

金属粉末床積層法により作製した金属材料の異方性の制御法と レーザーアシスト加工による高精度仕上げ加工技術の確立

三条市立大学 工学部 技術・経営工学科
准教授 江面 篤志

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020226-B3)

キーワード：金属積層造形，レーザー，切削加工

1. 研究の目的と背景

金属付加製造技術（金属 AM 技術）は、切削や研削、放電加工などの除去加工や射出成型加工や鍛造など、従来の加工技術では、創製できない複雑形状を有する金属部品を製造できることから、注目を集めている¹⁾。金属 AM の一種であるレーザーベースの粉末床溶融結合法(PBF-LB/M)は、図 1 に示すように薄く堆積させた金属粉末にレーザーを照射することで、選択的に溶融・凝固させ、1 層分のレーザー照射が終了した後、リコーターによってその上に薄く粉末を供給し、さらに上部の層の溶融・凝固を行うという過程を繰り返すことで三次元の物体を造形する方法である。

PBF-LB/M は、他の金属 AM プロセスと比較して、高密度かつ高精度な積層体を形成でき、産業界において最も普及している手法であり、すでに宇宙産業や世界トップクラスのカーレース産業などにおいて、部品製造に活用されてきている²⁾。PBF-LB/M は、均一に敷き詰められた金属粉末に対して、対象の 3D デジタルデータを輪切りにした二次元図形上をレーザー照射することによって、1 層ずつ金属粉末を溶融・凝固させながら、3 次元積層体を形成するものである。積層体には、レーザースポット径と同等の精細さを付与可能であることから、他の金属 AM 法よりも高精度かつ緻密な積層体の製作が可能となる。しかしながら、PBF-LB/M によって製作された積層体には、低い疲労強度³⁾や低品質の表面性状⁴⁾などの問題から、自家用車や航空機などの一般的に普及している機械部品への適用には至っていないのが現状である。これらの低品質化の原因の一つとして、積層造形時のレーザー走査方向の偏りによる積層体の異方性が挙げられる。

PBF-LB/M で製作した金属積層体を工業製品として使用するためには、形状精度および疲労強度^{5,6)}の向上が不可欠である。しかし、PBF-LB/M で作製した積層体は、レーザー走査方向に引張の残留応力、その垂直方向では、圧縮方向の残留応力が存在することから、強い異方性を有した分布を示す⁷⁾。このことが、造形物のゆがみや硬さ分布の不均質、疲労強度の低下につながっているため、実用化への障害となっている。さらにこれらの異方性は積層体の切削特性に対しても異方性を付与する可能性があることが考えられる。本研究では、レーザー走査パターンが残留応力分布に異方性に及ぼす影響について詳細に調べるとともに、残留応力の異方性を緩和可能なレーザー走査パターンに

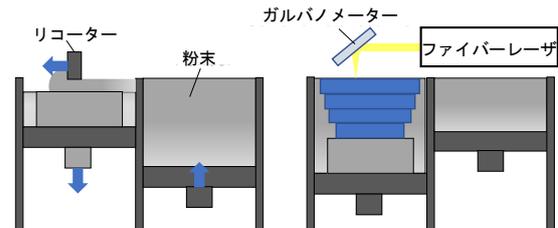


図 1 PBF-LB/M の概略

ついて検討を加える。さらに、異方的なレーザー走査パターンによって製作された積層体に対する切削実験を行い、その切削特性を明らかにするとともに、レーザーアシスト加工を適用することで、その切削特性にどのような影響を与えるか検討を行う。

2. 実験方法

2.1 試験片の製作

本研究では、表 1 に示す化学組成を有するマルエージング鋼粉末を出発点として PBF-LB/M によって金属積層体を製作した。なお、用いた粉末の粒度分布測定結果を図 2 に示す。

表 1 マルエージング鋼粉末の組成

(mass%)								
Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Al	Si	Mn	O
17.8	8.5	4.9	0.7	0.3	0.10	0.06	0.04	0.04
N	C	P	S	Fe				
0.02	0.01	0.006	0.005	Bal.				

