レーザ焼結したポリアミド表面の平滑化*

—レーザによる造形物表面の再熔融手法の提案—

山内 友貴** 木暮 尊志*** 小野 澤 明 良†

Smoothing on the Surface of Polyamide Made by Selective Laser Sintering
—Investigation of the Re-Fusion Approach to the Part Surface by Laser—

Yuki YAMAUCHI, Takashi KIGURE and Akiyoshi ONOZAWA

Since Laser Sintering (LS) parts have high toughness and the high shape degree of freedom, it is beginning to be applied as a product. However its surface is rough that is approximately Ra 30 μ m. In the case of the parts which need better appearance, under the present circumstances, it is processing by machining and handwork such as sandpaper. However, in machining, it cannot respond to complicated shape, minute sections, and a free-form surface from the reasons of a tool diameter etc., and the processing by sandpaper is very inefficient. In this study, it proposed melting only the surface selectively using laser. The processing characteristic to polyamide LS parts was investigated and raster-scanning conditions were deduced. As a result of smoothing polyamide LS parts, roughness was able to be reduced to approximately Ra 0.4 μ m.

Key words: selective laser sintering, additive manufacturing, surface roughness, laser polishing, raster scanning

1. 緒 言

2009 年 ASTM に規格化された Additive Manufacturing(以下 AM)は、様々な業界・業種で急速に普及が進んでいる。特にレーザ焼結は、高靱性・高耐久性の部品を成形できるため、多品種生産や、金型では成形が難しい複雑形状の製造を望まれている。しかし製造手段としては、以下のような問題がある。それは部品の精度、意匠性、表面の粗さであるが¹⁾²⁾、なかでも表面の粗さは、粉末材料の使用や積層の原理上必ず生ずる。この粗さは、外観の劣化、摺動性悪化、破壊時のクラック発生の原因となり、現状ではサンドペーパー等を用いた手作業で研磨処理しているのが実態である³⁾。また一般的な表面処理手法である研削や研磨、切削加工では、工具形状の関係から処理ができない場合がある。以上のように、表面処理技術の未確立が AM 技術による製品生産の実用化に大きな障害となっている。

一方、近年では AM 品に対してレーザを用いた表面改質が報告されている⁴⁾⁵⁾。レーザは工具形状等を考慮する必要がなく、表面のみを選択的かつ効率的に処理できる。そのため、美的外観を必要とする外装や、人が直接触れる部分、他の部品と摺動する部分の処理に有効である。しかしながら過去の報告は、製品製造が前提である金属を対象としている。現状で樹脂 AM 品に対し、機械加工による粗さの低減については報告⁷⁾⁸⁾があるが、レーザによって表面改質した報告はほとんど無い。以上の理由から、レーザによる効率的な平滑化技術の構築が必要である。

本研究では、樹脂 AM 品の表面処理技術を開発することで、試作品の高品質化、AM 製品の機能向上を目的としている。そのために、レーザを用いた非接触加工について平滑化の条件を探索し、さらに効果を確認したので報告する。

2. 単線加工時の溶融量

2.1 単線加工の方法

実際にレーザを照射して平滑化する場合は、単線加工を繰り返し行うラスタ走査により面の加工をするが、その単線の幅や深さが重要な要素である。本項では、樹脂 AM 試料への加工特性を把握するため、レーザを走査し加工部の観察を行った。加工する単線は、より広い幅で、ごく表層のみが溶融する条件が理想である。この条件を探索するため、本研究ではレーザの焦点をデフォーカスすることを試みた。加工には、ポリアミドへの吸収率が高く、レーザエネルギーが熱に変換されやすい 10.6 μ m の CO₂ レーザ(トロテック社製 Speedy 400 flexx)を用いた。

加工条件を表 1 に示す。焦点距離の異なる 2 種類のレンズを使用し、それぞれレーザ出力、走査速度、デフォーカス距離を変化させて実験を行った。本論文では、レーザの発振周波数を 1000 Hz、パルス数を 1000 PPI (Pulse Per Inch)として実験した。

