

高周波数パルスデトネーション溶射装置の品質工学的検討

花房龍男, 宗廣修興, 兼清喬平^{*1}, 岡本哲也^{*1}, 秋朝智也^{*1}, 阪口幸男^{*1}, 半田吉紀^{*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}

Examination of a High Frequency Pulse-Detonation Thermal Spraying by Quality Engineering

HANAFUSA Tatsuo, MUNEHIRO Shuko, KANEKIYO Kyohei, OKAMOTO tetsuya, AKITOMO Tomoya,
SAKAGUCHI Yukio, HANDA Yoshinori, MATSUURA Eiji, SUZUKI Tadahiko, EHARA Hitoshi,
SUSA Akio and ENDO Takuma

The controlling factor with a main influence in the thermal spray was obtained by a quality engineering in a thermal spraying that used the high-frequency pulse detonation combustor. As a result, the influence of three factors of "Driving frequency of the PD combustor", "The barrel length", and "Passing speed of the stage" was observed. The sprayed coating of a low oxide and a low porosity could be made by the extracted factor, for a steady coating to turbulence.

高周波数パルスデトネーション燃焼器を使った溶射装置において、外乱に対して安定した皮膜形成を目指すため、品質工学的的手法により溶射皮膜の形成に大きな影響を持つ制御因子を見つけることを目的とし、溶射を試みた。これにより「PD燃焼器の運転周波数」「バレル長さ」「ステージの移動速度」の3つの因子の影響が強いことが分かった。抽出した因子により溶射皮膜形成実験を行ったところ、低酸化度、低空孔率な皮膜を作製することが出来た。

キーワード：溶射、デトネーション、高周波数、品質工学、溶射効率

1. 緒 言

近年、環境・エネルギー問題に対応する高機能化・高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:表面にだけ耐磨耗性を付与する,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、熔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磨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ため、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の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⁾。PD燃焼器の運転周波数は、通常でも数10Hzである。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。このような、PD燃焼器は今までにない溶射用熱源として期待できることから、我々は高周波数で運転されるPD燃焼器による溶射皮膜形成実験を行っている⁵⁾。

筆者らはこれまでに、独自のバルブレスモードと呼ばれるガス供給技術を用い、高運転周波数(20~200Hz)での運転および溶射皮膜形成に成功し、高周波数デトネーション溶射装置を試作した。この溶射装置は、従来の溶射装置と比べて、溶射用熱源の高温度化・高速化が期待できる。また、PD溶射装置及び溶射方法について特許出願した⁶⁾。

本研究では、PD溶射装置による溶射皮膜形成条件を確立するため、溶射皮膜形成に強い影響を及ぼす条件を抽出する。そこで、溶射工程から主要な要因を抽出し、品質工学的的手法を用いて検討した。その際、最終的な溶射施工において重要な要件は溶射効率であることから、溶射効率の静的望大特性のSN比を用いた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。燃焼器には内径16mm、長さ401mmの一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二重管構造とし、水冷した。燃料にエチレンガス、酸化剤に酸素ガスを、水平対向噴流として供給し、既燃ガスパーージ用にはアルゴンガ

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

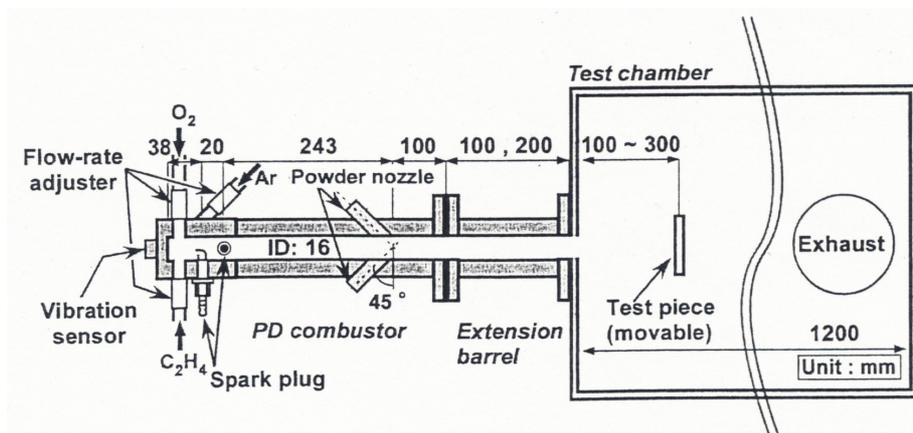


図 1 パルスデトネーション溶射装置および実験装置概略図

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 38mm の位置と、そこから 20mm の位置に 2 本取り付け付けた。溶射材料は CoNiCrAlY 合金(質量比で Co:Ni:Cr:Al:Y=5:4:2.5:1:0.05, 融点=1340℃)でアルゴンガスをキャリアとして燃焼器内に供給した。溶射粉体を供給するためのノズルは、閉端から 301mm の位置に、45 度傾けて 2 本設置した。また、燃焼器出口には長さ 100mm および 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。

実験で使用した溶射用の基材は、50×50mm の平面軟鋼板(SS400)の表面を所定の表面粗さになるようにアルミナの粒径を変えてブラスト処理したものである。テストチャンバー内において、基材を左右、上下方向の 2 軸往復運動が可能なステージに取り付け、溶射皮膜形成実験を行った。ステージは、左右往復運動させながら上から下まで片道運動させた。上下方向移動速度については、ステージが左右方向に片道分移動する際に 3mm 下がるように設定した。

3. 実験結果

3.1 品質工学的実験

実験のパラメータは、PD 燃焼器、溶射施工、基材前処理の各構成因子から計 8 因子を抽出した。また、各因子の標準状態を水準 2 とし、影響の大きな制御因子を見つけるため、水準の変化を大きめに設定した。制御因子を割りつけた結果を表 1 に示す。変化させた制御因子の詳細は、PD 燃焼器の運転周波数(バルブ制御 33Hz, バルブ開放 150Hz)、溶射距離(100, 200, 300mm)、バレル長さ(0, 100, 200mm)、基材を動かすステージ送り速度(14,

26, 36cm/sec)、溶射材のパウダー粒子径(5-37, 20-53, 11-62 μm)、溶射材供給のパウダーレート(10, 22, 55g/min)、基材をブラストする粒子の粒度(#1000, #240, #80: 基材表面の算術平均粗さ=2.0, 3.5, 6.0 μm)、燃焼器の燃料充填率(80, 90, 100%)である。

バルブ制御モード(PD 燃焼器運転周波数 33Hz)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、

2. 1C₂H₄+3O₂(燃焼火炎温度=3545℃)である。バルブ開放モード(PD 燃焼器運転周波数 150Hz)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. 2C₂H₄+3(O₂+2.4~2.6Ar)(燃焼火炎温度=3288~3312℃)である。溶射に要した時間はステージの移動速度に依存するが、ステージの送り速度が 14cm/sec では 20sec, 26cm/sec では 25sec, 36cm/sec では 45sec であった。なお、各実験は再現性を見るため 2 回ずつ行った。

表 1 PD 溶射因子の条件割付け一覧

因子	水準	1	2	3
PD燃焼器運転周波数(Hz)		33	150	—
溶射距離(mm)		100	200	300
バレル長さ(mm)		0	100	200
ステージ送り速度(cm/sec)		14	26	36
パウダー粒子径(μm)		小(5-37)	中(20-53)	大(11-62)
パウダーレート(g/min)		10	20	55
ブラスト材粒度(灰色アルミナ)		細かい(#1000)	中(#240)	粗い(#80)
PDガス充填率(%)		少(80)	中(90)	多(100)

溶射効率の算出方法は、被溶射材に付着した皮膜重量を、溶射粉体の吐出重量と基材上を PD 溶射ガンが走査する時間から算出した重量で、除して算出した。

これらの因子を L18 直交表に割り付けて実験した結果を表 2 に示す。L18 直交表の 1 行目の実験について、SN 比に変換する方法を述べる。静特性である望大特性で解析する場合の SN 比は、式(1)ようになる。η は SN 比、Y_n は溶射効率である。ここで、y₁, y₂ は 2 回繰り返した実験における溶射効率の 2 つの実験値である。

$$\eta = -10 \times \log \left[\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{y_1} + \frac{1}{y_2} \right) \right] \quad (1)$$

従って、

$$\eta = -10 \times \log \left[\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{16.7} + \frac{1}{14.0} \right) \right] = 23.6$$

同様に、以下の行の実験についての SN 比を計算す

る。その結果を 表 2 の右側の列に示す。

表 2 品質工学的実験結果一覧

実験番号	PD燃焼器運転周波数(Hz)	溶射距離(mm)	バレル長さ(mm)	ステージ送り速度(cm/sec)	パウダー粒子径(μm)	パウダーレイト(g/min)	プラスタ材粒度	PDガス充填率(%)	溶射効率1	溶射効率2	SN比
1	33	100	0	14	小	10	細かい	80	16.7	14.0	23.6
2	33	100	100	26	中	20	中	90	18.3	19.2	25.5
3	33	100	200	36	大	55	粗い	100	27.8	26.3	28.6
4	33	200	0	14	中	20	粗い	100	16.5	16.2	24.3
5	33	200	100	25	大	55	細かい	80	12.4	9.1	20.3
6	33	200	200	36	小	10	中	90	14.6	15.8	23.6
7	33	300	0	25	小	55	中	100	13.4	12.0	22.0
8	33	300	100	36	中	10	粗い	80	4.8	13.2	16.1
9	33	300	200	14	大	20	細かい	90	28.5	26.0	28.7
10	150	100	0	36	大	20	中	80	5.5	5.5	14.9
11	150	100	100	14	小	55	粗い	90	29.1	27.3	29.0
12	150	100	200	25	中	10	細かい	100	1.9	1.7	5.2
13	150	200	0	25	大	10	粗い	90	1.7	1.7	4.9
14	150	200	100	36	小	20	細かい	100	8.8	9.2	19.1
15	150	200	200	14	中	55	中	80	33.9	26.1	29.3
16	150	300	0	36	中	55	細かい	90	0.5	0.5	-6.4
17	150	300	100	14	大	10	中	100	10.9	10.0	20.4
18	150	300	200	25	小	20	粗い	80	6.4	6.4	16.1

次に、データ全体を要因効果に対応した分散分析を行った。その結果を表 3 に示す。この際、分散が最も小さく、影響が小さいと思われる PD ガス充填率を基準に、各因子の変動が全変動に占める割合(寄与率)を求めた。これより、「PD 燃焼器の運転周波数」、「バレル長さ」、「ステージ送り速度」の影響が強いことが分かった。

表 3 品質工学的実験の分散分析結果

	SN比の平均			分散分析			
	1	2	3	各因子の変動	自由度	分散	寄与率 %
PD燃焼器運転周波数(Hz)	23.6	14.7	-	357.7	1	357.7	22.4
溶射距離(mm)	21.1	20.2	16.1	84.8	2	42.4	3.9
バレル長さ(mm)	13.9	21.7	21.9	252.9	2	126.4	14.8
送り速度(mm/sec)	25.9	15.7	16.0	404.0	2	202.0	24.6
パウダー粒子径(μm)	22.2	15.7	19.6	132.0	2	66.0	7.0
パウダーレイト(g/min)	15.6	21.4	20.5	115.8	2	57.9	5.9
プラスタ材粒度	15.1	22.6	19.8	173.7	2	86.8	9.7
PDガス充填率(%)	20.1	17.5	19.9	24.3	2	12.1	-

「PD 燃焼器運転周波数」の影響は、爆発性ガスの組成が異なることから、既燃ガスの温度を反映しているものと考えられる。すなわち、燃焼火炎の 200~300℃の燃焼温度の違いが溶射効率を大きく変えていることが分かる。「バレル長さ」は、溶射粉体の加熱・加速時間を大きく支配している制御因子であり、今回の結果からは、100mm 以上のバレル長さが必要であることが示唆される。

