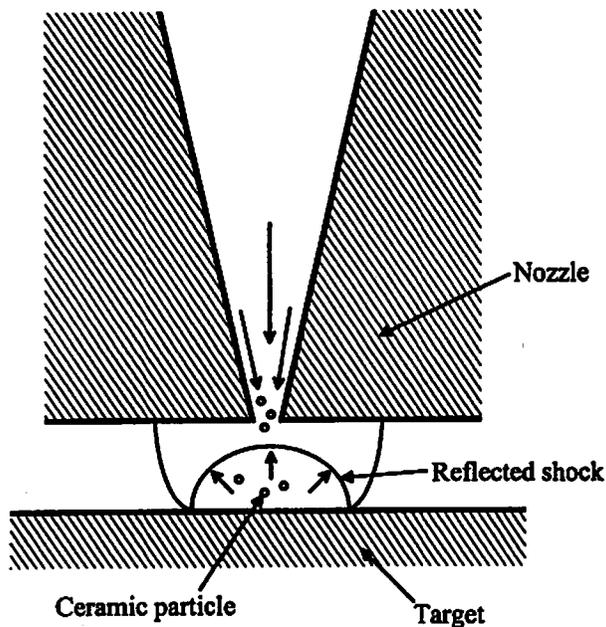


Fig. 4 Influence of reflected shock

そこで、この影響を低減するため、ギャップを5mmに設定し、溶射範囲を絞った。

2.2 皮膜材料及びターゲット

皮膜材料には一般に用いられる二種類のセラミック(アルミナ: Al_2O_3 , 炭化ケイ素: SiC)粒子(粒径0.5~1 μm)を使用した。セラミック粒子はその温度が十分に上昇するように円筒形状の殻に装填する。

ターゲットには軟鉄(SS41)を用いた。表面は特殊な処理を行っておらず、コンパウンドによる研磨とエタノールによる洗浄のみをほどこした。

2.3 実験条件

実験条件として、付着強度が主に高温気体とセラミック粒子の混合によって決まるのか、大気中と真空中にどの程度の差があるのかを調べるため、下記の二つの条件で比較を行った。

(1) セラミック粒子を加速管入口に配置した場合と金属の飛翔体によってセラミック粒子を加速させた場合、及び収束容器内に配置した場合 (Fig. 5 参照)。

(2) 皮膜材料を減圧して溶射した場合と大気中で溶射した場合。

3. 実験結果及び考察

各種実験条件の結果を Table 1 に示す。なお、表中の皮膜厚さは引掻き試験後の厚さを示しており、「-」は溶射後粒子の付着がなかったことを示している。この結果をもとに、セラミックの付着効果に対する各実験条件の影響及び付着強度、加速管長さについて考察を行う。