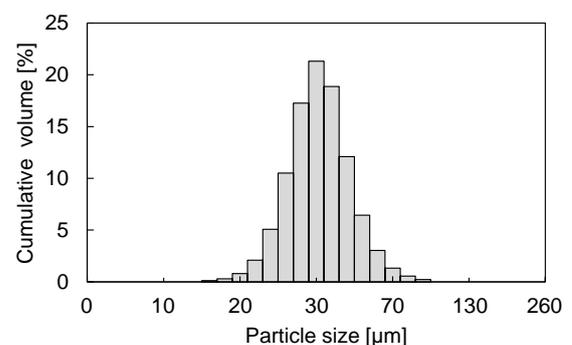


図 2 マルエージング鋼粉末の粒度分布測定結果

PBF-LB/M では、図 3 に示す走査パターンを採用した。同図(a)に示した走査パターンは、1 方向にのみレーザが走査される極めて偏った走査パターンである。同図(b)に示したものは、1 層ごとにレーザ走査方向が 90 deg ずつ変化する走査パターンであり、同図(a)に示したパターンと比較して、その偏りは是正されたものである。PBF-LB/M によって製作した試験片の概略を図 4 に示す。なお、積層条件は表 2 に示すとおりである。

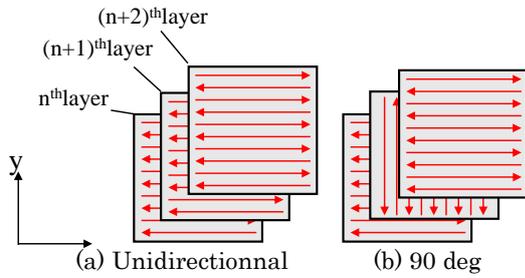


図 3 レーザ走査パターンの概略

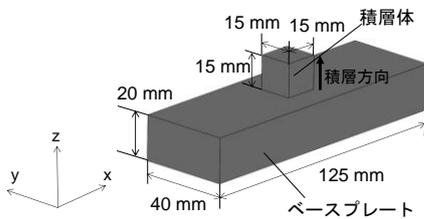


図 4 PBF-LB/M で製作した積層体の概略

表 2 PBF-LB/M 積層条件

Lasers	Yb ⁺ fibre laser
Wavelength	1070 nm
Power output	320 W
Spot size	0.2 mm
Scan speed	700 m/s
Hatching pitch	0.15 mm
Layer thickness	0.05 mm
Atmosphere	N ₂ gas
Metal powder	Maraging steel
Substrate plate	S50C steel

2・2 X線残留応力分布測定方法

本研究では、図 5 に示すように X 線入射角 ϕ_0 を 35 deg として積層体上面の中心部に照射し、観測される回折 X 線を用いて $\cos \alpha$ 法⁹⁾により残留応力を算出した。積層体は回転テーブル上に設置されているため、回転機構を用いることで任意の測定方向から測定可能である。図 6 に示すように積層体中心部において 15 deg ずつ回転させながら残留応力を測定し、360 deg 分の残留応力を取得することで、残留応力分布を求めた。

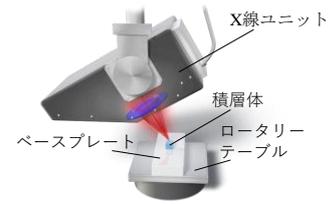


図 5 $\cos \alpha$ 法による残留応力測定の概略

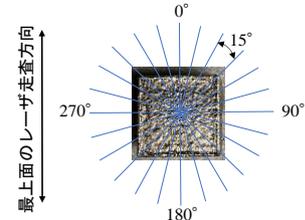


図 6 残留応力分布測定の概略

2・3 レーザアシスト加工実験条件

本研究では、図 7 に示すシステムを用いて PBF-LB/M 積層体に対してレーザアシスト加工実験を実施した。当該システムでは、マシニングのスピンドルに円柱状に加工した PBF-LB/M 積層体を固定し回転させ、旋削チップを接触させることによって、旋削加工を行う。旋削チップはマシニングセンタ定盤上に固定された三成分切削動力計の上に固定されており、切削加工中の切削抵抗が測定できるようになっている。また、レーザアシスト加工に用いるレーザユニットは精密三軸テーブルに固定され、切削点から 1 mm 離れた地点にレーザを照射し、被削材を加熱できる。レーザアシスト加工実験は表 3 に示す条件で実施された。切削実験によって生成された切りくずの肉厚分布を、X 線 CT スキャンによって取得された 3 次元測定データから測定した。