「ステージ送り速度」は、溶射中に燃焼火炎に曝されるため、基材表面の温度を変化させることに大きく関係している制御因子であり、今回の結果からは、基材表面温度を高めることの重要性が示唆される。

これらの結果を要因効果図にまとめものを 図 2 に示す。SN 比が最も高い値の条件を取ることで外乱に対して品質の変動が少なくなる。従って、外乱に対して影響の小さい条件は、次のようになることが分かる。

- PD 燃焼器運転周波数 = 遅く
- 溶射距離 = 短く (100mm)
- バレル長さ = 長く (200mm)
- 試料ステージ送り速度 = 遅く (14cm/sec)

- パウダー中心粒子径 = 小さく (粒子径 5-37 μm)
- パウダーレイト = 標準 (20g/min)
- プラスタ材粒度 = 標準 (#240)
- PD ガス充填率 = 少ない (80%)

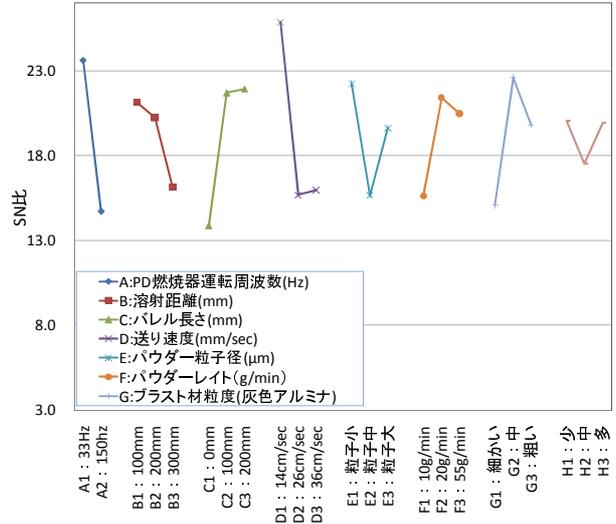


図 2 品質工学的実験による要因効果図

しかし、燃焼火炎温度や爆発噴流の速度を変えることでより広範な製品皮膜に適応させるために PD 燃焼器の運転周波数は可変としたい。これらのことから、

- PD 燃焼器運転周波数 = 33Hz および 150Hz
- 溶射距離 = 100mm
- バレル長さ = 200mm
- ステージ送り速度 = 14cm/sec
- パウダー中心粒子径 = 5-37 μm
- パウダーレイト = 20g/min
- プラスタ材粒度 = #240
- PD ガス充填率 = 80%

を安定した皮膜を作製することのできる条件とした。

3.2 溶射皮膜の形成実験

上記によって得た条件を基に、確認試験を行った。PD 燃焼器運転周波数 33Hz のものを確認試験 1 とし、PD 燃焼器運転周波数 150Hz のものを確認試験 2 とした。溶射皮膜を形成し、皮膜の評価を行った結果を表 4 に示す。なお、空孔率は、皮膜断面を電子顕微鏡により 500 倍に拡大して写真撮影し、この写真を画像処理ソフト(三谷商事(株)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、X 線回折測定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。密着力は、試料中心部から 24×24mm の試料を切出し、プルオフ試験により行った。

表 4 皮膜形成の確認試験結果

	確認試験1	確認試験2
皮膜厚さ, μm	201	272
気孔率, %	2.7±0.2	2.2±0.3
酸化度, %	0.2%以下	4.6±0.2
密着力, MPa	10.5	14.1
溶射効率, %	17.7	6.4

これらのことから、PD 燃焼器の運転周波数 33Hz, 150Hz いずれにおいても、空孔率 3%以下、酸化度 5%以下の皮膜を作製することが出来た。なお、確認試験により試作したテストピースの外観写真を図 3 に、それらの断面組織写真を図 4 に示す。これらより、表面および断面に試料ステージの送りによる溶射パスの重なりに伴う段差、施工回数による層間の境界等は見られず、均一な溶射皮膜を作製することが出来た。また、皮膜の組成状態を図 5 に示す。確認試験 2 において酸化物(NiAl_2O_4)が検出されているが、その他の化合物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。しかし、確認試験 2 において酸化物が形成される要因については、今後の課題である。

