

# マルチビーム式レーザー粉体肉盛技術の開発

舟田義則\* 山下順広\*

レーザー粉体肉盛技術では、レーザー光照射によって基材表面に熔融池を形成し、そこに原料粉末を噴射投入することで耐摩耗性や耐腐食性の高い肉盛層を形成する。ポンプ部品や発電用ガスタービン部品などで実用化されているが、精密金型や精密機械部品など小型で薄く精密な製品への適用は難しい。層形成には安定した熔融池形成が必要であり、それによって生じる歪や成分希釈が無視できないためである。そこで、本研究では、肉盛技術の高精度化を目的にマルチビーム式レーザー粉体肉盛技術を開発した。その結果、幅狭で薄く、基材への溶け込みが少ない肉盛層の形成を可能にした。また、マルチビーム式レーザー粉体肉盛技術の実用性を検証するため、打抜き型刃への応用を試みた結果、型刃製造技術としての適用可能性が示された。

キーワード：レーザー粉体肉盛，マルチビーム，積層造形，打抜き型刃

## Development of Multi-beam Laser Metal Deposition

Yoshinori FUNADA and Yorihiro YAMASHITA

In laser metal deposition, a molten pool is formed on the surface of the substrate by laser irradiation, and metallic powder is injected into it to form a layer with high wear and corrosion resistance. Laser metal deposition's practical applications include pump parts and gas turbine blades and so on. However, it is difficult to apply it to small and precise parts such as fine mold dies and precision machine parts. This is because stable molten pool formation is necessary for layer formation, and distortion and dilution caused by molten pool formation are not allowed. In this study, multiple laser metal deposition technology was developed for the improvement of accuracy in layer formation, making it possible to form narrow and thin layers with little dilution. We attempted to manufacture die blades with laser metal deposition to verify its practical use. As a result, it was found that multi-beam laser metal deposition is applicable to the manufacturing of die blades, and its practicality was shown.

Keywords : laser metal deposition, multi-beam laser, 3D modeling, building up layer, die blade

### 1. 緒 言

基材の特性をそのまま維持し、製品表面に異材を付加することで新たな機能を付与する方法として溶接硬化肉盛や溶射がある<sup>1)</sup>。これらの方法は、局部的に比較的厚い皮膜を形成することが容易であり、高負荷が作用し、高温・高腐食環境下で使用される圧延ローラやタービンプレード、スクリーなど比較的大型の製品や部品の耐摩耗性・耐腐食性向上を目的に実用化されている。しかし、溶接硬化肉盛は基材の熱変形や基材成分との希釈による肉盛層の特性損失防止のため、必要以上に厚くする必要があるなどの問題がある。また、溶射は、基材との密着性が低いことや、層中に空隙が残存しやすいことが問題となっている<sup>2)</sup>。

これらの解決策として注目されているのが、レーザー粉体肉盛技術(Laser Metal Deposition : LMD)<sup>3)</sup>である。出力が1kW以上のレーザー光照射によって基材表面に熔融池を形成し、そこに原料粉末を噴射投入することで層を形成するプロセスである。入熱制御性の高いレーザー加熱を活用することから、アーク放電やプラズマを熱源とする従来技術に比べて熱歪や成分希釈が少なく、緻密で密着性の高い皮膜を形成できることが特長である。既に専用の装置が市販され、ポンプ部品や発電用ガスタービン部品などで実用化されている。また、ロボットなどを利用して三次元CADデータを基に層を精密に積層すれば立体造形が可能である。ASTM<sup>4)</sup>では、付加製造(Additive Manufacturing : AM)方法の一つとして認識されており、近年の3Dプリンタブームによって関心が高まっている。

\*機械金属部

一方、これまでのレーザ粉体肉盛装置は、精密金型や精密機械部品、治工具など小型で薄く精密な製品への適用は難しい。層形成には原料粉末を投入する熔融池が必要であり、その安定形成のために集光径が大きく、出力の高いレーザ光が照射されるからであり<sup>5)</sup>、それによって生じる歪や希釈が無視できない。精密な製品にも利用可能な技術とするためには、集光径を小さくするとともに母材表面の熔融を必要最小限とし、層形成に必要な入熱量を少なくすることが重要である。それには、レーザ光の照射位置に原料粉末を正確に噴射供給し、レーザ光で直接加熱することが求められる。

そこで、本研究では、原料粉末供給とレーザ光の照射の位置関係が従来とは全く逆の方式とするマルチビーム式レーザ粉体肉盛技術を開発し、肉盛技術の高精度化を図った。以下にその詳細を述べる。

## 2. マルチビーム式レーザ粉体肉盛技術

### 2.1 レーザ粉体肉盛プロセス

レーザ粉体肉盛技術の一般的なプロセスを図1(a)に示す。ヘッド中心からレーザ光を照射して基材表面に熔融池を形成し、そこにサイドから多量の原料粉末を噴射することで、幅広で高さのある肉盛層を高速で形成する。この場合、熔融池の安定形成が重要であり、用いられるレーザ光の集光径は $\phi 1\text{mm}$ 以上と大きく、出力は $1\text{kW}$ 以上と高い。よって、対象とする製品が小型・薄肉で、求められる形状や寸法の精度が高い場合には、生じる基材の歪みや成分希釈が無視できない。

これに対して本研究では、歪みや成分希釈が少なく、小型で薄肉かつ高精度な製品への適用を図るため、マルチビーム式レーザ粉体肉盛技術を開発した。そのプロセスを同図(b)に示す。低歪な肉盛を実現するには、レーザ光の集光径を小さくして肉盛層形成に要する出力を抑えるとともに、原料粉末を微小領域に正確に供給することが重要である。同プロセスでは、狙った位

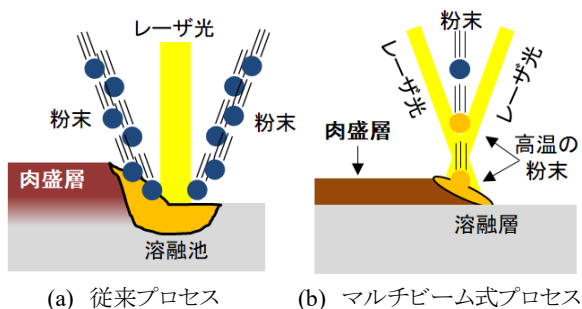


図1 各種レーザ粉体肉盛プロセス

置に正確に原料粉末を供給するため、ヘッド中心から噴射する。また、噴射された原料粉末はサイドからの複数のレーザ光によって偏りなく直接加熱され、肉盛層を形成することとした。これによって、基材表面の熔融を必要最小限にすることができ、低歪みで希釈の少ない高精度な肉盛ビードの形成が可能である。

## 2.2 装置開発

### 2.2.1 レーザ発振器およびヘッド

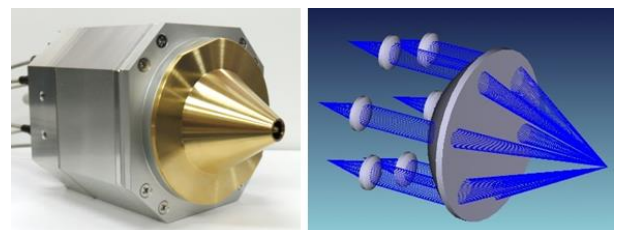
マルチビーム式レーザ粉体肉盛プロセスを実現するために製作したマルチビーム式半導体レーザ発振器とレーザヘッドを図2に示す。発振器には、コア径が $\phi 0.1\text{mm}$ の伝送ファイバがカップリングされた半導体レーザモジュール(波長:  $975\text{nm}$ , 最大出力:  $50\text{W}$ )が6個搭載されている。各モジュールで発振されるレーザ光は、それぞれ伝送ファイバを介してヘッド内に導光され、コンデンサレンズの焦点位置で1点に集光される。この集光点での $1/e^2$ で定義される集光径は $\phi 280\mu\text{m}$ である。これまでのレーザ粉体肉盛装置は、出力 $1\text{kW}$ 以上のレーザ光を $\phi 1\text{mm}$ 以上の集光径で使用することが多く<sup>6)</sup>、パワー密度が $1.27\text{W}/\text{mm}^2$ であるのに対して、マルチビーム式レーザ粉体肉盛装置は、 $4.87\text{kW}/\text{mm}^2$ と4倍のパワー密度での肉盛層形成が可能である。低出力のレーザ光でも十分に肉盛層を形成できることから、基材歪の低減が期待できる。

### 2.2.2 直噴ノズル

レーザヘッドの中央には、レーザ集光点に向かって原料粉末を噴射する口径 $\phi 0.5\text{mm}$ のノズルが組み込ま

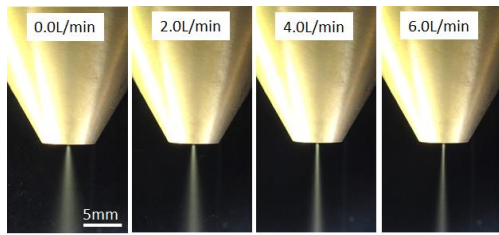


(a) レーザ発振器外観

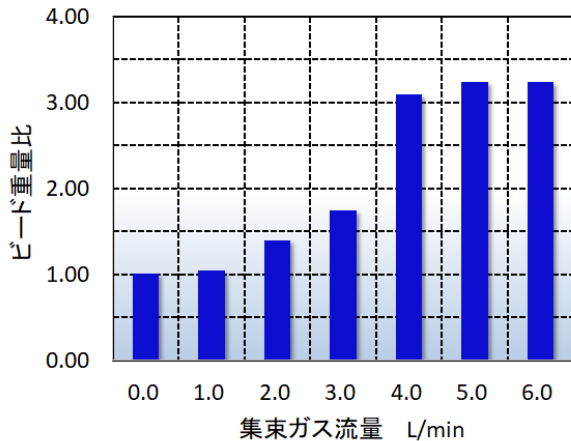


(b) レーザヘッド外観および光学系

図2 マルチビーム式半導体レーザ発振器およびレーザヘッド



(a) 噴流集束



(b) 集束ガス流量とビード重量比の関係

図3 原料粉末噴射ノズルにおける噴流集束

れている。ノズルは二重構造になっており、外縁から集束ガスを高速で流すことができる。図3(a)は、集束ガス流量を変えたときの原料粉末の噴流の様子を観察した結果である。集束ガスの流量が多い程、噴流の拡がりや抑制され、集束されていることを示している。同図(b)は、集束ガスの流量を変えて形成したビードの重量を計測し、集束ガスなしで形成したビードに対する重量比を求めた結果である。集束ガスの流量を多くする程、ビード重量は増加し、最大で3倍以上に達する。これは、噴流の集束によってレーザー光照射領域での粉末供給密度が高まり、ビード形成効率が向上したことが示された。

### 2. 2. 3 粉末供給機

マルチビーム式レーザー粉体肉盛プロセスの実現には、レーザーヘッドに対して微量の原料粉末を安定して供給する必要がある。そこで、振動によって機内の原料粉末を振り落とし仕組みの粉末供給機を製作した。粉末供給量は内部のニードルバルブの開閉によって変えることができる。供給機出口付近には、光が透過するときの減衰率を測定することで粉末供給量をモニタリングする計測ユニットが付いている。さらに、モニ

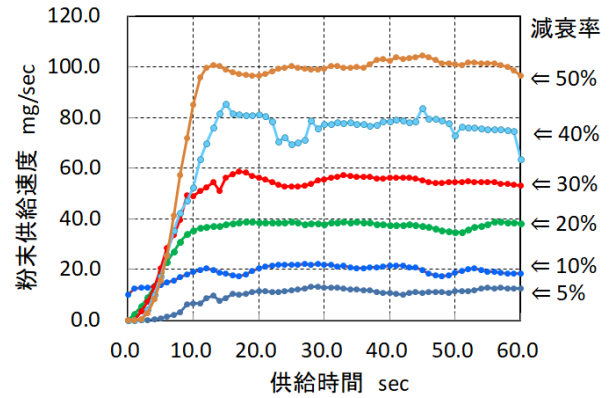


図4 粉末供給機の性能

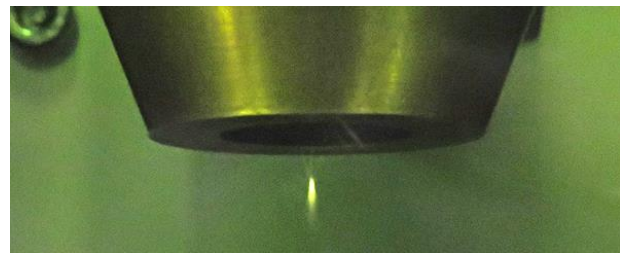


図5 噴射される原料粉末のレーザー加熱

タ信号が設定値で安定するようにニードルバルブの開閉が自動でフィードバック制御されている。図4は、光の減衰率を設定することで粉末供給量を制御し、実際に吐出される粉末の単位時間当たりの供給量を計測した結果である。粉末は安定して供給され、減衰率の設定によって単位時間当たりの供給量が自在に変えられることが示された。

### 2. 2. 4 レーザ粉体肉盛装置

マルチビーム式半導体レーザー発振器とレーザーヘッド、粉末供給機を連動させ、その動作性能を調べた。基材のない状態で、出力140Wのレーザー光を照射しながら同時に平均粒径 $\phi 40\mu\text{m}$ の合金工具鋼(SKD11)粉末を流量0.5L/minのアルゴンガスで噴射したときの様子についてIRカットフィルターを通して観察した。その結果を図5に示す。空間に細長く赤熱した部分が観察される。これは、飛行中の原料粉末がレーザー光照射によって加熱されて高温状態にあることを示唆し、レーザー光による原料粉末の直接加熱が実現できたと言える。

このシステムにXYZ軸の直交3軸に傾斜軸と回転軸の自動位置決め装置を組み合わせ、5軸制御対応のマルチビーム式レーザー粉体肉盛装置を製作した。その外観を図6示す。NCコードによってプログラム動作可能



図6 マルチビーム式レーザー粉体肉盛装置



図7 レーザ粉体肉盛サンプル

表1 主な直線状肉盛層形成条件

レーザー光出力 (W)	90, 120, 150
走査速度 (mm/sec)	5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0
粉末供給量 (mg/sec)	0, 5.4, 8.6, 14.2, 25.6, 40.0

であり、図7に示すように平面や球面に様々なパターンの肉盛層を自在に形成することが可能となった。

### 3. 肉盛層形成特性

#### 3.1 肉盛層の幅および高さ

マルチビーム式レーザー粉体肉盛装置の性能を調べるため、原料粉末に平均粒径 $\phi$ 20 $\mu$ mのコバルト合金(Stellite6)を用い、板厚2mmのステンレス鋼板(SUS304)上に表1に示すようなレーザー光出力や走査速度、粉末供給量を変えた条件で直線状の肉盛層を形成する実験を行った。性能評価は、図8に示すような断面観察から、肉盛層の幅や高さ、基材への溶け込み深さ測定により実施した。

図9に肉盛層の幅を測定した結果を示す。なお、粉末供給なしの場合は基材の溶け込み幅を示す。幅は集光径より若干小さい240 $\mu$ mを最小とし、走査速度が遅い程、レーザー光出力が高い程広くなる。一方、粉末供給量に伴う変動は小さい。よって、肉盛層の幅は、レーザー光の集光径や走査速度によって変化する基材の加

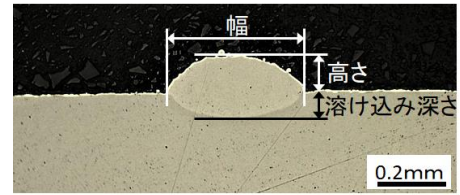


図8 肉盛層断面

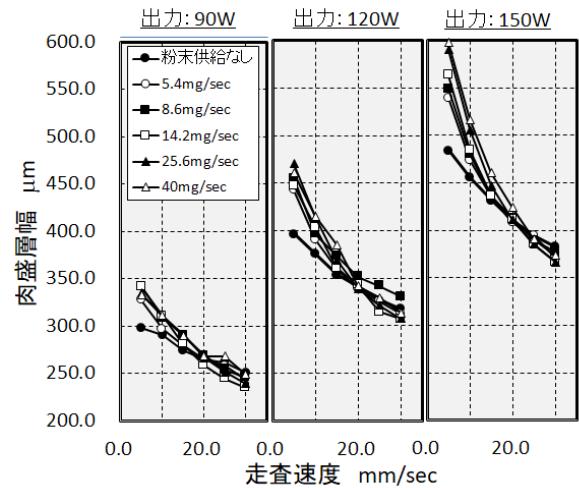


図9 レーザ光照射条件による肉盛層幅の変化

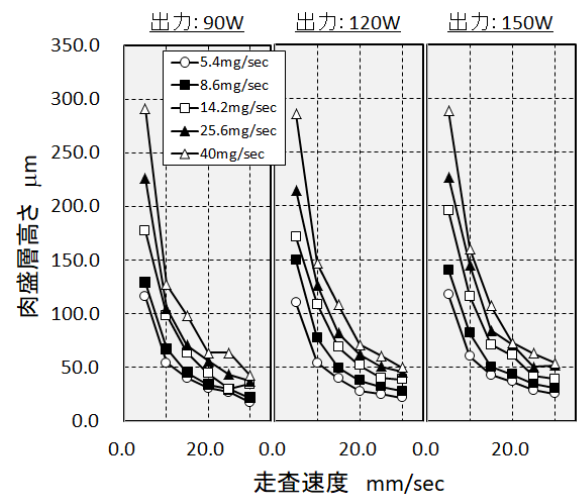


図10 レーザ光照射条件による肉盛層高さの変化

熱範囲に依存すると考えられる。

肉盛層の高さ測定結果を図10に示す。高さは、20 $\mu$ mを最小とし、走査速度が遅い程、粉末供給量が多い程高くなる傾向にある。一方、レーザー光の出力変化に伴う変動は小さい。よって、今回の条件範囲では、肉盛層の高さはレーザー光の単位走査長さあたりに供給される粉末量に依存して決まると考えられる。

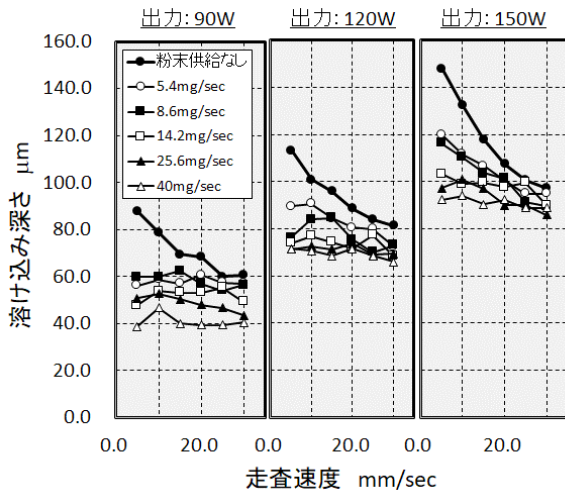


図11 レーザ光照射条件による溶け込み深さの変化

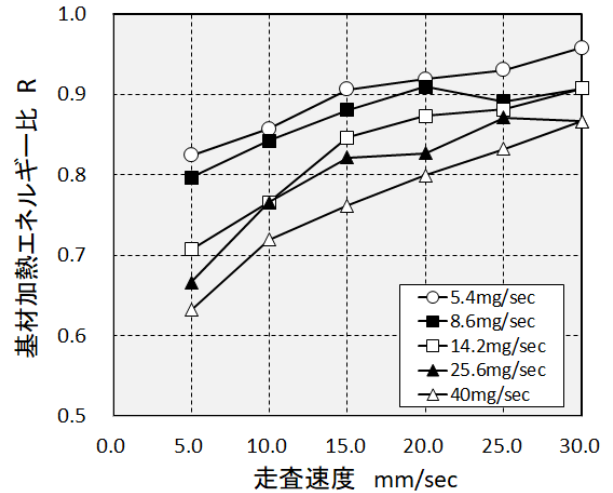


図13 基材加熱に費やされるエネルギー比 R

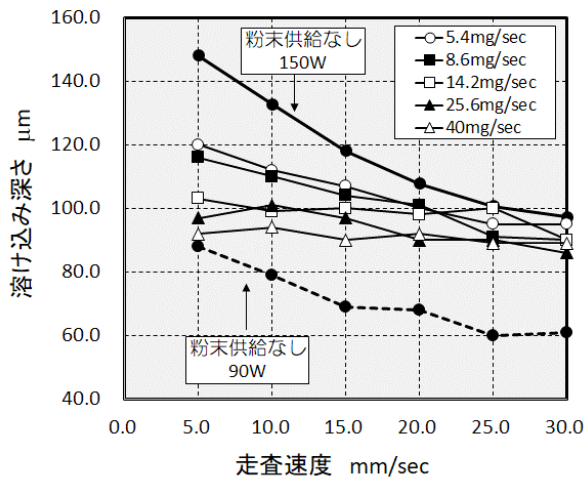


図12 粉末供給有無と溶け込み深さの変化

### 3. 2 溶け込み深さ

溶け込み深さの測定結果を図11に示す。溶け込みはレーザー光の出力が小さい程、粉末供給量が多い程浅くなり、最小で40μmである。一方、粉末供給量が少ない場合、走査速度が速い程溶け込みは浅くなる。しかし、粉末供給量が多い場合にはその傾向は見られない。レーザー光の単位走査長さあたりに供給される粉末が多くなると、レーザー光照射エネルギーの多くが肉盛層の形成に費やされ、溶け込みに必要な基材加熱に使用されるエネルギーが少なくなるためと考えられる。

図12は、レーザー光出力が150Wのときの溶け込み深さを示すグラフに粉末供給なしで出力90Wのレーザー光を照射したときの溶け込み深さを示すグラフを重ねた結果である。レーザー光の走査速度が5mm/secで供給量

が40mg/secの場合の溶け込み深さは、粉末供給なしで出力90Wのレーザー光を照射した場合とほぼ同じである。このことから、150Wの内、基材溶融に90Wのエネルギーを費やし、残りは肉盛層の形成に使用されたと考えることができる。一方、粉末供給量が少なく、レーザー光の走査が速い程、そのエネルギーは基材加熱に費やされることを示している。このように、溶け込み深さのグラフからレーザー光照射エネルギー分配状態を定量的に推測できる。そこで、投入されるレーザー光照射エネルギーの内、基材加熱に費やされるエネルギーの割合をRとして定量的に求めた結果を図13に示す。Rは0.6から1の間を推移し、走査速度が高く、粉末供給量が少ない程、1に近づく。逆に、走査速度が低く、粉末供給量が多い程、Rは小さくなり、肉盛層の形成に費やされるエネルギーが増えることが示された。

## 4. 実用性の評価

### 4. 1 シート打抜き型刃への応用

樹脂フィルムや紙などのシート材を様々な輪郭形状で打ち抜くために使用される型刃(トムソン刃)は、通常、エッチングや機械加工により製造されている。しかし、刃となる部分以外の素材の多くが廃棄されるために無駄が多い。これに対し、レーザー粉体肉盛技術を用いて刃部となる部分を肉盛すれば、除去される部分はほとんどなく、省資源化やコスト削減が期待できる。そこで、本研究で開発したマルチビーム式レーザー粉体肉盛技術の実用性を検証するため、シート打抜き型刃製造技術への適用を試みた。

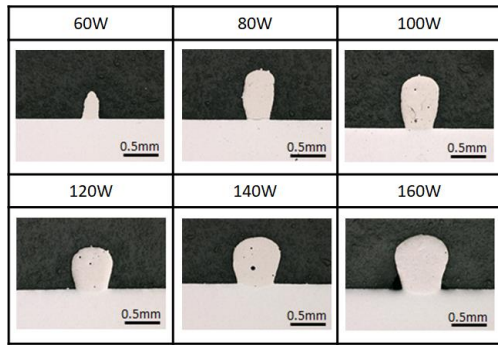


図14 各レーザー光出力で積層した肉盛層断面

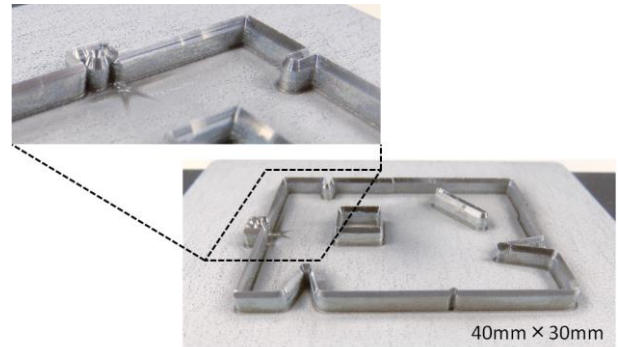


図16 試作したシート打抜き型刃

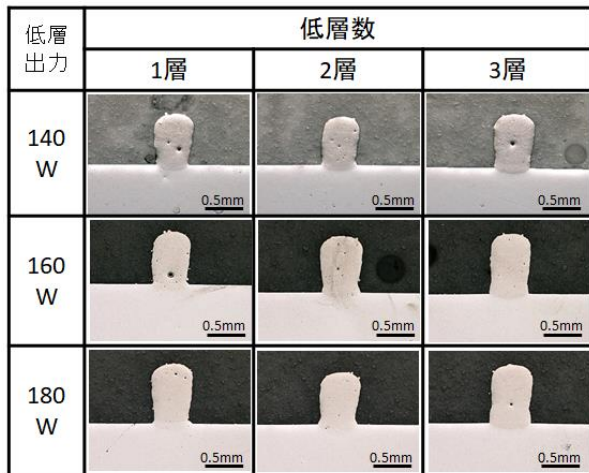


図15 積層中にレーザー光出力を変えた肉盛層断面

#### 4. 2 肉盛積層実験とその結果

シート打抜き型刃への適用を図るための基礎として、直線上の肉盛層を積層ピッチ0.1mm、積層数10層で積層する実験を行った。基材には厚さ2mmのステンレス鋼(SUS304)板を、原料粉末には平均粒径 $\phi$ 40 $\mu$ mのニッケル基自溶性合金粉末を用いた。粉末供給速度は20mg/sec、レーザー走査速度は20mm/secで一定とし、レーザー光の出力を60Wから160Wまで変化させた。図14は肉盛積層した断面を観察した結果である。いずれのレーザー光出力の場合も、積層幅は高さ方向に一定でなく、低層部において狭くなる傾向にあり、結果的に根元がくびれている。低層部では基材への熱拡散が大きく、肉盛部の温度が上昇し難いため幅狭な肉盛層になると考えられる。こうした根元のくびれは、刃部の破損の原因となる。

#### 4. 3 肉盛積層幅の均一化

肉盛積層幅の均一化には、低層においてレーザー光出

力を高める必要がある。そこで、全10層の内、1層目から最大3層目までのレーザー光出力を140Wから180Wの範囲で高くし、それ以降の残りの層については100Wに出力を下げた肉盛積層実験を行った。その結果を図15に示す。低層部でのレーザー光出力の高出力化によって肉盛幅の増加が見られる。特に、3層までのレーザー光出力を180Wに高めた場合、くびれはほぼ解消し、高さ方向に幅が一定の肉盛積層となった。

#### 4. 4 打抜き型刃の試作

30mm $\times$ 40mm $\times$ t4mmのステンレス鋼板(SUS304)基材上に、平均粒径 $\phi$ 40 $\mu$ mのコバルト合金粉末(Stellite6)を用いて、輪郭形状が複雑で幅が0.6mm、高さ4mmの薄壁を肉盛積層した。このときの積層では、粉末供給速度を20mg/sec、レーザー走査速度を20mm/sec、積層ピッチを0.1mmで一定とし、全40層の積層の内、3層目までをレーザー光出力180Wで、それ以降は140Wで行った。積層後、先端部を刃形状に機械加工し、図16に示すような打抜き型刃に仕上げた。刃部の硬度を調べた結果、HV500を超える硬さを有することがわかった。また、厚さ0.4mmのPET樹脂シートを用いて打ち抜き試験を行った結果、打ち抜き回数が1,000回を超えても加工性能を保つことが示され、その実用性を明らかにすることができた。

### 5. 結 言

レーザー粉体肉盛技術の高精度化を図るため、ヘッド中心から原料粉末を噴射し、サイドから複数のレーザー光を照射して肉盛層を形成するマルチビーム式レーザー粉体肉盛技術を考案し、そのための装置を開発した。その肉盛層形成特性を調べるとともに、その実用性を検証するため、シート打抜き型刃製造への適用を試みた。得られた結果を以下に総括して述べる。

- (1) ヘッド中心から原料粉末を噴射し、サイドから複数のレーザー光を照射して肉盛層を形成するマルチビーム式レーザー粉体肉盛装置を開発した。
- (2) ヘッド中央に配置される直噴ノズルは噴流を集束でき、集束ガスなしに比べて3倍以上の原料粉末使用効率で肉盛層形成が可能となった。
- (3) 平均粒径40 $\mu\text{m}$ のコバルト合金粉末を用いた場合、最小幅250 $\mu\text{m}$ 、最小高さ40 $\mu\text{m}$ 、最小溶け込み深さ40 $\mu\text{m}$ での肉盛層形成が可能となった。
- (4) マルチビーム式レーザー粉体肉盛技術によってシート打抜き型刃を製造することが可能であり、厚さ0.4mmの樹脂シートを打抜くことが可能となった。

### 謝 辞

本内容は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)事業(H26年度～H30年度)において実施した「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」で得られた成果である。大阪大学接合科学研究所教授塚本雅裕氏など関係各位に感謝します。

### 参考文献

- 1) 福村昌宏. 表面改質技術(薄膜, 厚膜, 溶射, 肉盛り溶接など)(II 溶接・接合プロセスとシステム化技術 第II部 溶接・接合工学の最近の動向, 溶接・接合をめぐる最近の動向). 溶接学会誌. 2005, Vol. 74, No. 5, p. 311-314.
- 2) 納富啓. 溶射技術の進展と課題. 日本機械学会論文集A編. 2005, Vol. 74, No. 738, p. 175-178.
- 3) 中村強, Bastian BECKER. レーザメタルデポジション法によるクラッディング技術開発. レーザ加工学会誌. 2014, Vol. 21, No. 1, p. 14-17.
- 4) ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2015.
- 5) 徐国建, 杓名宗春, 山田勝重. 12%Cr鋼へのステライト6合金のTIG及びレーザー肉盛に関する研究. 溶接学会論文集. 2005, Vol. 23, No. 2, p. 286-295.
- 6) 萩野秀樹, 山口拓人, 後藤光宏. ステンレス鋼へのステライトのレーザー肉盛. レーザ加工学会誌. 2014. Vol. 21, No. 1, p. 20-24.