

# レーザー加工による溶射前処理手法の検討

広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 加工技術研究部

主任研究員 大田 耕平

(2020年度 奨励研究助成(若手研究者枠) AF-2020240-C2)

キーワード：レーザー，溶射，前処理

## 1. 研究の目的と背景

溶射とは、材料を溶融あるいは半溶融にした状態で、基材に吹き付けて皮膜を形成する表面処理技術の一種である。基材と異なる材料の皮膜により、防錆、防食、耐磨耗性、導電性付与など、様々な特性を基材に付与することが可能である<sup>1)</sup>。また、環境負荷低減の観点からも、必要な部位のみに必要な特性を付与できる技術として注目されている。

溶射前処理として施工されるショットブラスト処理は、基材表面を清浄化、粗面化し、溶射皮膜の密着性を向上させる重要な工程である<sup>2)</sup>。しかし、施工時に騒音や粉塵が発生することや、硬く脆いセラミックスなどの脆性材料や金属薄板などの変形しやすい基材などには適さないこと、狭所などブラストが届きにくい部分の処理が難しいこと等、課題も多い。

本研究ではブラスト処理に代わる溶射前処理方法としてレーザー加工に着目した。レーザーを用いることで上述した課題を解決出来るほか、加工再現性の高さから、安定した溶射皮膜を施工できるなど多くの利点がある。今回は溶射前処理にレーザーとブラストをそれぞれ用いて前処理加工した基材に対して溶射を行い、皮膜密着力と皮膜断面の比較を行った。

また、レーザー加工面の表面性状パラメータを測定し、どのパラメータが密着力と相関が高いのか調査した。

## 2. 実験方法

### 2.1 溶射前処理加工方法

レーザーを用いた溶射前処理加工にはパルスファイバーレーザー (YDFLP-C-30-M7-S : JPT 社製) を用いた。表1にレーザーの諸元を示す。レーザーにはガルバノユニットが付属し、最大 3000mm/s の速度でレーザーを走査することができる。基材にはアルミニウム合金 (JIS 規格 A5052) を用い、サイズは 100mm×50mm×5mm とした。レーザー処理面はレーザー走査速度 50mm/s、出力 27W、繰返し周波数 10kHz、パルス幅 200ns の照射条件で、加工痕が直線状に 100 $\mu$ m のピッチ間隔で並ぶ状態に加工した。

一方、ブラストを用いた前処理加工には処理はブラスト材にホワイトアルミナ (粒度#240) を用いて、エア圧 4.0Mpa、ブラスト距離 15mm でブラストを行った。

レーザー処理面とブラスト処理面の一部をレーザー顕微鏡 (LEXT OLS4100 : Olympus 製) で撮影した 3D 写真を図 1 に示す。レーザー処理面は照射痕が直線状に加工されて

おり、ブラスト処理面は完全にランダムな形状となっているのが確認できる。表 2 に主要な表面性状パラメータを示す。本研究では、面の表面性状パラメータに注目しているが、この理由として密着力などの皮膜特性は評価面の三次元的特徴の影響を受けるためである。Sa、Sz はともに面粗さを表す主要なパラメータであるが、どちらもレーザー処理面のほうが僅かに大きい値となっている。

表 1 レーザー諸元

項目	仕様
波長	1064nm
出力	>30W
パルス周波数	1kHz-4000kHz
パルス幅	2ns-350ns, 15 ステップ
ビーム品質	TEM00

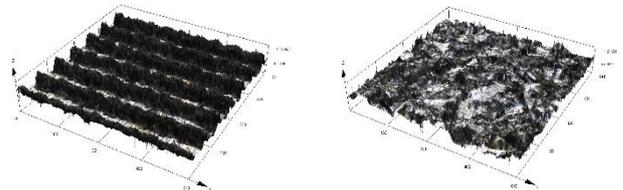


図 1 溶射前処理加工面のレーザー顕微鏡写真

表 2 表面性状パラメータ

表面性状パラメータ	レーザー, $\mu$ m	ブラスト, $\mu$ m
Sa	14.4	8.2
Sz	119.4	112.1

### 2.2 溶射皮膜の成膜

表面処理を行った後、フレーム溶射装置 (MK74 : Metallisation 製) を用いて、ホワイトアルミナ ( $Al_2O_3$ ) の成膜を行った。溶射ガンの走査速度 10mm/s、溶射ガンと基材との距離 60mm とし、溶射材は WA 微粉 (粒度#1500) を用いた。