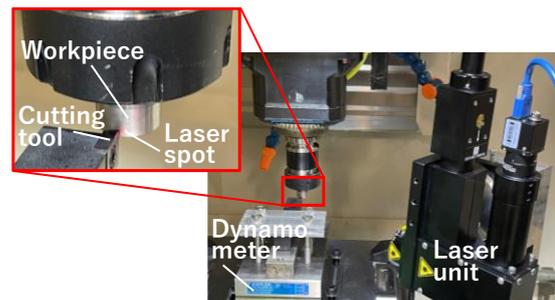


図 7 レーザ援用切削実験の概略

表 3 レーザアシスト加工実験条件

Cutting speed	50 m/min
Feed rate	0.05 mm/rev
Depth of cut	0.5 mm
Environment	air
Laser power	30 (Low), 60 (High) W
Wavelength	1064 nm
Spot diameter	0.4 mm

3. 結果および考察

3.1 残留応力分布測定結果

各種レーザ走査パターンを用いて製作した積層体表面における残留応力分布の測定結果を図8に示す。同図の円周方向は残留応力測定方向を示しており、縦軸は残留応力の大きさを示している。なお同図内の太い線で描かれた円は残留応力が0である状態を示し、円の外側は正の値であり、引張方向の残留応力が測定されたことを示す。反対に円の内側は負の値であり、圧縮方向の残留応力が測定されたことを示している。同図(a)に示した Unidirectional のレーザ走査パターンを用いて製作された積層体の測定結果では、最上面のレーザ走査方向に対して平行となる測定方向では引張残留応力が、それに対して垂直方向では圧縮残留応力が発生し、極端な異方性を有していることがわかる。層ごとにレーザ走査方向が90度ずつ変わるパターン(90 deg パターン)を用いて製作された造形物の測定結果が示されている同図(b)においては、同図(a)と同様に最上面のレーザ走査方向に平行な方向に引張の残留応力が観測されているが、最上面から1つ下層のレーザ走査方向と一致する90 deg および270 deg 付近においても引張方向の残留応力が存在し、残留応力分布は十字形状を有していることがわかる。これらのことから、レーザ走査パターンの不均一は、残留応力分布の均一性に影響を及ぼすものと結論付けられる。

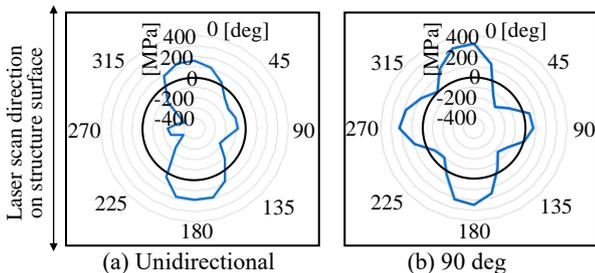


図8 各走査パターンを用いて製作した積層体表面の残留応力分布測定結果

3.2 等方的な残留応力分布のためのレーザ走査パターンの提案

残留応力分布の異方性を抑制し、等方化させるためには、レーザ走査方向の方向の偏りを是正する必要があることが有効であると考えられる。そこで、図9に示すような各層ごとにレーザ走査方向が変化する走査パターンを導入した。同図(a)に示したパターンは、層ごとにレーザ走査方向が45 deg ずつ回転する走査パターンである。また、レーザ走査方向をより分散させるために、層ごとにレーザ走査方向が15 deg ずつ回転するパターン(図9(b))も用いた。