4. 結 言

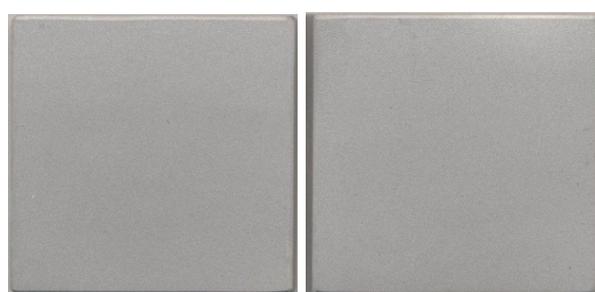
高周波数パルスデトネーション燃焼器を使った溶射施工を開発するため、品質工学的手法により溶射皮膜の形成に大きな影響を持つ制御因子を見つけることを目的とし、溶射を試みた。これにより「PD 燃焼器の運転周波数」「バレル長さ」「ステージの移動速度」の 3 つの因子の影響が強いことが分かった。外乱に対して安定した皮膜形成を目指すため、抽出した因子により溶射皮膜形成実験を行ったところ、低酸化度、低空孔率な皮膜を作製することが出来た。今後は、この 3 つの因子を中心に、さらに成膜条件を最適化する予定である。

謝 辞

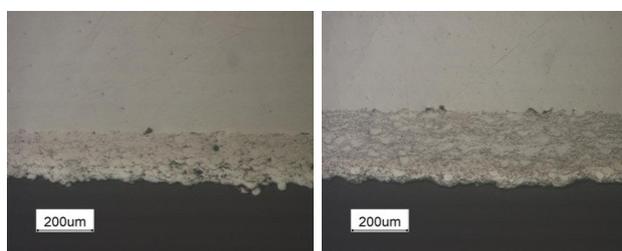
本研究の一部は、(独)科学技術振興機構重点地域研究開発推進プログラム(地域ニーズ即応型研究)「溶射皮膜高速形成技術の開発」(平成 21 年度採択課題)により実施したものである。ここに記し、深く謝意を表す。

文 献

- 1) 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.
- 2) B. J. Gill: "Super D-GUN", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, **62**, 10-14 (1990).
- 3) T. Bussing and G. Pappas: "Pulse Detonation Engine Theory and Concepts", Progress in Astronautics and Aeronautics, **165**, 421-472 (1996).
- 4) 山積弘信 他: "パルプ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.
- 5) 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.
- 6) 遠藤琢磨 他: "パルスデトネーション溶射装置及び溶射方法" 特願 2010-148692 (2010).



(1) 確認試験1 (2) 確認試験2
図3 溶射皮膜の外観写真



(1) 確認試験1 (2) 確認試験2
図4 溶射皮膜の断面組織写真

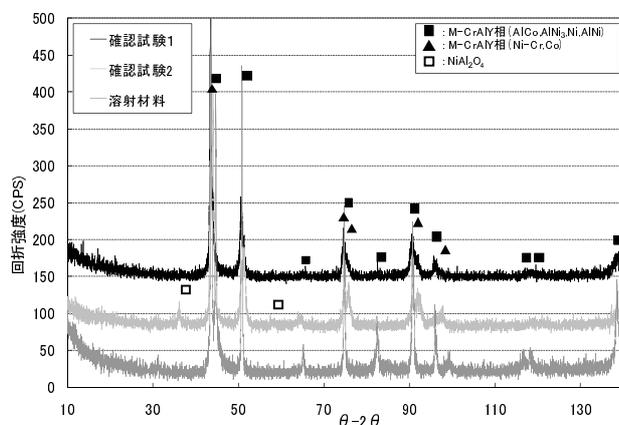


図5 確認実験における皮膜組成状態