Table1 Processing conditions

Condition	A ₁	B ₁	C ₁
Focal length of lens mm	38.1	38.1	101.6
Scanning speed mm/s	8.87	26.63	8.87
Defocus length (Z) mm	0.0, 1.9, 4.8, 9.5		0.0, 14.2, 35.6, 71.2
Laser power W	10, 30, 50, 70, 90

Fig.1 Conceptual diagram of laser

Fig.2 Processed width and depth

* 原稿受付 平成 28 年 6 月 21 日

掲載決定 平成 28 年 9 月 30 日

** 正 会 員 東京都立産業技術研究センター (東京都江東区青海 2-4-10)

*** 東京都立産業技術研究センター城東支所 (東京都葛飾区青戸 7-2-5)

† 東京都立産業技術研究センター多摩テクノプラザ (東京都昭島市東町 3-6-1)

単位面積当たりのエネルギー供給量 E_a は、レーザ出力を P 、走査速度を V 、走査線の間隔を S とすれば、式(1)で計算できる。これを単線の走査とすると、式(2)の単位長さあたりのエネルギー供給量 E_l になる。

$$E_a = \frac{P}{V \cdot S} \quad (1)$$

$$E_l = \frac{P}{V} \quad (2)$$

デフォーカス時のビーム直径は、まず式(3)で焦点におけるビーム直径 $\varphi_{(0)}$ を求め、 Z mm デフォーカスさせた場合のビーム直径 $\varphi_{(z)}$ を式(4)⁹⁾より算出した。このとき λ はレーザ波長で $10.6 \mu\text{m}$ 、 f は焦点距離、 $M^2 = 1.2$ 、 D を集光前の直径とした。

$$\varphi_{(0)} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi D} \quad (3)$$

$$\varphi_{(z)} = Z \cdot \frac{8\lambda}{\pi(\varphi_{(0)})^2} \quad (4)$$

焦点におけるビーム直径は、条件 A₁、B₁ で約 $250 \mu\text{m}$ 、C₁ で約 $660 \mu\text{m}$ である。デフォーカス距離を調整し、加工部のビーム直径がおおよそ $1000 \mu\text{m}$ 、 $2000 \mu\text{m}$ 、 $4000 \mu\text{m}$ となるようにした。図 1 にレーザ平滑化の概念図を示す。

試料は、平均粒径 $50 \mu\text{m}$ の PA11 粉末(アスペクト社製 Aspex-FPA)を、造形機(アスペクト社製 RaFaEl-300F)でレーザ焼結した。試料は $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ として、積層方向に厚さ (2 mm) 方向を配置した。加工面は $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の面とした。

加工後の評価は、目視と SEM(日立ハイテクノロジー社製 TM3030Plus)によって溶融状態を確認した。また、マイクロ스코プ(HIROX 社製 KH-8700)を用い、加工部の幅や深さについて計測した。図 2 に加工部の走査方向に対する断面図のイメージを示す。幅と深さは未加工部よりも深い部分の幅を加工部の幅、最大深さを加工部の深さとした。

2.2 実験結果および考察

条件 A₁、レーザ出力 $P = 50 \text{ W}$ において、デフォーカス距離 Z による加工部の変化について観察した SEM 写真を図 3 に示す。画像中央に見える横線が加工部であり、溶融することで粉末同士が溶着していることがわかる。デフォーカスすると溶融した幅が大きくなっていくが、 $Z = 9.5 \text{ mm}$ では溶融の幅が増加しなかった。ビーム直径が広がることでビームスポットにおける面積あたりのレーザパワーが低下するため、溶融の閾値を越える部分が増加しなかったと考えられる。一方、加工部を肉眼で確認すると $Z = 9.5 \text{ mm}$ が最も幅が大きい。これは、まずレーザ照射で微小な形状変化が生じ、光の反射率や反射方向が変化する。それらが規則的な直線上に集合していることにより、目視できたと考えられる。

条件 A₁、 $Z = 9.5 \text{ mm}$ において、レーザ出力 P と加工部の変化について観察した SEM 写真を図 4 に示す。 $P = 10 \text{ W}$ の条件は SEM、肉眼ともに加工部が確認できなかった。図 5 に加工部の写真を示す。図のとおり $P = 30 \text{ W}$ は、肉眼では加工部が確認できるが、SEM ではレーザ照射部と未照射部の境界の判別が困難であった。前述のとおり溶融する閾値は超えていないが、微小な形状変化は起きていると考えられる。 $P = 70 \text{ W}$ で加工部に微細なホールが観察されるが、 $P = 90 \text{ W}$ では数 μm ～数十 μm 程度のホールが確認された。レーザ出力が高い条件のほうが大きいホールが観察された理由を以下に示す。小さなホールの生成原

因は、樹脂溶融後に流動しきらずに生成されたと考えられる。 $P = 90 \text{ W}$ では、出力増加によって溶融領域が増える一方で、 $Z = 9.5 \text{ mm}$ とデフォーカス量が大きく深さ方向の溶融量が増えにくかったため、局所的に溶融樹脂が不足したと推測される。

条件 A₁ と B₁ の違い、すなわち走査速度の違いとして、SEM 写真を図 6 に示す。条件 A₁ で $P = 30 \text{ W}$ 、条件 B₁ の $P = 90 \text{ W}$ 、両者とも $E_l = 3.38 \text{ J/mm}$ となる条件で比較した。結果として、 E_l が同じであれば、デフォーカス量が変わっても似通った加工結果になった。ただし、A₁ よりも B₁ の条件のほうがより溶融しており、走査速度よりもレーザ出力への依存性が高いことが確認された。

条件 A₁ と C₁ を比較する。レンズの焦点距離による違いとして、理論上同じレーザビーム直径である $P = 90 \text{ W}$ 、 $Z = 4.8 \text{ mm}$ (条件 A₁)、 35.6 mm (条件 C₁)、走査速度 $S = 8.87 \text{ mm/s}$ について比較する。図 7 のように SEM 写真で比較すると、条件 A₁ のほうがより溶融しているように見える。ビーム直径は同程度でも、焦点深度が浅く 3 次元的なエネルギー密度の高い A₁ のほうがよく溶融したと考えられる。

加工が確認できた条件について、加工部の幅と深さを測定した。横軸をレーザ出力として、図 8 の a) に幅、b) に深さの結果を示す。全体の傾向としては、レーザ出力が高いほど幅よりも深さが増加し、デフォーカスするほど幅が広くなり、深さが浅くなる結果となった。 $P = 10 \text{ W}$ ではどの条件においても加工部と未加工部の境界について判別できず、幅、深さともに測定することができなかった。条件 C₁ は、デフォーカスすると図 5 の $P = 30 \text{ W}$ の条件に見られるような加工となり、肉眼で加工部の幅が広がっていることは観察できるが、マイクロ스코プで境界を特定することは困難である結果が多かった。

加工部のビーム直径と加工形状について考察する。焦点での加工の場合、理論値に近い加工幅となっており、出力を増加しても加工幅があまり増えず、深さが増す傾向である。対してデフォーカスさせて加工した結果は、レーザ出力に応じて加工幅が増す傾向となった。デフォーカスすることによってビーム直径が最大 $4000 \mu\text{m}$ まで広がるため、レーザ出力が高くなることで溶融する部分が広がったと考えられる。

以上の結果から、平滑化に有用と考えられる条件は、条件 A₁ で $Z = 4.8 \text{ mm}$ と、条件 C₁ で $Z = 35.6 \text{ mm}$ であった。どちらの条件も幅が広く、深さが浅い加工部が得られ、かつ溶融が確認できた条件である。

Fig.3 SEM of processing area by condition A₁, $P = 50 \text{ W}$

Fig.4 SEM of processing area by condition A₁, $Z = 9.5 \text{ mm}$

Fig.5 Picture of processing area by condition A₁, Z = 9.5 mm

Fig.6 SEM of processing area $E_1 = 3.38 \text{ J/mm}$

Fig.7 SEM of processing area $P = 90 \text{ W}$

(a) Relation between processing width and laser power

(b) Relation between processing depth and laser power

Fig.8 The graph of the measurement result of processing area

3. ラスタ加工による面の平滑化

3.1 平滑化の方法

面の平滑化は、単線の走査を一定間隔で繰り返すラスタ走査によって行った。加工面積を $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ とし、表 2 に示す条件で加工した。本実験では、前章の単線の加工結果において、平滑化に有用であると考えられる条件を選定した。選定した条件において単線加工した場合、前章の結果から加工幅が $200 \mu\text{m} \sim 800 \mu\text{m}$ である。走査が重なる割合をオーバーラップ率 O とし、単線加工時の加工幅を W 、走査線の間隔を S とすれば式(5)より算出できる。本実験における加工部のオーバーラップ率は、約 40 % から最大で約 94 % となる。このとき、ビーム直径のオーバーラップは、条件 A₂、C₂ とともに約 90 % から 98 % である。

$$O = \frac{W - S}{W} \times 100 \% \quad (5)$$

試料は、前章と同条件で造形した。 $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ の板形状について、造形時にモデルデータの角度を変えて配置した。この際、試料の加工部分は、 $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の面として統一した。このときレーザ照射方向は、上記の面に対して常に垂直方向とした。平面方向を xy 、積層方向を z 、回転角度をそれぞれ α 、 β 、 γ とし、モデルを図 9、表 3 に示す配置で造形した。 xy 平面に試料が水平になるよう配置した試料を配置方向 a とし、加工面を xy 平面と垂直に配置した試料を配置方向 b、 y 軸を基準に 45° に回転させた配置方向 c、 x 軸と y 軸両方に 15° に回転させた配置方向 d の試料についても造形した。これは実際の AM 造形品が複雑な形状をしており、AM 造形品の面が意図せずに様々な方向に配置されるためである。図 10 に面の傾斜と積層段差の断面イメージを示す。配置方向 c、d の条件は加工面に積層段差が大きくなるため、検証する意味がある。表面粗さの測定には、レーザ顕微鏡(オリンパス社製 LEXT-OLS4000)を用いた。造形後の試料は JIS B 0601 に準拠して算術平均粗さ R_a を測定した。なおレーザ加工部の表面粗さについては、加工部中央とその両端部分について、走査方向に対して横断方向に異なる 3 か所ずつ計 9 回測定し、平均値を算出した。

Table 2 Processing conditions

Condition	A ₂	C ₂
Focal length of lens mm	38.1	101.6
Scanning speed mm/s	8.87	8.87
Defocus length (Z) mm	4.8	35.6
Scanning pitch μm	50, 101, 203	
Laser power W	30, 50, 70, 90

Fig.9 Orientation of specimens

Table3 Orientation of specimens

Orientation	α°	β°	γ°
a	0	0	0
b	0	90	0
c	0	45	0
d	15	15	0

Fig.10 Image of building step

3.2 実験結果および考察

表4に試料の配置方向と積層段差間の距離とを併せて示す。

造形後の表面粗さは、Ra 30 μm 前後となっていた。傾斜させた条件は、積層段差によってRaが粗い状態となっていることがわかる。図11に試料の配置方向における顕微鏡写真を示す。傾斜させた試料は、積層による段差が観察され、この段差が表面粗さに影響を及ぼしていると考えられる。

加工後の表面写真を図12に示す。画像左上部分から走査を開始し、画像中央部の光沢部分が加工エリアである。加工部は未加工部よりも深くなっており、凹形状であった。レーザによって表面の密度が向上していると考えられる。その深さは、0.5 mm～1.5 mm 程度であった。すなわち、試料の外寸が小さくなることを意味している。実製品の平滑化を行う場合は、余剰部分を設けて造形する必要がある。エネルギー供給量を増やす、すなわちレーザ出力を大きくする、もしくは走査線間隔Sを小さくすると、加工部の光沢が増えていく傾向となった。これは粉末や積層段差等の凹凸が平滑化されたことで、自然光などの反射が強くなったためであると考えられる。さらにエネルギーを増大していくと、熔融した樹脂が加工部境界を越えてあふれてしまう結果となった。とくにS=50 μm では、あふれた樹脂の量が多くなった。樹脂が加工領域からあふれた条件では、加工部が半球面のような凹形状となっており、加工前の形状を保つことができなかった。この理由として、溶融量が増え流動性が高くなった状態に、レーザが何度も繰り返し照射されることで、少しずつ加工部の外へ樹脂が押し出されていったと考えられる。

加工条件と表面粗さの結果について図13に示す。なおS=50 μm 、P=90 Wの条件は、加工部の傾斜により粗さを測定することができなかったため記載していない。加工部境界から溶融した樹脂がはみ出さず、かつ最も粗さが低減した結果は、条件A₂のレーザ出力P=50 W、走査線間隔S=101 μm でRa 0.4 μm 程度となった。エネルギーが30 kJ/m²から50 kJ/m²まではエネルギーが増えるにしたがって粗さが低減する一方、さらにエネルギーが高くなると粗さが増加する傾向がみられた。条件A₂では、走査線間隔Sにおいても同様の傾向で、S=101 μm までは粗さが改善するが、さらに密なS=50 μm では粗さが悪化した。オーバーラップ率と表面粗さの関係について図14に示す。条件A₂、C₂ともにオーバーラップ率が80%前後で表面粗さが最も改善した。さらにオーバーラップ率が高くなると、表面粗さが粗くなっていることが確認できる。オーバーラップ率が高くなりすぎた場合、既にピークまで粗さが低減した部分に再度レーザが

照射されるため、凹凸が生じて粗くなると考察する。

図15に条件A₂、S=101 μm で加工した試料の配置方向と粗さの関係を示す。今回実験した配置角度では、到達する粗さはRa 0.4 μm 前後と同程度となったが、最も粗さが低減した際のレーザ出力に違いが生じた。配置方向a、bの試料ではP=50 Wで最も粗さが低減したが、配置方向cの試料では、P=70 W、配置方向dの試料ではP=90 Wの条件が最も粗さが低くなった。初期の粗さが粗い試料の平滑化には、より高いエネルギーが必要であると考えられる。配置方向c、dの試料には積層段差が大きく生じており、この段差を埋めるためにより多い溶融量が必要になったと考えられる。実際の立体物は様々な面を有しているが、本研究の結果から条件A₂、S=101 μm 、P=70 Wで加工することで、各面の粗さが近い値となると考えられる。

Table4 Surface condition of a specimen (unit: μm)

Orientation	Stair step	Surface roughness Ra
a	-	23.57
b	-	29.62
c	100	32.44
d	260	32.87

Fig.11 Microphotograph of specimen surface

Fig.12 Picture of processing area

Fig.13 Relation between surface roughness and energy per unit area (Orientation: specimen a)

Fig.14 Relation between surface roughness and overlapping rate

Fig.15 Relation between surface roughness and specimen orientation

Fig.16 Tensile test specimen (thickness 2mm)

Table5 Processing conditions		
Condition	A ₃	C ₃
Focal length of lens mm	38.1	101.6
Scanning speed mm/s	8.87	8.87
Defocus length mm	4.8	35.6
Scanning pitch μm	101	203
Laser power W	50	50

4. 平滑化による強度向上

4.1 試験片の作製と強度試験方法

試料表面を平滑化することで、破壊につながるクラックが発生しにくくなると予想される。すなわち、平滑化と同時に造形物の機械的性質向上が図れていると推測し、引張試験による確認を行った。樹脂のAM造形品は、配置方向で強度や伸びの異方性が出るということがわかっている¹⁰⁾。そこで本章では、図9における配置方向bで短冊形状を造形し、側面を切削することで図16に示すJIS K7139 縮尺試験片を製作した。作製した試験片は、表5に示す条件を用い、表面と裏面を平滑化した。引張試験機(TENSILON RTF-1210)を用い、JIS K7161に準拠した実験を行った。クロスヘッドの引張速度は2 mm/sとした。

4.2 実験結果および考察

平滑化した試験片の表面粗さを図17に示す。同じ加工条件であるにもかかわらず、前章で加工した条件よりも粗さが低減しなかった。前章との大きな違いは、加工面積である。前章は5 mm×5 mmの領域に対して、本章では、90 mm×12 mmの領域を加工している。加工する面積が広くなると、走査と走査の間の待ち時間が増えるため、レーザの熱が周囲もしくは加工雰囲気中に逃げると考えられる。熱が逃げることで溶融する領域が減り、粗さが改善しにくかったと考えられる。

引張試験の結果を図18に示す。平滑化することで1割程度強度が向上した。破断ひずみについても、平滑化した試験片のほうが高い値を示した。条件ごとに比較すると、条件A₃のほうが引張強度、破断ひずみともに高い値となった。この関係は、表面粗さの結果と同様である。粗さが低いことによって表面での応力集中が起こりにくいため、クラックが入りにくく伸びやすかったと考えられる。以上のように、レーザによる平滑化がAM造形品の強度の向上に効果がある可能性を示した。

Fig.17 Surface roughness of tensile test specimens

Fig.18 Result of tensile test

5. 結 言

本研究では、樹脂粉末をレーザー焼結した試料に対して、表面処理技術のひとつとしてレーザーによる平滑化を提案し、実験によって有効性を実証した。今後は、曲面のレーザー平滑化へのアプローチを行うことで、実製品への適用と、その範囲の拡大に寄与することができる。本研究の成果を以下に示す。

- (1) デフォーカスし、レーザー出力を調整することによって、1回のライン走査加工時の幅と深さを調整することができた。その結果、1回で平滑化できる領域が広がるだけでなく、試料の寸法変化を小さくすることができた。
- (2) 焦点距離38.1 mmのレンズで4.8 mmデフォーカスを行い、レーザー出力50~70 W、走査間隔101 μm で加工することでRa 0.4 μm まで低減できた。
- (3) 造形時の配置方向によって試料の表面粗さはRa 5~10 μm 程度異なっていたが、条件を調整することでどの試料もRa 0.5 μm 以下の表面を得られた。
- (4) 加工部のオーバーラップ率、すなわち平滑化時に投入するエネルギーが高くなるにつれて表面粗さは改善し、オーバーラップ率が80 %程度でピークとなる。
- (5) 表面を平滑化することによって、引張強度が向上する可能性を示した。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 平成26年度奨励研究助成の補助を受けて実施しました。ここに感謝の意を示します。

参 考 文 献

- 1) 山内 友貴, 小金井 誠司他: 粉末焼結型AM技術におけるそのの測定と補正, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015), 539.
- 2) 小野澤明良, 村井まどか他: ナイロン粉末焼結型積層造形品への塗装技術の開発, 日本デザイン学会第61回春季研究発表大会概要集, (2014).
- 3) 中川威雄: 積層造形法の応用分野, レーザー研究, **24**, 4, (1996), 443.
- 4) J.A. Ramos-Grez, D.L. Bourell: Reducing surface roughness of metallic freeform-fabricated parts using non-tactile finishing methods, International Journal of Materials and Product Technology, **21**, (2004), 297.
- 5) A. Lamikiz, J.A. Sa'nchez et al.: Laser polishing of parts built up by selective laser sintering, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **47**, (2007), 2040.
- 6) B.Rosa, et al., Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, **27**, (2015), S29102.
- 7) I. Gibson, D. Shi: Surface Finishing of Selective Laser Sintering Parts with Robot, Proceedings of the 9th Solid Freeform Fabrication Symposium, (1998), 27.
- 8) P. Delfs, Z. Li, et al.: MASS FINISHING OF LASER SINTERED PARTS, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, (2015), 514.
- 9) 杉岡幸次, 中田芳樹他: 最新レーザープロセッシングの基礎と産業応用, 電気学会, (2007), 66.
- 10) C. Majewski, N. Hopkinson: Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of laser sintered nylon12 parts, Rapid Prototyping Journal, **17**, 3, (2011), 176.