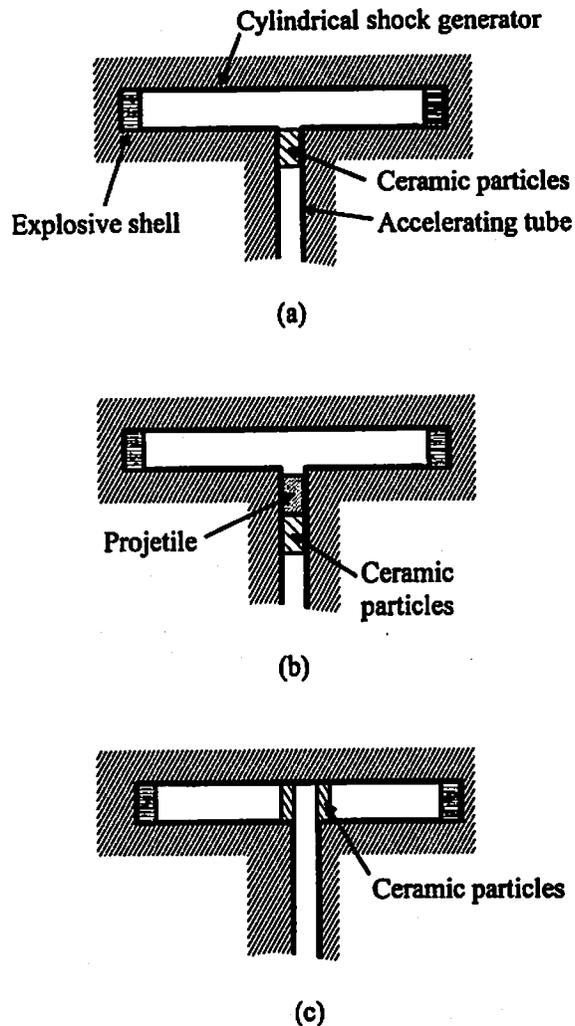


Fig. 5 Initial position of ceramic particles in (a) an accelerating tube, (b) front of a projectile and (c) a cylindrical shock generator

3.1 表面観察

実験後、ターゲット表面の観察を行った。飛翔体を用いた場合のターゲット表面写真を Fig. 6 に示す。ターゲットに1mmに及ぶ深さのクレーターが形成され、高い圧力の発生が確認されるが、セラミックの付着はほとんど見られない。セラミック粒子が高温気体と接触していないため、粒子が十分に溶融されなかったためと考えられる。このことより、衝突時の加熱だけでは溶着効果が小さいことが分かる。

次に、セラミック粒子を加速管入口に配置した場合、ターゲット上のセラミック層の色は溶射前と変化はなく、ほとんど付着していない。それに対して収束容器内に配置した場合、セラミックの付着が見られると共に変色も見られた。特に減圧条件下の場合、付着しているセラミックの変色が激しいことが確認された。収束容器内における温度上昇の効果が大きいも

Table 1 Experimental conditions and results

Experimental conditions				Experimental conditions	
Ceramics	Environment	Mass (g)	Position of Ceramic*	Color of particles	Thickness of ceramic layer (mm)
Al ₂ O ₃	Atmospheric	2	A	not change	-
Al ₂ O ₃	Atmospheric	1	B	not change	-
Al ₂ O ₃	Atmospheric	1	C	Gray	0.05
SiC	Atmospheric	2	C	Gray	0.0
Al ₂ O ₃	Atmospheric	2	C	Gray	0.0
SiC	Vacuum	2	C	Dark gray	0.15
Al ₂ O ₃	Vacuum	2	C	Dark gray	0.20

*A: Accelerating tube, B: Accelerating tube (in front of projectile), C: Cylindrical shock generator