### 2・3 密着力評価試験

溶射皮膜の密着力を評価するため、引張試験を行った。試験サンプルに直径 20mm の円柱治具を 2 液混合のエポキシ接着剤で接着し、万能試験機を用いて皮膜を引きはがす方向に荷重をかけ、皮膜が破断した際の強度から密着力を求めた。引張速度は 5mm/min で行った。

## 3. 結果と考察

### 3・1 引張試験結果

図 2 に引張試験によって得られた密着力と皮膜膜厚の関係を表すグラフを示す。グラフ中のプロットは試験結果を、破線はプロットを線形近似したものである。全体的な傾向として、膜厚が厚くなると皮膜密着力は低下する傾向があるが、これは前処理の影響ではなく、厚膜化による内部応力の影響によるものと考えている。内部応力の影響について、溶射施工時には、溶射粒子の熱が基材に移るため、圧膜化によって基材の温度が高くなる。今回基材として用いたアルミニウム合金の線膨張係数は大きいため、冷却に伴う熱収縮量も大きいことから、溶射施工後のアルミニウム合金冷却時に凝固した皮膜と基材の界面に熱応力が生じ、密着力が低くなると考えている。また、レーザー処理に比べてブラスト処理は近似線からのプロットのばらつきが大きくなっており、これはブラスト処理面の再現性が低いとされている。

これらの点を踏まえてレーザー処理とブラスト処理での溶射皮膜密着力を比較すると、全体的にブラストの方が高くなることがわかった。この結果から、表 2 に示す表面粗さの値と密着力は単純な相関関係にはないことがわかった。また、膜厚 200 $\mu$ m 前後の領域ではどちらの前処理方法でも JIS 規定値である 8.5MPa 以上の密着力となることが確認できた。

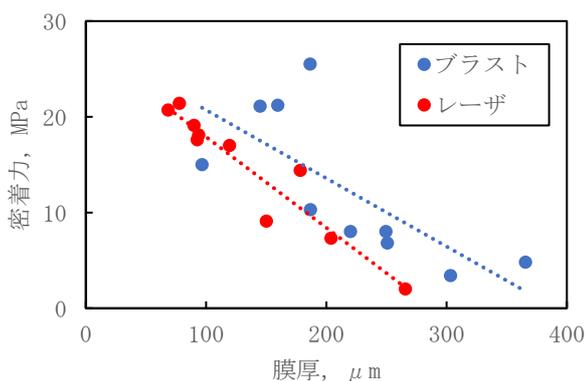


図 2 密着力と膜厚の関係

### 3・2 引張試験後の破断面

図 3 に引張試験後の基材の破断面写真を密着力ごとに整理したものを示す。写真右下の数字は膜厚 ( $\mu$ m) を表す。レーザー処理したサンプルでは、密着力が 15MPa 以上とそれ以下で破断面に違いがみられた。15MPa 以上では

破面全体に白色～灰色に変色しており、これは表面処理を行った基材側に溶射膜の一部が残留しているためとみられる。このことから引張時の破断は溶射皮膜内部で起こったと考えられる。15MPa 以下では破面の変色はなく、引張時の破断は主に表面処理面と溶射皮膜の界面で起こったと考えられる。一方で、ブラスト処理したサンプルにおいてもレーザー処理と同様に、高密着力で溶射皮膜が基材に残留する量が多く、破断は溶射皮膜内部で起こっている傾向がみられ、低密着力で破断は界面で起こっている傾向がみられた。