図10に45 deg パターンおよび15 deg パターンを用いて製作した積層体の表面の残留応力分布を示した。二つの新しいレーザ走査パターンを用いて製作した積層体上の残留応力分布の形状は円形に近く、従前のレーザ走査

パターンを用いて製作した積層体と比較して異方性が緩和していることがわかる。このことは、レーザ走査方向の偏りの解消が残留応力分布の異方性の低減に寄与することを結論付けており、材料設計の観点からも重要な知見であるといえる。

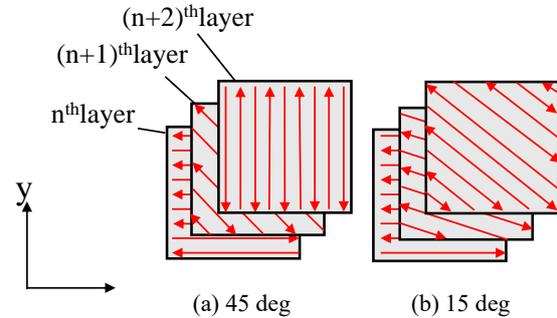


図9 残留応力分布の等方化のために提案したレーザ走査パターン

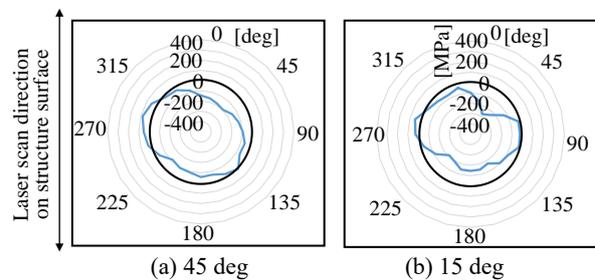


図10 提案した走査パターンを用いて製作した積層体表面の残留応力分布測定結果

3.3 レーザアシスト加工実験結果

図3(a)に示したレーザ走査パターンを用いて製作した積層体に対して、レーザアシスト加工を行った。なお、比較のため、レーザを照射しない汎用旋削加工も実施した。それぞれの旋削加工時の様子を図11に示す。レーザを照射しながら旋削加工を行った場合には、プラズマ発光の発生が確認できる。つぎに三分力切削動力計により測定した旋削加工時の切削力の変動を図12に示す。同図より、レーザ照射を伴わない汎用旋削加工では、およそ15 msの周期で切削力の変動が見られる。これは、レーザ走査方向に垂直に造形された箇所を切削した際、切削力が增大するために生じる周期的現象である可能性がある。一方で、低出力レーザを照射した場合には、切削力の周期的変動は抑制されていることがわかる。レーザ照射によって被削材が加熱され、その結果、金属組織が変化する変態点を越えたことによって積層体の異方性が緩和されたことが考えられる。この考察は推測の域を出ないため、今後の追加実験によって検証していく必要がある。また高出力のレーザを照射した場合には、主分力、背分力、送り分力の3分力の平均値およびその変動幅が増大したことがわかる。これは、過大なレーザ照射によって、被削材表面が大きく改質され、他の旋削加工とは全く異なる現象が生じたものと考えられる。この場合も表面の詳細な分析や検証が必要である。



(a) 汎用旋削 (b) レーザ (c) レーザ(高出力)

図 1 1 旋盤加工時の様子

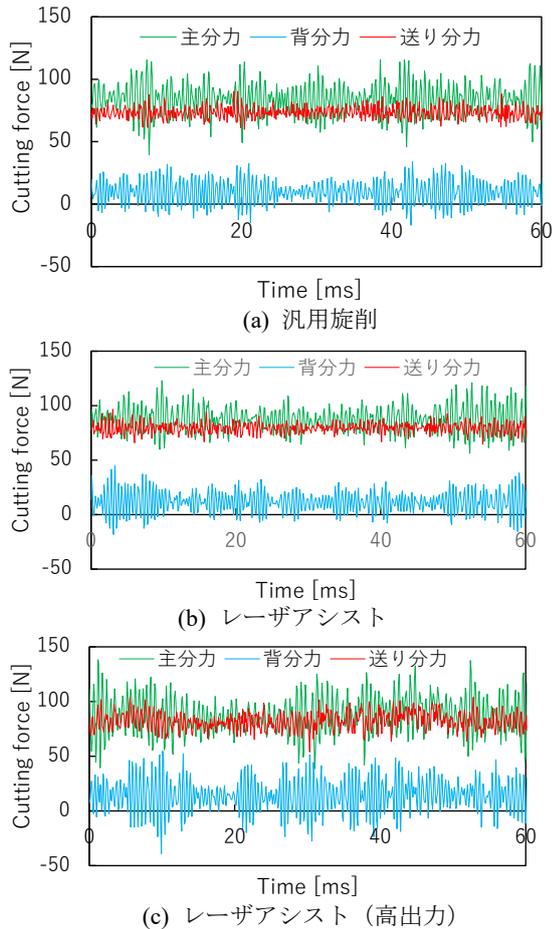
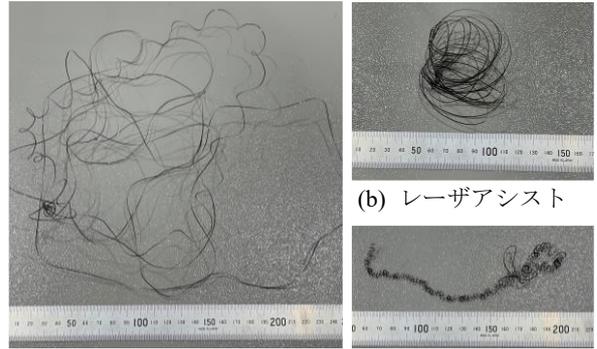


図 1 2 各旋削加工時の切削力測定結果

図 1 3 にそれぞれの旋削加工によって生成された切りくずの外観写真を示す。同図より、汎用旋削加工では、直線的な切りくずが生成されたことがわかる。一方、低出力のレーザーを照射した場合には、わずかにカールした切りくずが生成され、高出力レーザーを援用した場合には、非常に小さな曲がり半径を有するカール状の切りくずが生成された。それぞれの切りくずに対して、X線CTスキャン測定を行い、取得した3Dスキャンデータから切りくず肉厚分布を算出した結果を図 1 4 に示す。同図より計算される切りくずの平均肉厚は図 1 5 のとおりである。同図より、汎用旋削加工の切りくずが最も薄く、カール状の切りくずが生成された高出力レーザーアシスト加工において、切りくず厚さが最も厚くなったことがわかる。カール状の切りくずは、そのせん断面せん断角が大きく、工具すくい面との

接触面積が少なくなることから工具寿命の向上が期待できる。



(a) 汎用旋削 (b) レーザアシスト (高出力)

図 1 3 各旋削加工によって生成された切りくずの外観

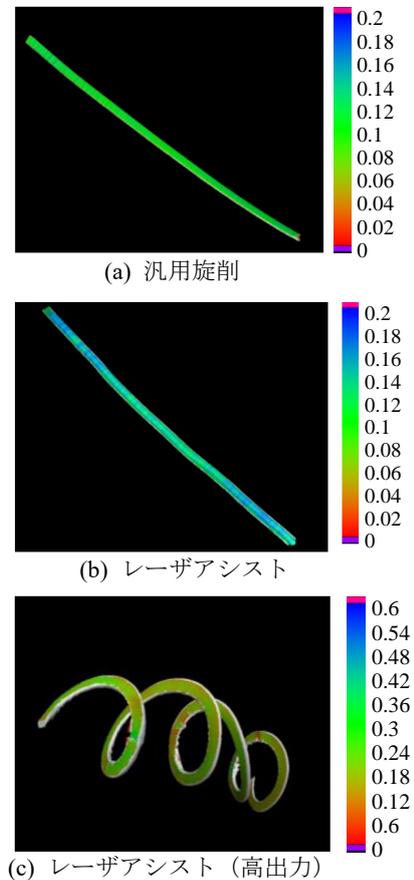


図 1 4 切りくずの X 線 CT スキャン結果

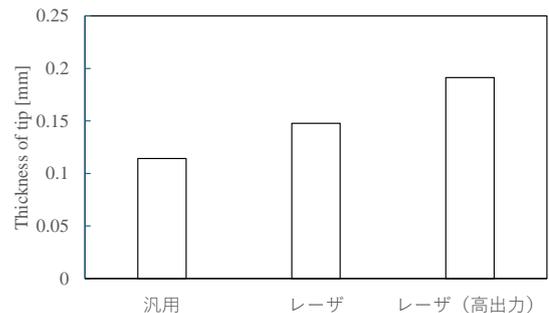


図 1 5 切りくず肉厚の測定結果

4. おわりに

本研究では、PBF-LB/Mにおけるレーザー走査パターンが積層体表面の残留応力分布に及ぼす影響について検討するとともに、等方的な残留応力分布を形成可能なレーザー走査パターンを提案した。さらに積層体の異方性の影響を受ける旋削加工について、レーザーアシスト加工を行うことでその影響を抑制できる可能性を示した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 同一方向に固定してレーザー照射を行って製作した積層体表面には、レーザー走査方向に平行な方向に引張方向の残留応力が、それに垂直な方向には圧縮の残留応力がそれぞれ生成され、異方的な残留応力分布を形成する。
- 2) 層ごとのレーザー走査方向を変化させることによって異方性は緩和され、等方的な残留応力分布が形成されることが明らかとなった。
- 3) 旋削加工時の切削抵抗は積層体の異方性の影響を受け、周期的な変動を伴う。レーザーアシスト加工を行うことによって、異方性を緩和させ、切削力の変動を低減できる可能性が示された。
- 4) 高出力レーザーを援用した旋削加工において、生成される切りくずは、他の加工条件での切りくずと比較して厚く、カール形状となった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、金沢大学 古本達明 教授、佐々木敏彦 教授、東京電機大学 田村昌一 教授には、多大なご助言をいただきました。また、本研究は公益財団天田財団の支援を受けて実施いたしました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol.23, No.6, pp. 1917-1928, 2014.
- 2) 京極秀樹, 金属 3D プリンタの概要と最新技術動向, 金属 3D プリンタ活用ガイド, 日刊工業新聞社, pp.2-7, 2024.
- 3) S. Takesue, A. Ezura, Y. Maki, M. Hayama, Y. Misaka, J. Komotori, Effect of atmospheric-controlled induction-heating fine particle peening on wear resistance and fatigue properties of maraging steel fabricated by laser powder-bed fusion, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 21(2022), pp. 373-387.
- 4) M. H. Nasab, A. Giussani, D. Gastaldi, V. Tirelli, M. Vedani, Effect of surface and subsurface defects on fatigue behavior of AlSi10Mg alloy processed by laser powder bed fusion (L-PBF), *Metals*, Vol. 9(2019), No.10, 1063.
- 5) 東直哉, 古本達明, 山口貢, 牛晶, 桑原孝介, PBF-LB/M 用金属粉末の粒度分布の違いが粉末床と造形特性に及ぼす影響, *精密工学会誌*, Vol. 90(2024), No. 1, pp. 126-131.
- 6) Y. Watanabe, M. Sato, T. Chiba, H. Sato, N. Sato, S. Nakano, 3D Visualization of Top Surface Structure and Pores of 3D Printed Ti-6Al-4V Samples Manufactured with TiC Heterogeneous Nucleation Site Particles, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 51(2020), PP. 1345-1352.
- 7) A. Ezura, S. Abe, T. Furumoto, T. Sasaki, J. Sakamoto, Study on Laser Scan Strategy for Correcting Anisotropic Residual Stress Distribution and Reducing Warp in Structures Fabricated by PBF-LB/M, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 17(2023), No.4, pp.369-377.
- 8) T. Miyazaki, T. Sasaki, X-ray stress measurement with two-dimensional detector based on Fourier analysis, *International Journal of Materials Research*, Vol.105(2014), No.9, pp.922-927.