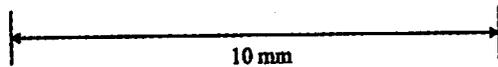
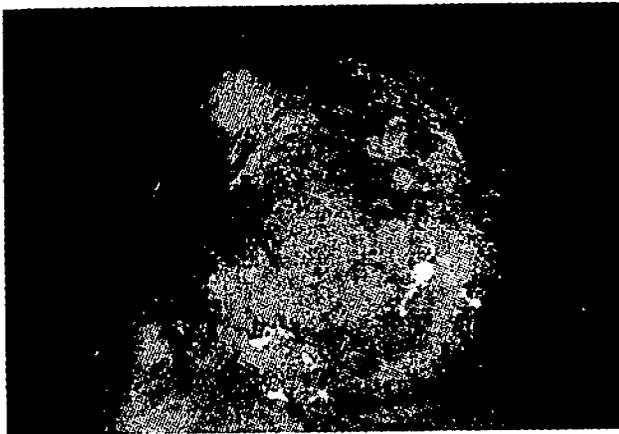
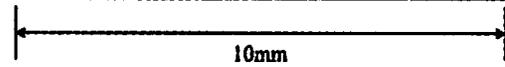
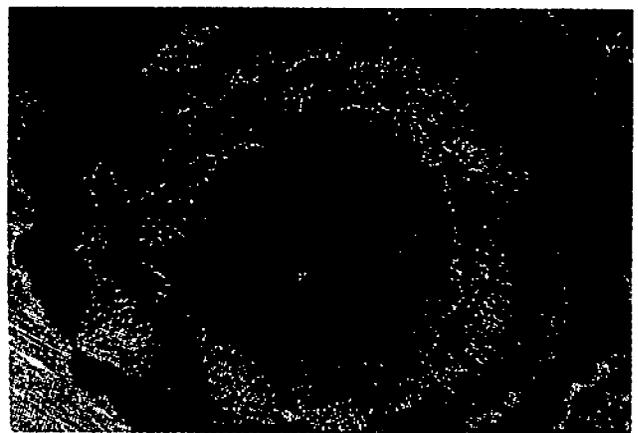
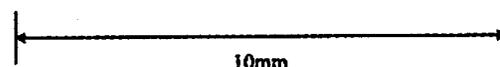
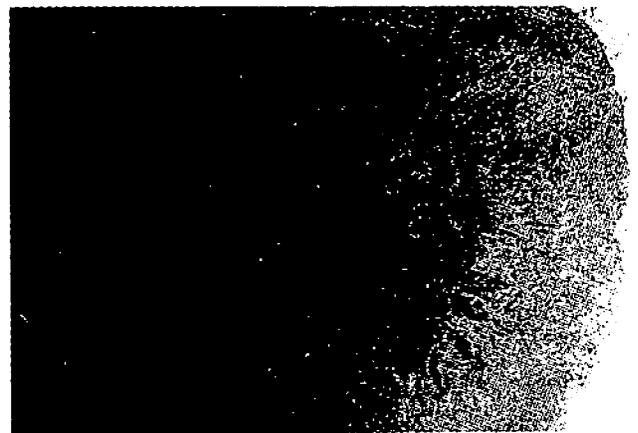


Fig. 6 Photograph of target surface impacted by projectile



(a) Al₂O₃

のと考えられる。Fig. 7に減圧時におけるアルミナ、炭化ケイ素の溶着状況の写真を、Fig. 8にその皮膜の周辺付近の拡大写真を示す。皮膜部の直径は約12mmで、皮膜層の厚さは中心付近で0.2~0.5mmである。皮膜は中心から外周方向に徐々に薄くなり、末端では剥離している。これは金属の飛翔体をターゲットに衝突させた場合に良く似ているが、セラミックスの衝撃インピーダンスは鋼の値に比べて小さいため、ターゲットに対しては僅かな変形しか与えない。また、皮膜が段階的に積層しており、粒子の加速管からの噴出が数回にわたって生じていることが分かる。この噴出過程において最初の噴出は、後に述べるように、ターゲット表面のプラスティングの役割を果たしているものと考えられる。



(b) SiC

Fig. 7 Photographs of target surfaces coated by ceramics : (a) Al₂O₃ (b) SiC



5mm
(a) Al_2O_3



5mm
(b) SiC

Fig. 8 Photographs of target surfaces near the boundary of coating : (a) Al_2O_3 (b) SiC

