

高周波数パルスデトネーション溶射装置の開発

花房龍男, 竹保義博, 藤井昭彦^{*1}, 岡本哲也^{*1}, 秋朝智也^{*1}, 兼清喬平^{*1}, ノル アニザ^{*1},
松浦英次^{*2}, 鈴木忠彦^{*3}, 榎原 均^{*4}, 須佐秋生^{*1}, 遠藤琢磨^{*1}

Development of Thermal Spraying by a High Frequency Pulse-Detonation

HANAFUSA Tatsuo, TAKEYASU Yoshihiro, FUJII Akihiko, OKAMOTO Tetsuya, AKITOMO Tomoya,
KANEKIYO Kyohei, NOOR Aniza, MATSUURA Eiji, SUZUKI Tadahiko, EHARA Hitoshi,
SUSA Akio and ENDO Takuma

The influence that the spraying powdered body attendant position and spray parameters exerted on pulse-detonation thermal spraying was investigated, purpose to development of thermal spraying by a high frequency pulse-detonation combustor more than the past detonation spraying. As a result, the influence of the particle supply position to the oxidation of coating, and the influence of the jurisdiction flying range to the coating thickness was observed.

従来の爆発溶射よりも格段に高周波数が得られる高周波数パルスデトネーション燃焼器を用いた溶射装置を開発することを目的として、溶射粉体供給位置や溶射条件がPD溶射皮膜形成におよぼす影響を調査した。これにより、皮膜の酸化度には粉体供給位置の影響が強いことが、皮膜厚さには溶射装置管内飛行距離の影響が強いことが分かった。

キーワード：溶射，デトネーション，高周波数

1. 結 言

近年、環境・エネルギー問題に対応する高機能化・長寿命化製品の製造が求められており、少ない工程で必要な部分に必要なだけ(例えば:表面にだけ耐摩耗性を付与する,等)の機能を持たせる技術は多くの分野で用いられている。この中で、乾式で表面に皮膜の作製を行うことができる溶射は、溶融またはそれに近い状態にした粒子を、物体表面に吹き付けて皮膜を形成する表面処理法の一つである。この施工は石油精製プラントの耐食性皮膜や自動車における車軸への耐摩耗性付与といった多くの分野で利用されている。

デトネーション(爆轟)を利用した溶射法には、爆発溶射法があり、装置としてはユニオンカーバイド社のDガンが有名である^{1)・2)}。その運転はパルスのであり、運転周波数は通常8Hz以下である。一方、航空宇宙工学の分野では、デトネーションを繰り返し発生させる技術をパルスデトネーション(pulse-detonation:以下PD)技術と呼んでおり、高効率内燃機関として技術開発がすすめられている³⁾。このPD燃焼器の運転周波数は、通常でも数10Hzであり、高周波数化が可能である。さらに、バルブを開けたまま高周波数で運転する方法⁴⁾により、100Hz

を超えることも可能であるため、PD燃焼器は今までにない溶射用熱源として期待でき、特に溶射用熱源の高温度化・高速化が期待できる。このような観点から、我々は高周波数で運転されるPD燃焼器による溶射装置の開発を目指す⁵⁾。

本研究では、PD燃焼器を用いた溶射装置を作製するため、溶射粉体供給位置や溶射条件がPD溶射皮膜形成におよぼす影響を調査した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本実験で用いた実験装置の概略を図1に示す。燃焼器には、内径16mm、長さ40mmの他端を閉じた円筒管を用いた。長時間運転を行うことから燃焼器は銅管をろう付けし、水冷した。燃料にエチレンガス、酸化剤に酸素ガスを用い、水平対向噴流として供給し、既燃ガスページ用にはアルゴンガスを使用し、燃焼器下側から45度傾けて閉端に向けて供給した。それぞれのガス供給部には内径調整部が接続されており、各ガスの供給量は、各々に対する供給圧と内径調整部とで制御した。点火には自動車用スパークプラグを使用し、燃焼器閉端から8mmの位置と、そこから50mmの位置に2本取り付けた。溶射粉体供給位置は、点火位置との関係を調査するため燃焼器上流側(PN:A)、と燃焼器下流側(PN:B)の2か所設け、粉体供給位置を変えられるようにした。テストチャ

2011.5.31 受理 加工技術研究部

*1 広島大学, *2 マイメタリコン(株), *3 鈴木精工(株),
*4 関西テクノサポート

ンバー内壁とテストピースとの距離は 300mm で固定し、燃焼器出口部には長さ 200mm の延長バレルを取り付けられるようにした。さらに、長時間運転を安全に行うため、振動センサーを燃焼器閉端に取り付け、その出力を利用して緊急停止装置を機能させた。バルブの開閉および点火のタイミングは、プログラマブルコントローラー (KEYENCE 社製：KV-3000) で制御した。

この PD 燃焼器は、通常バルブで制御する方法 (バルブ制御モード) の他、バルブを開放させてガスの供給圧力で制御する方法 (バルブ開放モード) の 2 通りで運転可能である。バルブ開放モードでは、燃料と酸素の供給圧を等しく設定し、パージ用アルゴンガスが適当に充填されたときに点火してデトネーションを発生させると、管内圧が急激に上昇し、すべてのガス供給が停止する。既燃ガスが排出され管内圧が下がると、まずパージ用アルゴンガスの供給のみが再開する。その後、さらに管内圧が下がると、燃料と酸素の供給も再開する。この時間差で既燃ガスを自動的にパージする。この運転モードでは、ガスの供給条件を設定した後は、点火周波数のみで運転を制御する。

バルブ制御モード (PD 燃焼器運転周波数 25Hz) で運転した際の爆発性混合気の組成 (流量測定を基にした計算値) は、 $1.1C_2H_4+3O_2$ (燃焼火炎温度=3695°C) で、爆発性混合気は燃焼器部分のみに充填した。バルブ開放モード (PD 燃焼器運転周波数 100Hz) で運転した際の爆発性混合気の組成 (流量測定を基にした計算値) は、 $1.1C_2H_4+3(O_2+2.5Ar)$ (燃焼火炎温度=3275°C) で、爆発性混合気は燃焼器・延長バレルの両部分に充填した。

溶射粉末は 80Ni-20Cr 合金 (粒径 20-53 μm : 融点=1430°C) でアルゴンガスをキャリアとして燃焼器内に供給した。溶射に用いた粉末の形状を図 2 に示す。扁平な粒子形状もわずかに有するが、比較的均一な球形である。これを、アルミナでブラスト処理した軟鋼 (SS400) に溶射した。

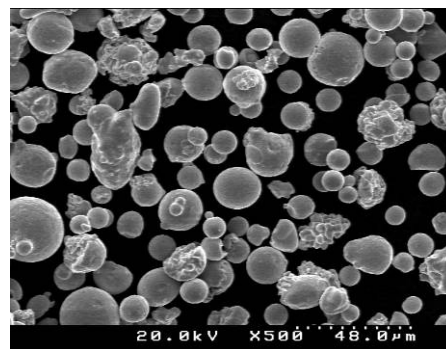


図 2 溶射に用いた粉末の形状

2.2 溶射皮膜の評価方法

皮膜特性の評価は、空孔率、酸化度、皮膜厚さを評価した。測定方法は次のとおりである。

空孔率は、溶射中心部より試料を切出し、樹脂埋めし、バフ研磨を行った後、皮膜断面を電子顕微鏡 (日立製作所製 S-4100) により 500 倍に拡大して写真撮影した。この写真を、画像処理ソフト (三谷商事㈱製 WinRoof) により 2 値化処理した後、空孔の面積率を算出した。

酸化度は、基材から 10×10mm の試験片を切出し、超音波によるアセトン洗浄を 300sec 行った後、X 線回折測定を行った。これにより得られた各組成の最大ピーク位置におけるピーク面積の結果から組成比を算出した。なお、各組成のピークは重複しているため、島津製作所製 X 線回折ピーク分離ソフトによりピーク分離を行った。

皮膜厚さは、溶射中心部より試料を切出し、樹脂埋めし、皮膜断面を電子顕微鏡により観察し、最大膜厚を算出した。

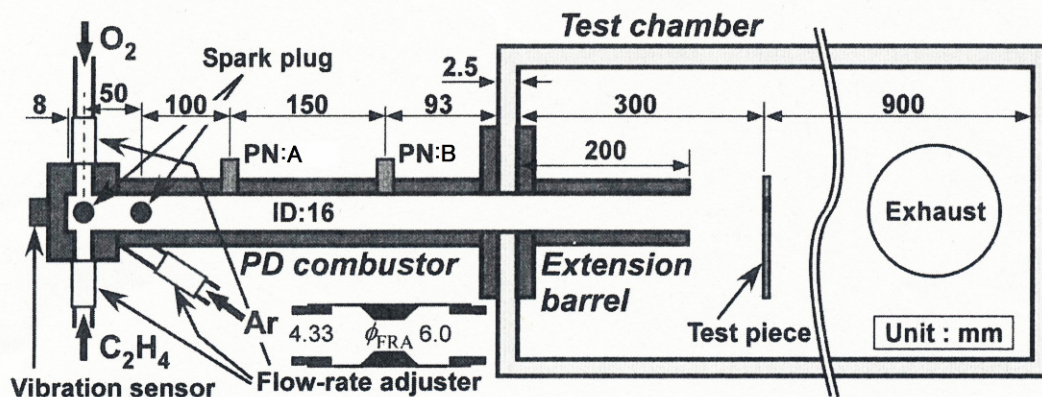


図 1 パルスデトネーション溶射装置および実験装置概略図

3. 実験結果および考察

実験は表1に示す条件で行い、溶射粉体供給位置、溶射粉体供給量、バレル使用の有無、を変化させ、溶射ガンおよび被溶射材を固定して15秒間溶射した。

まず、図3に各溶射条件における溶射皮膜表面写真を示す。いずれの溶射皮膜の溶面も溶融粒子が衝突、扁平化し、冷却された様態を示しており、良好な溶射皮膜が得られている。しかし、一部に未溶融の溶射粒子が残っていることが分かる。

表1 PD 溶射実験条件および皮膜評価結果

実験番号	実験条件				溶射皮膜評価結果		
	延長バレル(200mm)	粉体供給位置	粉体供給量(g/min)	PD燃焼器運転周波数	酸化度	空孔率	皮膜厚さ
No1	無し	PN:B	29	25 Hz(バルブ制御)	1.6%	0.9%	184 μm
No2	無し	PN:A	24	25 Hz(バルブ制御)	5.3%	0.9%	448 μm
No3	有り	PN:B	24	25 Hz(バルブ制御)	0.7%	0.5%	529 μm
No4	有り	PN:A	25	25 Hz(バルブ制御)	1.8%	0.9%	703 μm
No5	有り	PN:B	34	100 Hz(バルブ開放)	<0.3%	1.2%	308 μm
No6	有り	PN:A	52	100 Hz(バルブ開放)	<0.3%	1.7%	324 μm

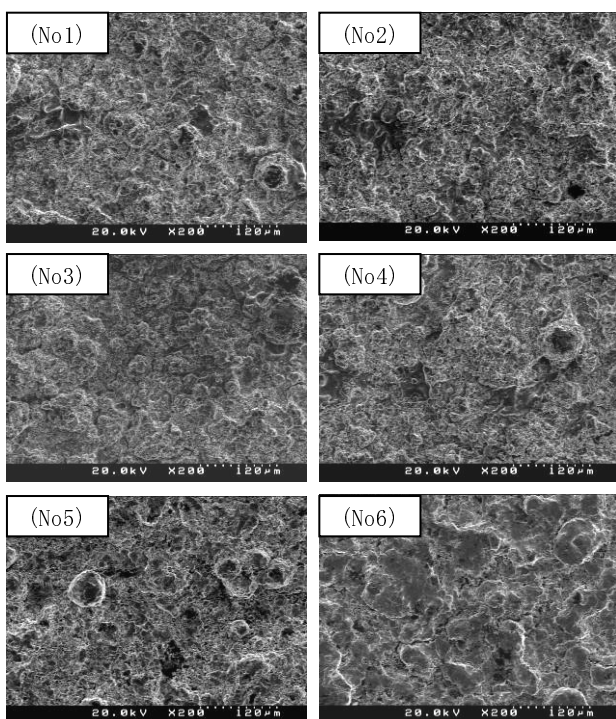


図3 各溶射条件における溶射皮膜表面写真

次に、図4に各溶射条件における溶射皮膜断面写真を示す。25HzのPD溶射では、ほとんどの溶射粉体は粒子状態を保っていないことが分かった。従って、溶射粉体は溶射過程で内部まで溶融し、溶融粒子が被溶射材に衝突することで、溶射粒子が扁平化し、皮膜が積層していると考えられる。一方、100HzのPD溶射では、ほとんどの溶射粉体は扁平ではあるが粒子形状を保っていること

が分かった。

従って、溶射粉体は非溶融粒子と内部まで溶融した粒子との突き固め効果により積層していると考えられる。

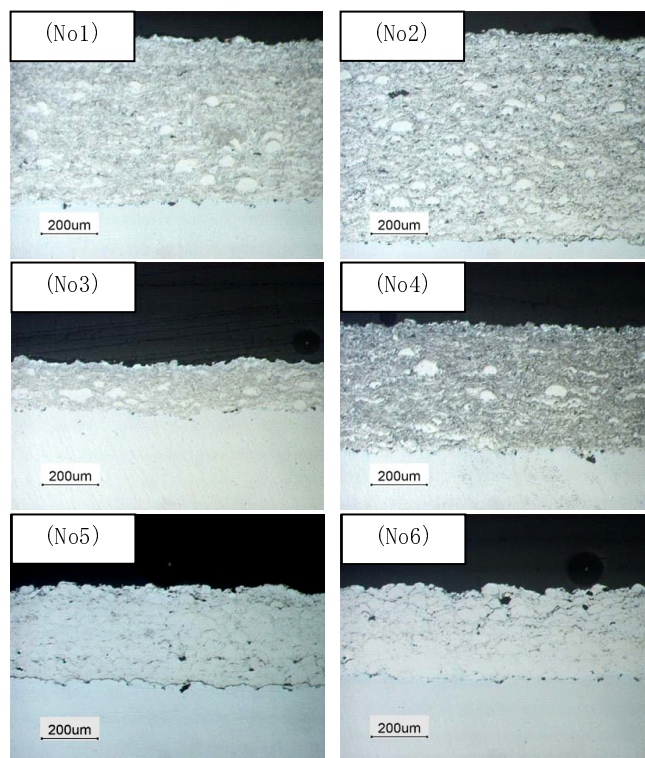


図4 各溶射条件における溶射皮膜断面写真

さらに、表1の皮膜評価結果から、バルブ制御モードで酸化度について顕著な差が生じているのは、粉体供給位置である。PN:Aから粉体を供給した場合には、PN:Bに比べ管内飛行距離が長いこと高温の粉体が燃焼前の酸素とより反応しているものと考えられる。空孔率については、実験条件依存性を見いだせなかった。

厚さについては、厚さを全粉体供給量で除して規格化した厚さを粉体の管内飛行距離に対してプロットしたものを図5に示す。この中でバルブ制御モードでは、図5のようにほぼ比例する形となり、溶射ガンが長い方が、溶射粒子が高温の燃焼火炎に長時間曝されることで溶射粒子が内部まで溶融し、より効率的に皮膜の積層が行えることを示している。

バルブ開放モードについては、表1と図5の結果から、酸化度が低く、気孔率が高く、規格化した厚さが薄いことから、粉体の加熱が不十分であったためと考えられる。

また、各溶射条件における皮膜の組成状態を図6に示す。一部に酸化物が検出されているが、それ以外の化合物等は検出されておらず、良好な皮膜を作製することが出来た。

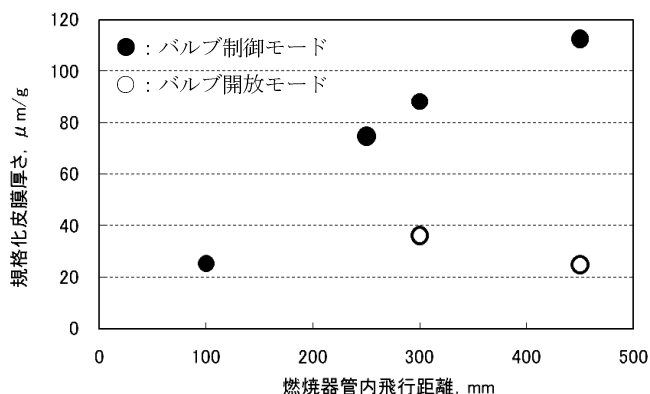


図 5 規格化した厚さの管内飛行距離依存性

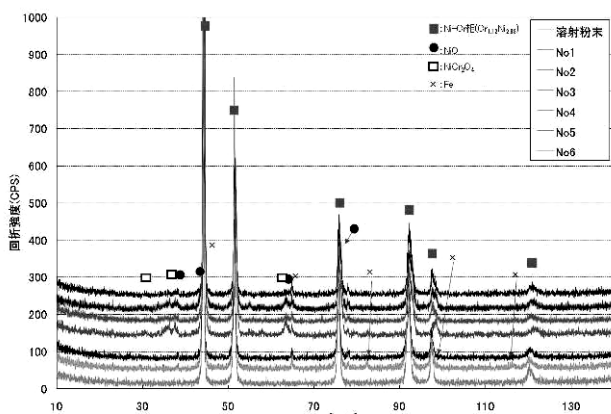


図 6 各溶射条件における溶射皮膜組成分析結果

4. 結 言

高周波数パルスデトネーション燃焼器を用いた溶射装置を開発するため、溶射粉体供給位置や溶射条件が PD 溶射皮膜形成におよぼす影響を調査した。このことから、次のことが分かった。

- 酸化度については、燃焼器下流側で粉体を供給した方が酸化度は低くなる。これは、出口側で粉体を供給した方が粒子の熔融時間が短くなることや、燃焼助剤として導入する酸素ガスに触れる時間が短くなるためと思われる。
- 空孔率については、明確な差異は無かった。
- 膜厚については、バルブ制御では、管内飛行距離を長くした方が厚くなる傾向があった。

今後、溶射粒子径や表面状態などを変化させ溶射効率を増加させる必要があると思われる。

謝 辞

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構重点地域研究開発推進プログラム(地域ニーズ即応型研究)「溶射皮膜高速形成技術の開発」(平成 21 年度採択課題)により実施したものである。ここに記し、深く謝意を表す。

文 献

- 竹田博光:セラミックコーティング(日刊工業新聞社), 1988, Ch. 4.
- B. J. Gill: "Super D-GUN", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, **62**, 10-14 (1990).
- T. Bussing and G. Pappas: "Pulse Detonation Engine Theory and Concepts", Progress in Astronautics and Aeronautics, **165**, 421-472 (1996).
- 山積弘信 他: "バルブレスモード燃料供給によるパルスデトネーションエンジンの高周波数運転", 平成 19 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2008, p. 285-286.
- 岡本哲也 他: "高周波数パルスデトネーション燃焼器による溶射皮膜形成実験", 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2010, p. 96-97.