

粉末焼結法による積層造形品へのレーザー表面改質技術の探索

(地独) 東京都立産業技術研究センター 事業化支援本部技術開発支援部

副主任研究員 山内 友貴

(平成 26 年度奨励研究助成 AF-2014224)

キーワード：付加製造，レーザー焼結，レーザー研磨

1. 研究の目的と背景

近年、積層造形装置は3Dプリンタと呼ばれ、様々な業界・業種で急速な普及・利用が始まっている。ASTM Internationalにおいては、この加工法をAM (Additive Manufacturing) として規格化した。AM技術のなかでもレーザー焼結は、射出成形品に近い強度、靱性、耐久性を持った部品を製作することができる。さらにワークスペース内にデータを3次元的、多段的に配置できるため、少量であれば金型よりも安く、早く生産することができる。しかしAM技術の現状の活用方法は、機能・意匠モデル等、試作までである。これは、部品表面の粗さが問題となるためである。この粗さは、積層段差や粉末材料の使用によって発生し、外観劣化や、摺動性悪化、強度低下といった点で製品として適していない。この粗さを処理するには後加工が必要であり、課題となっている。現在ではサンドペーパーを用いた手作業で研磨処理しており、生産効率が極めて悪い。また処理の具合が毎回異なるため、厳密に言えば同一のものを生産できないといった欠点もある。表面処理技術は従来、研削や研磨、切削加工が用いられ、一部自動化されている。しかしAM技術に対して従来方法では、工具形状の関係などから、エッジや自由形状を処理できない場合が多い。すなわち、第三の加工法とも呼ばれる画期的なAM技術ではあるが、表面処理技術の未確立が、製品製造にあたっての大きな障害となっている。

一方、AM技術の表面処理法として、レーザーによる表面改質が報告されており興味深い²⁾³⁾。レーザーは工具形状等を考慮する必要がなく、表面のみを処理できるため、形状自由度の高い部品の作製を得意とするAM技術に対して有効であると考えられる。しかしながら非接触加工であるゆえに、部材ごとに改質条件の探索が必要であるが、過去の報告は金属を対象としており、樹脂に対する検討はほとんど行われていない。本研究では、AM技術のメリットをさらに生かし、製品製造を促進させることを目的として、レーザーによる樹脂AM品に対する表面平滑化を提案した。まず材料の加工特性を把握するための実験を行い、探索した条件で平滑化を実施したので報告する。

2. 加工特性の把握

2.1 単線加工による実験方法

実際にレーザーを照射して平滑化する場合は、単線加工を繰り返

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、レーザー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、ごく表面のみが熔融する条件が理想である。この条件を探索するため、本研究ではレーザー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いCO₂レーザー(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、それぞれレーザー出力、デフォーカス距離を変化させて実験を行った。デフォーカス時のビーム直径は、まず(1)式で焦点におけるビーム直径 $\varphi(0)$ を求め、Zmmデフォーカスさせた場合のビーム直径 $\varphi(z)$ を(2)式⁴⁾より算出した。このとき λ はレーザー波長で10.6 μ m、fは焦点距離、 $M^2=1.2$ 、Dを集光前の直径とした。焦点におけるビーム直径は、条件①で約250 μ m、②で約660 μ mである。デフォーカス距離を調整し、加工部の焦点直径をおよそ1000 μ m、2000 μ m、4000 μ mとした。

$$\varphi(0) = \frac{4\lambda f M^2}{\pi D} \quad (1)$$

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

表1 実験条件

条件	①-1	②-1
レンズ焦点距離 [mm]	38.1	101.6
走査速度 [mm/s]	8.87	8.87
デフォーカス距離 (Z) [mm]	0.0, 1.9, 4.8, 9.5	0.0, 14.2, 35.6, 71.2
レーザー出力 [W]	10, 30, 50, 70, 90	
1インチあたりのパルス数	1000	

試料は、平均粒径50 μ mのPA11粉末(アスペクト社製Aspex-FPA)を、造形剤(アスペクト社製RaFaEl-300F)でレーザー焼結した。試料は70mm×30mm×2mmとして、積層方向に厚さ(2mm)方向を配置した。加工する面は70mm×30mmの面とした。

加工後の評価は、肉眼での目視とSEM(日立ハイテクノロジー

ズ社製 TM3030Plus)によって溶融状態を確認した。また、マイクロSCOPE(HIROX 社製 KH-8700)を用い、加工部の幅や深さについて計測した。

2.2 実験結果および考察

条件①-1, 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 1 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。ビーム径が広がることでレーザのエネルギー密度が低下するため, 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, 肉眼で目視できたと考えられる。

条件①-1, $Z=9.5\text{mm}$ 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 2 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。 $P=30\text{W}$ は図 3 に示すとおり, 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。 $P=90\text{W}$ では加工部に数 μm ~ 数十 μm 程度のホールが確認された。これは粉末の溶融時, 流動して粉末同士の隙間を埋めるが, 流動しきらないことで生じたと考えられる。条件①-1 と②-1 を比較する。理論上同じレーザスポット直径である $P=90\text{W}$, $Z=4.8\text{mm}$ (条件①-1), 35.6mm (条件②-1)について比較する。図 4 のように SEM 写真で比較すると加工幅に大きな差異はみられないが, 条件①-1 の方がより溶融しているように見える。

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 5 の a) に深さ, b) に幅の結果を示す。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②-1 は, デフォーカスすると図 3 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SCOPE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①-1 で $Z=4.8\text{mm}$ と, 条件②-1 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。

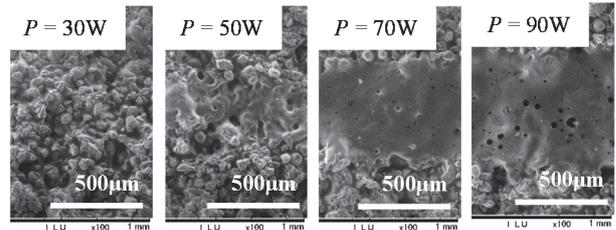


図 1 条件①-1 レーザ出力 $P=50\text{W}$ による加工部

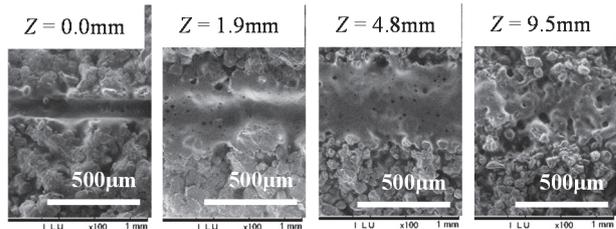


図 2 条件①-1 デフォーカス距離 $Z=9.5\text{mm}$ による加工部

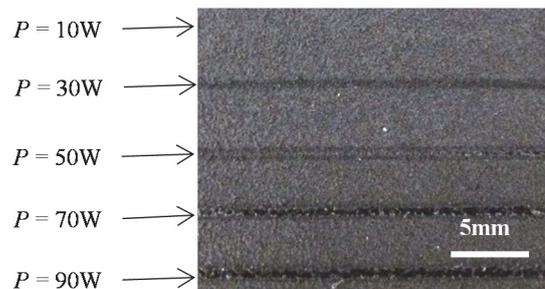


図 3 条件①-1 デフォーカス距離 $Z=4.8\text{mm}$ による加工部

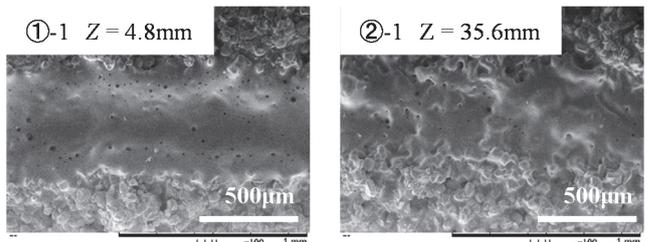
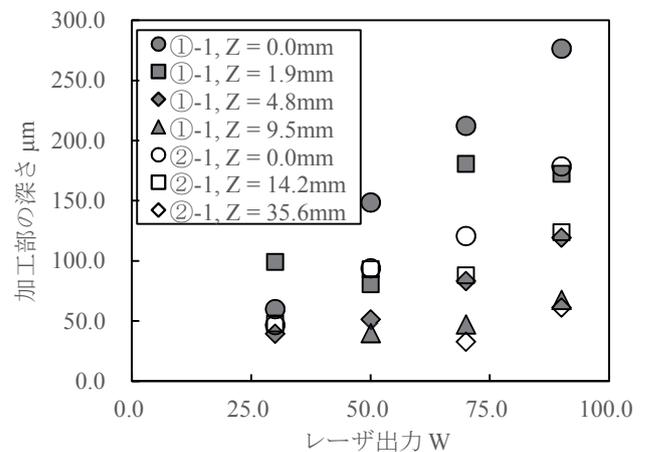
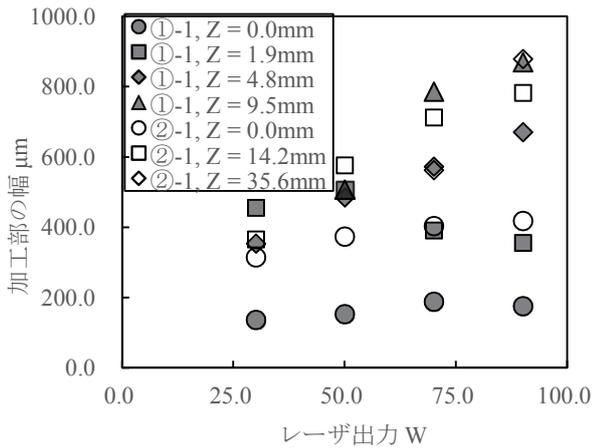


図 4 レーザ出力 $P=90\text{W}$, スポット径 $\phi=2000\mu\text{m}$ (理論値)



a) 加工深さとレーザ出力



b) 加工幅とレーザ出力
図5 加工部の測定結果

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、ラスタ走査によって行った。加工面積を5mm×5mmとし、表2に示す条件で加工した。試料は、前章と同条件で造形した。70mm×30mm×2mm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、70mm×30mmの面として統一した。平面方向をxy、積層方向をz、回転角度をそれぞれ α 、 β 、 γ として、モデルを図6、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a、加工面をxy平面と垂直に配置した試料をb、y軸を基準に45°に回転させた試料をc、x軸とy軸両方に15°回転させた試料をdとした。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。配置方向c、dの条件は設計上の端部の角度が、水平方向に対して浅くなるため、加工面に図7に示すような積層段差が大きくなる。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Ra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、走査方向に対して垂直方向に3回ずつ計9回測定し、平均値を算出した。

表2 ラスタ加工条件

条件	①-2	②-2
レンズ焦点距離 [mm]	38.1	101.6
走査速度 [mm/s]	8.87	8.87
デフォーカス距離 (Z) [mm]	4.8	35.6
走査線の間隔 [μ m]	50, 101, 203	
レーザ出力 [W]	30, 50, 70, 90	
1インチあたりのパルス数	1000	

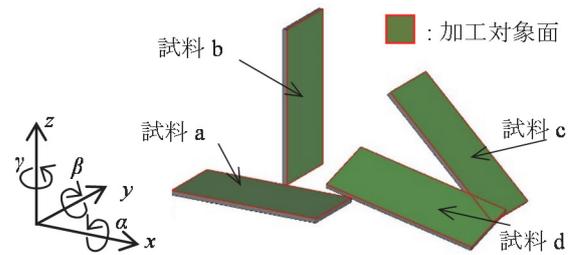


図6 平滑化の対象となる試料の配置方向

表3 各試料の配置角度

試料	α [°]	β [°]	γ [°]
a	0	0	0
b	0	90	0
c	0	45	0
d	15	15	0

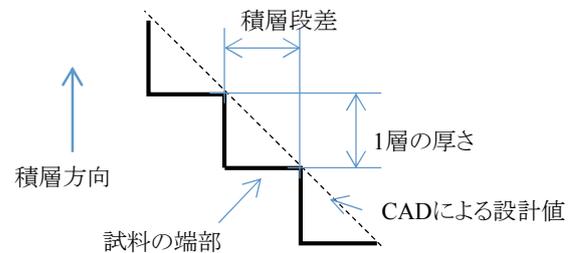


図7 積層段差と角度

3.2 実験結果および考察

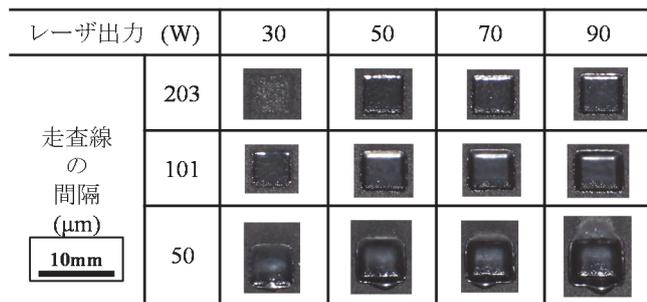
表4に試料の配置方向と積層段差間の距離とを併せて示す。造形後の表面粗さは、Ra 30 μ m前後となっていた。傾斜させた条件は、積層段差によってRaが粗い状態となっていることがわかる。加工後の表面写真を図8に示す。画像中央部の点線で囲まれた領域が加工エアリアである。エネルギー供給量を増やす、すなわちレーザ出力を大きくする、もしくは走査線間隔Sを小さくすると、加工部の光沢が増えていく傾向となった。これは粉末や積層段差等の凹凸が平滑化されたことで、自然光などの反射が強くなったためであると考えられる。さらにエネルギーを増大していくと、熔融した樹脂が加工部境界を越えて流れ出てしまう結果となった。とくにS=50 μ mでは、樹脂の流出が顕著となった。熔融した樹脂が流れ出た条件では、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て照射されることで、少しずつ加工部の外へ樹脂が流出し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9に示す。なおS=50 μ m、P=90W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。加工部境界から熔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①-2を用い、レーザ出力P=50W、走査線間隔S=101 μ mでRa

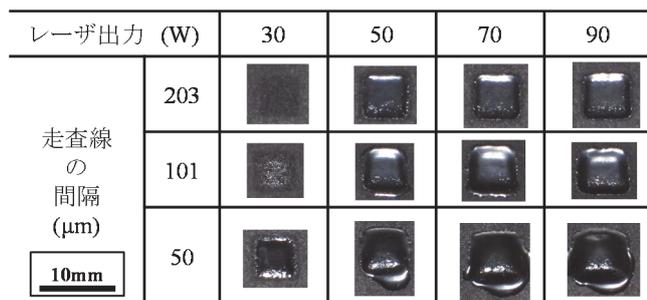
0.4 μm 程度となった。全体の傾向として、レーザー出力が増えるにしたがって粗さが低減し、さらにレーザー出力が高くなると逆に粗くなった。走査線間隔 S においても同様の傾向で、 $S=101\mu\text{m}$ までは粗さが改善するが、さらに密な $S=50\mu\text{m}$ では粗さが悪化した。今回実験した配置角度では、到達する粗さは R_a 約 0.4 μm 前後と同程度となったが、最も粗さが低減した際のレーザー出力に違いが生じた。a, b の試料では $P=50\text{W}$ で最も粗さが低減したが、配置方向 c の試料では、 $P=70\text{W}$ 、配置方向 d の試料では $P=90\text{W}$ 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。加工前後の寸法変化を確認するため、試料 a における加工部の深さを測定した。図 10 に結果を示す。粗さが最も低減した加工部の深さは 1000 μm であった。加工前の R_a が 30 μm 程度であることを考えれば、大きい値である。これは平滑化によって部分的に密度が向上したためだと考えられる。言い換えれば、平滑化する試料に 1000 μm 程度の余裕を持たすことで、設計値に近くなる。

表 4 加工前の試料の表面粗さ

試料	積層段差の距離 μm	表面粗さ (R_a) μm
a	-	23.57
b	-	29.62
c	100	32.44
d	260	32.87

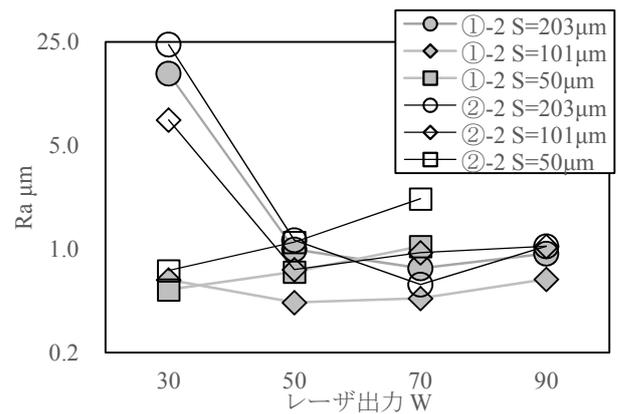


a) 条件①-2

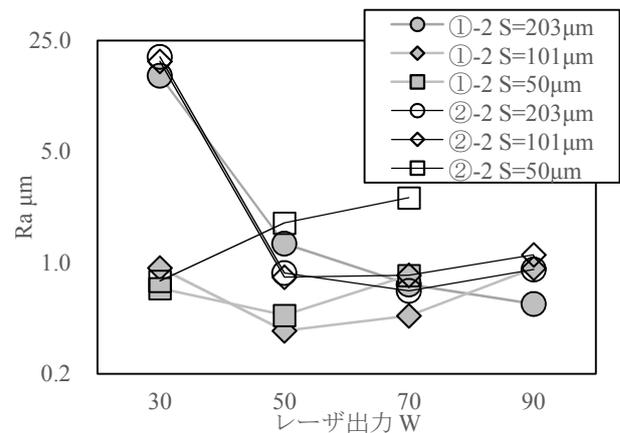


b) 条件②-2

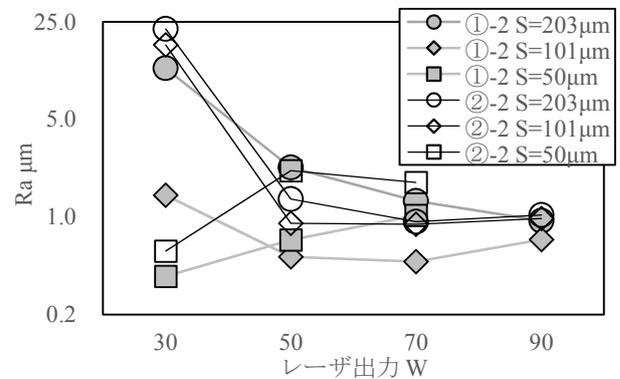
図 8 加工部の写真



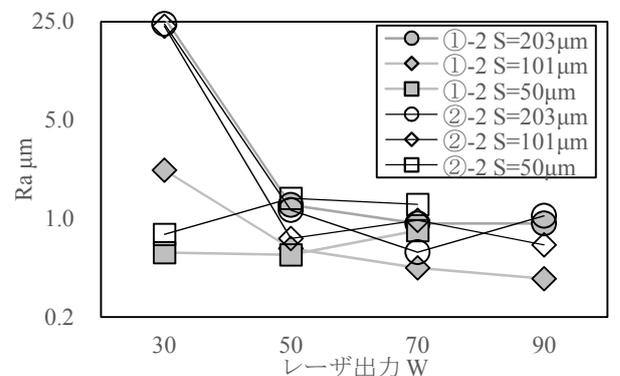
a) 試料 a における粗さの測定結果



b) 試料 b における粗さの測定結果



c) 試料 c における粗さの測定結果



d) 試料 d における粗さの測定結果

図 9 試料と表面粗さの結果

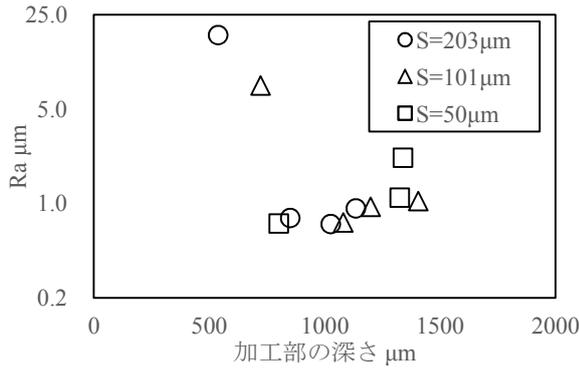


図10 加工後の寸法変化

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のがわかっている⁹⁾。そこで本章では、図6における試料a、bと同じ方向で短冊形状を造形し、側面を切削することで図11に示すJIS K7139短縮試験片を製作した。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2mm/sとした。

4.2 実験結果および考察

引張試験の結果を図12に示す。平滑化した配置方向がaの試験片の引張強度は、予想と反して加工前よりも1割程度低下する傾向となった。対して配置方向がbの試験片は、平滑化することで1割程度強度が向上した。レーザー加工によって材料が劣化した可能性が考えられるが、配置方向がbの試験片は、積層段差に生ずる応力集中が支配的であり、平滑化により緩和されることで強度が向上したと考えられる。

一方で破断ひずみは、配置方向がa、bの試験片ともに平滑化した試験片のほうが高い値を示した。表面での応力集中が起こりにくいことによって、クラックが入りにくく伸びやすかったのではないかと推測される。配置方向がaとbの試験片の強度比で比較すると、未加工の条件が54%であるのに対して、条件Dで65%、条件Eで68%となった。この結果から積層方向による機械的性質の異方性は、試料表面を平滑化することで改善した。これは配置方向がbの試験片の強度が向上したこと、配置方向がaの試験片の強度が低下した影響である。

弾性率は、引張強度と同様の傾向を示した。配置方向がaの試験片は、条件②-3で顕著に低下していることが確認できる。配置方向がaの試料では、平滑化後に破断ひずみが伸びているにもかかわらず、強度同様に弾性率が低下していることから、加工部の樹脂が変質もしくは劣化した可能性が高い。本現象の解明は今後の研究課題とする。

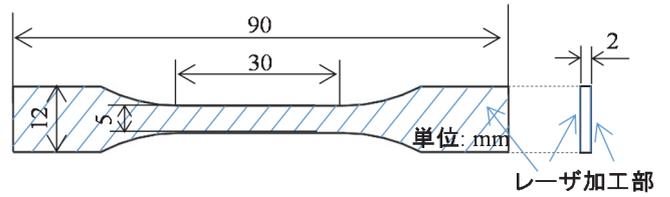
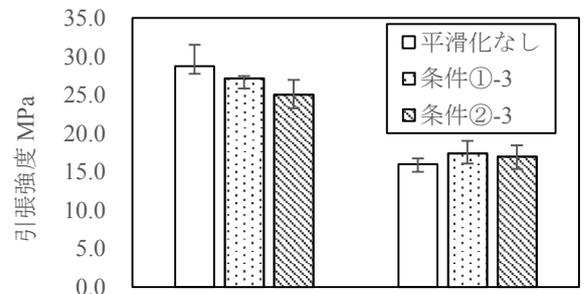


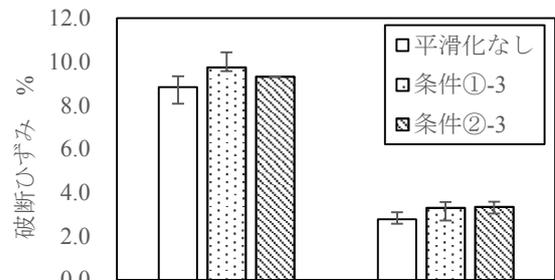
図11 試験片の寸法

表5 平滑化の条件

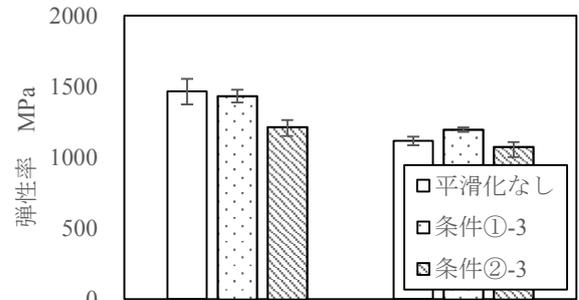
条件	①-3	②-3
レンズ焦点距離[mm]	38.1	101.6
走査速度 [mm/s]	8.87	8.87
デフォーカス距離 [mm]	4.8	35.6
走査線間隔 [μm]	101	203
レーザー出力 [W]	50	50
1インチあたりのパルス数	1000	



a) 引張強度



b) 破断ひずみ



c) 弾性率

図12 引張試験の結果

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。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回の単線走査による加工部の幅と深さを調整することができた。すなわち、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 38.1mm のレンズで 4.8mm デフォーカスを行い、レーザー出力 50~70W、走査間隔 101 μ m で加工することで Ra 0.4 μ m まで低減できた。
- 3)造形時の配置方向によって、試料の初期粗さ Ra で 5~10 μ m 程度は異なっていたが、条件を調整することでどの試料も Ra 0.5 μ m 以下の表面を得られた。
- 4)平滑化後の試料の寸法は、1000 μ m 程度小さくなる。設計時もしくは造形時にあらかじめ寸法を大きくしておくことで補正できる。
- 5)表面を平滑化することによって、積層方向に長手を配置した試験片の引張強度、破断ひずみ、弾性率が向上した。
- 6)水平方向に長手方向を配置した試験片については、平滑化することによって破断ひずみは増加したが、引張強度と弾性率は低下した。
- 7)平滑化を行うことで、樹脂 AM 品で課題となっている積層方向による強度の異方性を緩和することができた。

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)中川威雄:積層造形法の応用分野, レーザー研究, 24, 4, (1996), 443
- 2)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
- 3)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
- 4)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
- 5)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, (2011), 176