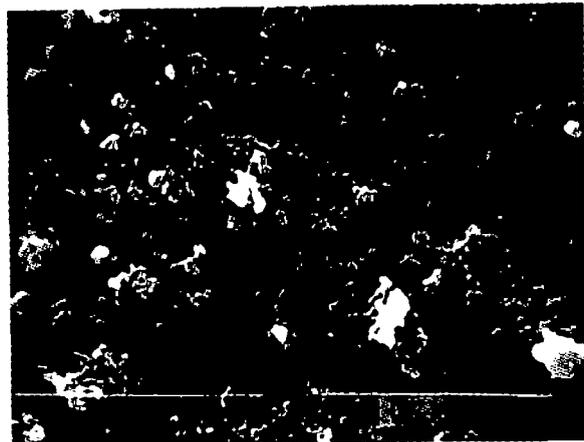
3.2 減圧の影響

常圧下における実験の場合でもセラミック粒子の付着が見られた。特にセラミック粒子を収束容器中に配置しその質量を1gとした場合、0.3mm程の厚い皮膜を形成した。溶射物の質量を減らしたことにより粒子の拡散、溶融が進み、また粒子の飛翔速度も上昇したためと考えられる。しかしながら、高速度工具鋼(張り強度: 2000MPa)を用いて行った引っ掻き試験の結果、付着強度は減圧時の1/30以下であった。先に述べた衝撃波の反射による衝突速度の低減と皮膜中に発生する気孔の影響と考えられる。また、セラミック粒子が飛翔していく過程において、濃度が下がると空気抵抗が無視できなくなる。そのため、大気状態での溶射は、ターゲットへの衝突速度をかなり減少させるこ

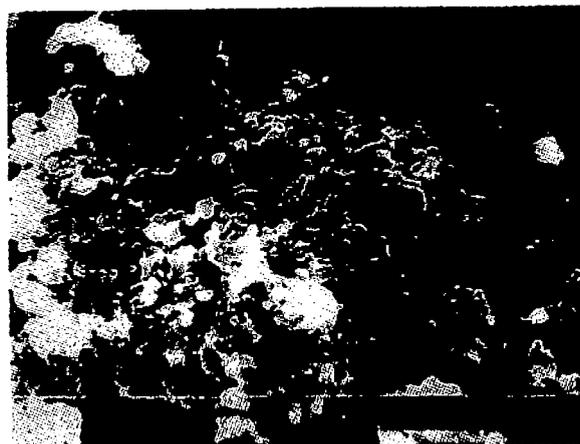
とになると予想される。また、Fig. 9はセラミックスを収束容器中に配置した場合の減圧下におけるターゲット表面のSEM像(5000倍)を示している。減圧下では、アルミナ及び炭化ケイ素粒子は共に溶融しており5~10 μm に凝縮してターゲット上に積層していることがわかる。

3.3 付着強度

溶射皮膜の付着強度を調べるために、引っ掻き試験を行った。この試験は、硬鋼製のピンを用いて皮膜表面にせん断力を加えることにより皮膜の付着強度を評価するものである。今回、ピンの先端に2MPa、62MPaの面圧を加えて試験を行った。その結果、皮膜の上層はターゲットから剥離した。上層では不純物が多く存在しているためと考えられる。下層は皮膜の中心から直径5~6mmの部分について皮膜厚さ0.1~



(a) Al_2O_3



(b) SiC

Fig. 9 Scanning electron micrographs of ceramic particles sprayed under vacuum condition : (a) Al_2O_3 (b) SiC

0.2mmの部分が62MPaに耐えることを確認した。試験後、アルミナでは皮膜厚さに比較的大きな不均一性が見られたが、一般に行われている反応ガス爆発溶射法による一回の皮膜厚さ0.006mm¹⁾と比較すると形成された皮膜厚さは非常に厚いことが分かる。一般の爆発溶射法に比べ、一度に大きな質量を溶射できるためである。

溶射法による表面改質を行う場合、ターゲットと皮膜の密着力を高めるためにターゲット表面にプラスト加工を施す必要がある。今回の実験では、最初に高速度で表面に到達したセラミック粒子が小さなクレーター孔を形成し、このプラスティングの役割を担ったことが、高い付着強度を生み出す一因になったものと考えられる。また、溶射速度を平均2.5km/sと見積もると衝突の際の圧力は、インピーダンスマッチング法により最大30GPaにも及ぶ。この高い衝突圧力は溶融セラミックスの圧密化に寄与し、付着力の強化につながっている。しかしながら、凝縮による衝突粒子サイズの違いに起因するクレーターサイズの不均一や、駆動ガス中に含まれる不純物が膜の表層に影響を及ぼすことなどにより、皮膜厚さが一定にならないなどの問題も残されている。