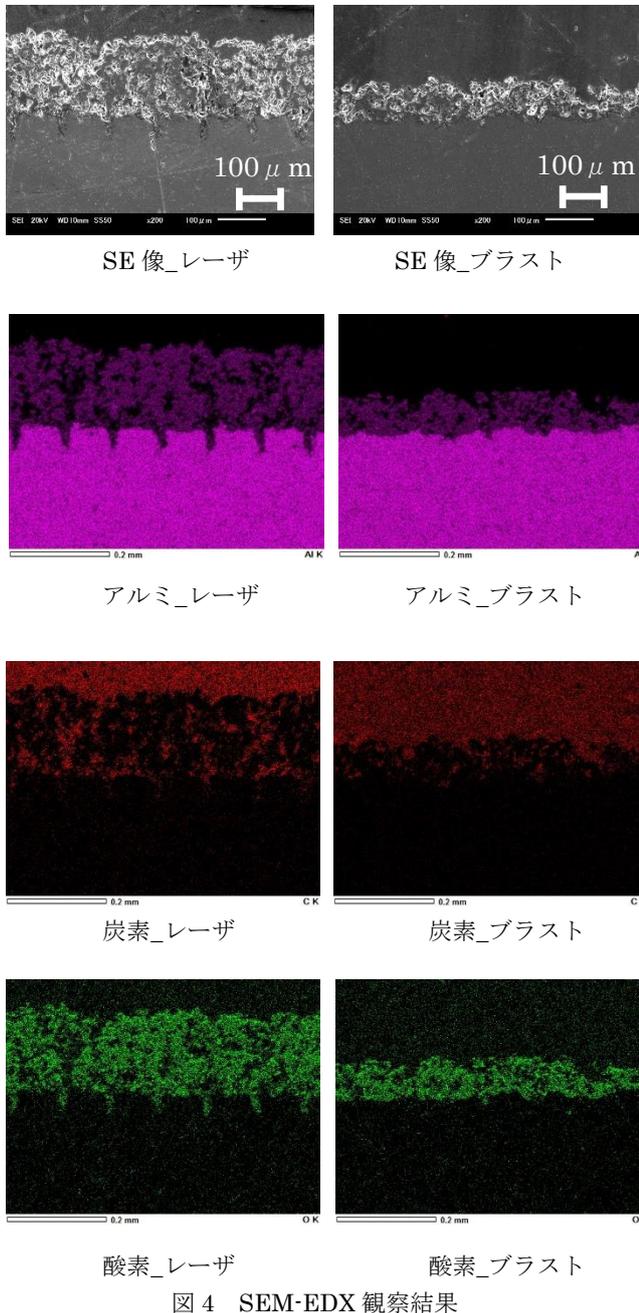
密着力 MPa	表面処理	
	レーザー	ブラスト
20 以上	 77.8 68.4	 144.9 159.7  186.5
15~20	 89.9 92.6	 96.6
10~15	 178.4	
5~10	 150.2 203.9	 220.1 250.8  249.5
0~5	 265.7	 303.3

図 3 引張試験後の破断面写真

### 3・3 断面観察

図 4 に SEM - EDX による溶射皮膜の断面観察写真と元素ごとのマップ分析結果を示す。アルミと酸素からなる溶射材が表面処理面に堆積し、表面処理した凹凸部分に食い込んでいるのが確認できる。また、炭素のマップで溶射皮膜と表面処理面の界面を見ると、レーザーのマップでは炭素が界面に沿って存在していることが確認できる。これは界面付近の溶射皮膜に空孔が存在しており、その空孔に埋込樹脂が充填されたものと思われる。空孔が多く発生した原因としては、レーザーが照射された凹部では基材表面の酸化物除去による清浄化や粗面化ができるが、レーザー

が照射されていない平坦部では清浄化や粗面化に至っていないため、皮膜密着力が低く空孔が生じやすいものと考えられる。この界面付近の溶射皮膜における空孔率の差が、レーザとブラストの皮膜密着力の差に繋がるものと考えている。



### 3・4 表面性状パラメータの影響

レーザ加工を用いた前処理面で、凸部や凹部などのうちの、どの箇所が皮膜密着力に影響するのかを調査するため、図 5 に示す 5 種類の表面処理形状について表面性状パラメータを取得した。①, ②, ③はレーザ走査速度, 出力を主に变化させて, 加工深さを变化させたもので。④, ⑤はレーザを格子状に走査したものである。なお, ショットブラ

ストによる表面処理については, 処理面の再現性が低く, 皮膜密着力もばらつきが大きくなるため, 評価対象から外した。表 3 に取得した表面性状パラメータの値を示す。粗さ記号は, ISO25178 に準拠している。その後, 表面処理した基材に対して, ホワイトアルミナを成膜し密着力を測定した。その上で得られた密着力と膜厚の関係を線形近似し, 近似線から膜厚 200 μm 時の密着力を推定し, 表面性状パラメータとの相関を求めた。表 4 に密着力との相関が決定係数 0.75 以上となった表面性状パラメータを示す。Sa 以外は負荷曲線 (累積ヒストグラム) の特徴を数値化したパラメータであり, 負荷面積率が 10% と 80% の位置を境界として谷部, コア部, 山部に分けて表される。今回の結果から, 突出山部の高さやコア部体積率の高さが密着力と高い相関があることがわかった。本研究における条件では, 基材と皮膜の界面において面方向の空隙を防止するとともに, 空隙から生じる亀裂進展を阻害することで密着力向上につながると思う。山部形状により亀裂の進展が阻害できることから, 密着力との相関が高いと考えている。なお, ブラスト処理では粒子を基材に打ち付けるため, 凸形状の先端はつぶされる。一方, レーザ加工ではレーザ走査により照射位置を制御するため, 山部形状の形成に適している。今後は高密着力化のための山部形状最適化が課題と考えている。

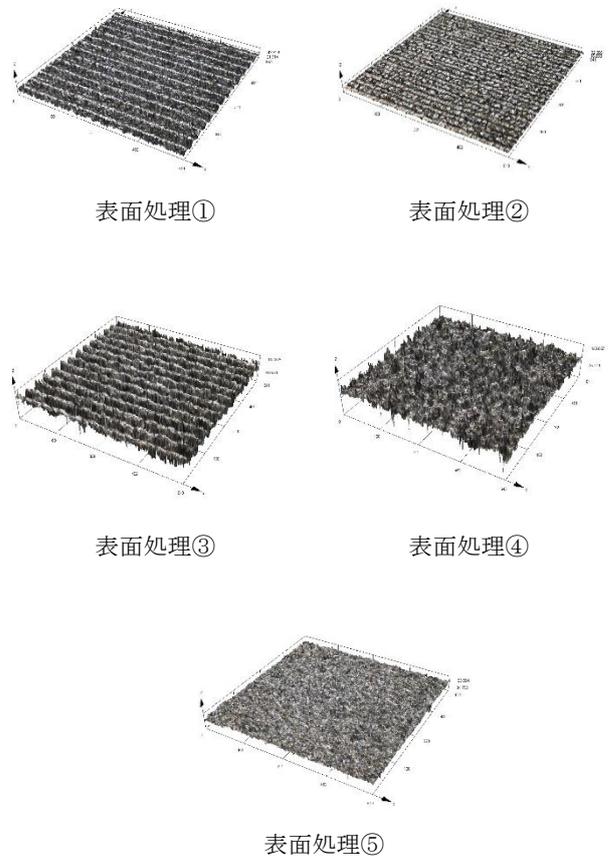


図 5 5 種の表面処理面形状

表3 表面性状パラメーター一覧

	Sz	Sp	Sv	Sa	Sq	Ssk	Sku
①	111.9	75.2	36.7	12.6	14.3	0.2	1.8
②	34.0	20.4	13.6	1.0	1.6	1.2	10.0
③	45.8	24.6	21.2	3.8	4.6	0.5	3.0
④	132.0	85.1	46.9	6.6	8.6	-0.4	4.9
⑤	84.1	55.0	29.0	4.4	5.9	0.5	5.6
	Sk	Spk	Svk	Smr1	Smr2		
①	33.4	13.5	4.0	25.9	97.6		
②	2.4	3.0	1.6	15.2	83.3		
③	12.0	5.5	3.0	13.5	96.6		
④	18.9	7.7	12.1	8.9	85.5		
⑤	12.9	8.7	6.7	11.3	89.6		
	Vvv	Vvc	Vmp	Vmc			
①	0.7	19.5	0.4	14.9			
②	0.2	1.7	0.2	1.1			
③	0.3	6.3	0.3	4.3			
④	1.3	8.9	0.4	7.3			
⑤	0.7	6.5	0.4	4.6			

表4 密着力と相関の高い表面性状パラメーター

表面性状パラメーター		決定係数
Spk	突出山部高さ	0.86
Vvc	コア部空間体積	0.85
Vmc	コア部実態体積	0.80
Sa	算術平均高さ	0.80
Sk	コア部のレベル差	0.77

#### 4. まとめ

本研究では、溶射の前処理方法として、レーザとブラストで行った場合について比較した。いずれの前処理においても JIS 規定値以上の密着力を得ることができた。なお、ブラスト処理の方が全体的に皮膜密着力が高くなる傾向がみられた。また、引張試験時の破断面をみると、高密着力のサンプルでは皮膜内部で破断し、低密着力では皮膜と基材の界面で破断したとみられ、破断の形態が異なることがわかった。皮膜の断面観察では、皮膜と基材の界面付近で、レーザ処理の方が空孔率が高くなることがみられた。また、5種類の前処理形状で、どの表面性状パラメーターが密着力と相関が高いのかを調査した結果、突出山部の高さやコア部体積率の高さが密着力と高い相関があることがわかった。今後は高密着力化のための山部形状最適化が課題と考えている。

#### 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団からの 2020 年度奨励研究助成（若手研究者枠）（AF-2020240-C2）により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 馬込正勝：溶射技術マニュアル，p. 18，（1998）
- 2) 溶射ハンドブック：p. 249，（1998），日本溶射協会編