3.4 加速管長さ

粒子とターゲットの衝突によって、その運動エネルギーが熱エネルギーに変化したと仮定して温度上昇を推定すると $V^2/C_p=6200K$ 程度となる。この温度の継続時間は数 μ 秒と非常に短く、粒子を十分に溶融させることはできない。この不足は収束容器での熱伝達によって行われると考えられる。この熱伝達は主に高温気体からの熱放射の影響が大きいと考えられる。熱伝達係数を高温ガスからの放射程度にとり、伝熱面を半径2 μ mの球とし、収束容器中での加熱時間を約10 μ 秒とすれば、セラミック粒子の温度は周囲の高温気体温度の70%に達すると推定される。したがって収束時の気体の温度が10000K程度であれば、多少の損失を

考慮しても5000K~7000Kに達しており粒子の溶融が進んでいるものと考えられる。加速管中では急激に温度が低下するので、加速管は加熱時間を稼ぐよりも、粒子を加速させる働きの方が大きいと考えられる。以上のことから、均一特性の皮膜を形成するためには、セラミック粒子と高温気体との十分な混合に配慮する必要があり、また、加速管長さは膜の圧密化に関係しているのでセラミックスの質量に応じて最適な値を定める必要がある。

4. 結 論

円筒爆薬の一斉起爆により生じる収束衝撃波を利用したセラミック粒子の溶射により、金属の表面改質実験を行った。異なる条件下における比較実験の結果、以下の結論を得た。

- (1) 減圧条件下で厚さ0.2mmの皮膜を形成することができた。
- (2) 粒子の溶融は、ターゲット衝突時の温度上昇のみでは不十分である。良好な接合面を形成するためには、収束容器内における粒子の加熱、溶融が必要である。
- (3) 溶射過程において、ノズルからの噴射は数回に分けて起こっており、最初に噴射された粒子がプラスティングの役割を果たしていると思われる。これが、高い付着強度を生み出す原因と考えられる。

文 献

- 1) H. Matsuo and Y. Nakamura, J. Appl. Phys., 51, 3126-3129 (1980)
- 2) H. Matsuo, K. Ebihara, Y. Ohya and H. Sanematsu, J. Appl. Phys., 58, 2487-2490 (1985)
- 3) H. Matsuo, K. Fujiwara, H. Matsuo, M. Komada and H. Tomikawa, J. Appl. Phys., 63, 5254-5260 (1992)
- 4) 荒田吉明, 「セラミックス溶射と応用」, P.80 (1990), 日刊工業新聞社

Thermal spray of ceramics driven by converging shock waves

Kazuhito FUJIWARA*, Hisao TOMIKAWA**, Hideo MATSUO*
Tetsuyuki HIROE*, Hiromasa FUKUOKA***

A tough wear-resistant surface of metal is produced by thermal spraying ceramic particles on the metal surface. The harder surface is formed by impulsive spraying in which energetic gases explode. The mass of applied ceramics depends on the driving gas energy and is restricted to small amount. In this study, high temperature and high pressure gases generated by converging shock waves are utilized as driver gases of thermal spray to break the restriction.

The converging shock wave is generated by a simultaneous explosion of a cylindrical explosive shell and has been applied to a hypervelocity accelerator. As the shock is focusing to the center, the energy density just behind the shock front is increasing. After the reflection of the shock a high energy condition is generated around the focusing center. The generated gas flow has high enthalpy and transfers large amount of kinetic energy into ceramic particles.

The thermal spray system composed of a cylindrical shock generator, an accelerating tube, a nozzle and a vacuum chamber was constructed, and ceramics were sprayed onto iron plate. The performance of spray was examined under several conditions and the coated surfaces were observed. The ceramic coatings had sufficient strength in the case that the ceramic particles were sets in the cylindrical shock generator, but the ceramic coatings were not formed in the case in accelerating tube. It is found that the ceramics were required to be molten by heat exchange with high temperature gas.

(*Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

**Wakayama National College of Technology, Nojima 77, Nata, Gobou, Wakayama 644-0023, Japan

***Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan)