

PBF-LB/M での工程分割によるスパッタレス造形法

金沢大学 設計製造技術研究所
教授 古本 達明
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020211-B2)

キーワード：粉末床溶融結合法，レーザ走査戦略，ドロップレット

1. 緒言

各種部品の加工法は、除去加工、変形加工、付加加工に大別でき、Additive Manufacturing (AM)は付加加工に分類される手法である。2009 年に ASTM(American Society for Testing and Materials)によって、「3 次元モデルデータを用いて、多くの場合は層の上に層を重ねることで立体形状を得る除去加工とは対照的なプロセス」として定義されている¹⁾。1981 年に小玉秀男氏によって初めて同手法が提案されて以降²⁾、Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, Rapid Tooling, Layered Manufacturing などと呼称が変化し、現在では AM として統一されている。複雑形状の一体造形による部品点数の削減や、トポロジ最適化理論を併用した軽量化部品の製作など、3 次元データがあれば比較的容易に複雑形状部品が得られるため、AM の工程を有機的に用いた部品群への適用が進んでいる。

近年は、金属材料を対象とした AM が注目を集め、粉末や線材などの材料形態、供給方法、熱源などによって複数の手法が提案されている。そのなかで、プレートに対して薄層状に金属粉末を堆積させた後、レーザを選択的に照射しながら溶融・凝固を繰り返し、得られた造形物を積層して 3 次元形状を得る粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion using Laser Beam: PBF-LB/M)は、他の AM 法と比較して高精度な造形物が得られる特長を有している。しかしながら、レーザや環境因子を含めたプロセスパラメータが多く、これらが造形品質に影響する主要な因子であるにもかかわらず、各パラメータが相互に影響し合うことが PBF-LB/M で生じる現象理解を困難にしている。特に、PBF-LB/M での造形中に溶融池周辺から飛散するスパッタやヒュームは、造形欠陥や溶融不足などの不具合を誘発する因子として知られている。スパッタは、レーザ照射部から反跳力や溶融池内部のマランゴニ対流の作用で飛散する液滴であり³⁾、ヒュームは溶融池から気化した金属が噴出した後に冷却されて凝集した粒子である⁴⁾。スパッタやヒュームがレーザ光路に侵入すると、粉末床へ到達するエネルギーを減衰させるだけでなく⁵⁾、スパッタが造形物表面に付着すると、表面性状の悪化や次層造形時の粉末堆積厚さを変化させる要因となる。スパッタやヒュームの発生を抑制するため、レーザ出力や走査速度などの条件を検討した報告⁶⁾、プロセスチャンバ内部のガス流れを検討した報告⁷⁾、粉末の再利用性に向けた造形雰囲気を検討した報告などがなされているが⁸⁾、いずれもスパッタやヒューム発生を完全に抑制できるまでには至っていない。

そこで本研究では、PBF-LB/M での高精度造形技術の確立に向け、粉末床の予備焼結と本造形に工程分割することでスパッタやヒュームの発生を抑制する手法を開発することを目的とする。まず始めに、自作した PBF-LB/M 装置を用いて造形を行い、レーザ照射部の粉末様相を高速カメラで観察した。そして、商用の PBF-LB/M 装置を用い、第一工程である粉末床の予備焼結について、単ラインで造形したときに生じるドロップレットの形態や粉末様相を調べるとともに、ドロップレットが均一に分散できる条件設定指針を検討した。また、複数ラインで造形した時のレーザ照射間隔がドロップレットの形態に及ぼす影響を調べたので、以下に報告する。

2. レーザ照射部の可視化による粉末様相の解明

2.1 実験方法

自作した PBF-LB/M 装置を図 1 に、実験条件を表 1 に示す。同装置は、Yb ファイバレーザ(IPG フォトニクス製: YLR-300-AC-Y11)、高速カメラ(柵フォトロン製: Fastcam Mini AX200)、リニアステージ(柵ジイェムシーヒルストン製: GHR25)、造形チャンバで構成されている。高速カメラはレーザ照射部の直上に設置し、造形チャンバを搭載したリニアステージを走査してレーザ照射部を観察した。レーザは焦点距離が 200 mm のレンズで集光し、粉末床に対して 40° 傾けて照射した。このとき、粉末床上で楕円となるスポット径の短軸は 100~800 μm で変化させた。造形チャンバの上面は石英ガラスで覆われており、ガラスを通してレーザ照射の様相が観察できる。造形チャ

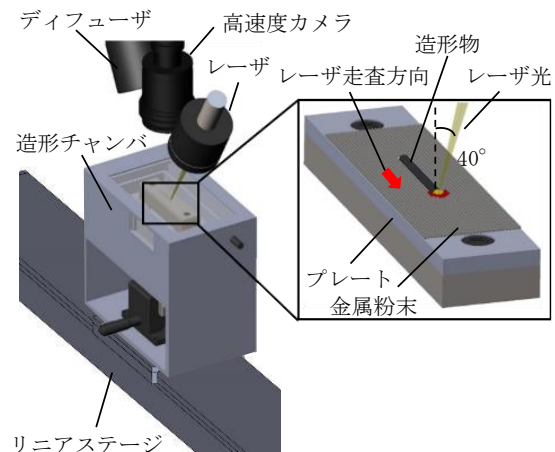


図 1 自作した PBF-LB/M 装置

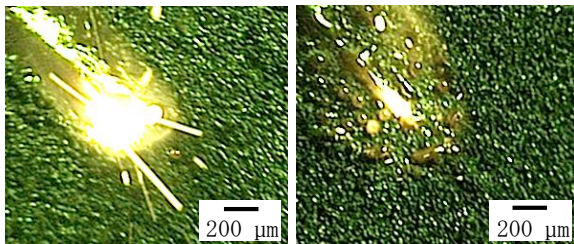
表 1 実験条件

| | | |
|---------|----------------------------|----------|
| 金属粉末 | マルエージング銅 | |
| メディアン径 | [μm] | 33 |
| かさ密度 | [kg/m^3] | 4380 |
| 堆積厚さ | [μm] | 50 |
| 造形プレート | S50C | |
| 温度 | [$^{\circ}\text{C}$] | 25 |
| 表面粗さ | [μm] | 3.34 |
| レーザー条件 | Yb ファイバ(CW) | |
| レーザー種類 | Yb ファイバ(CW) | |
| 発振波長 | [nm] | 1070 |
| 出力 | [W] | 300 |
| 照射角度 | [$^{\circ}$] | 40 |
| 走査速度 | [mm/s] | 150 |
| スポット径 | [μm] | 100, 800 |
| 高速度カメラ | | |
| シャッター速度 | [s] | 1/5000 |
| フレーム数 | [fps] | 5000 |
| 撮影画素 | 640×480 | |

ンバ内部は窒素ガスで充てんし、酸素濃度計（東レエンジニアリングDソリューションズ(株)製: RF-400)で管理した。粉末床は CCD レーザ変位計（株式会社キーエンス製: LK-080)で厚さが 50 μm となるように調整した。レーザー照射部から発生するスパッタは、レーザー照射距離 1 mm あたりに発生した個数として評価した。さらに、スパッタを抑制した造形条件の構築に向け、ビード形成時のレーザー照射工程を分割し、ビード形状やスパッタ発生数を評価した。

2.2 スポット径の違いによる粉末様相の変化

粉末床でのスポット径が 100 μm と 800 μm のとき、高速度カメラで観察した溶融池周辺の様相を比較した結果を図 2 に示す。スポット径が 100 μm のとき、ビード周辺では溶融した粉末によってドロップレットが形成される粉末凝集領域が見られなかった。一方、スポット径が 800 μm の条件では、形成されたビード幅が狭く、その周辺にドロップレットが散在していた。スポット径が大きくなると照射部中心でのエネルギー密度が減少し、広範囲にレーザーが照射されることで粉末の溶融領域が大きくなる。照射部中心付近では、ドロップレットが表面張力によって凝集して溶融池が形成されたのに対し、照射部遠方ではドロップレットが凝集されずに残存したためである。



(a) 100 μm

(b) 800 μm

図 2 スポット径による溶融池周辺の粉末様相の変化

図 3 は、スポット径の違いによる発生スパッタ数の変化を調べた結果である。発生したスパッタ数はスポット径が大きくなるにつれて少なくなった。スポット径が大きくなるとエネルギー密度が減少し、急激な粉末の相変化が生じなかったためと考えられる。また、スポット径が 300 μm までの条件では溶融池からのみスパッタが発生したのに対し、300 μm を越えると溶融池周辺のドロップレットからもスパッタが発生した。粉末床の溶融は、レーザー照射による粉末床の直接加熱と、プレート内部を伝導したエネルギーによる間接加熱に分類できることが知られている⁹⁾。スポット径が 300 μm までの条件では、レーザーによって直接的に粉末床が加熱されて溶融池を形成する過程でスパッタが発生し、スポット径が 300 μm を越えるとプレート内部の熱伝導でも粉末床が加熱され、溶融池周辺で形成されるドロップレットからもスパッタが発生したと考えられる。

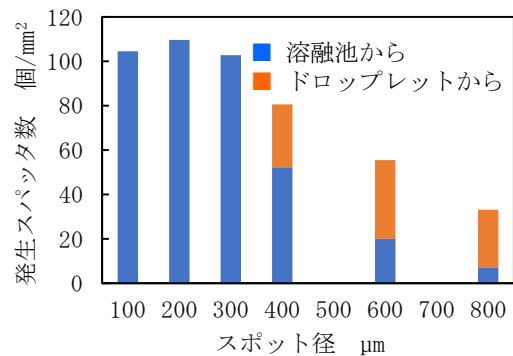


図 3 スポット径による発生スパッタ数の変化

2.3 工程分割によるスパッタ発生抑制効果

前節で得られた結果より、スパッタは金属粉末が相変化するときによく発生することがわかった。また、スポット径が大きくなると溶融池周辺で形成されたドロップレットが再溶融し、これらが溶融池へ取り込まれることでビードが形成されることが知られている¹⁰⁾。そこで、粉末床へのレーザー照射を 2 工程に分割し、第一工程では大きなスポット径でレーザー照射を行って照射部全体にドロップレットを形成させ、第二工程ではドロップレットの再溶融・凝固でビードを形成させるプロセスを検討した。

実験方法を表 2 に示す。本手法では、第一工程として低エネルギー密度で粉末床へレーザー照射し、プレート表面にドロップレットを形成される。その後、第二工程として高エネルギー密度でレーザー照射してビードを形成させる。そのため、第一工程ではレーザー出力はスポット径を変化させた。レーザー照射部の様相は、表 1 で示した高速度カメラの条件で観察した。

各工程で観察されたレーザー照射部周辺の粉末様相を比較した結果を図 4 に示す。第一工程でのレーザー出力は 150 W、ビーム径は 1000 μm のときの結果である。第一工程では、多くのドロップレットが粉末凝集領域内部で形成され、一部のドロップレットはプレート表面に凝着せずに飛散する様子が観察された。一方、第二工程ではレーザー照射部中心付近でドロップレットが再溶融することで溶融池が

形成され、レーザの通過後にビードが形成されていた。第二工程で飛散するスパッタ数は少なく、溶融池の大きさやビード形状は工程分割によって大きな差異は認められなかった。

造形工程の違いによるスパッタ発生数を比較した結果を図5に示す。工程分割することで発生したスパッタ数は70%減少した。また、工程分割する場合、発生したスパッタの90%は第一工程で生じており、第二工程で生じたスパッタは10%であった。これらの違いは、工程分割によって粉末床の溶融・凝固様相が変化したためと考えられる。第一工程では、粉末床に対してエネルギー密度が小さいレーザを照射してドロップレットを形成した。低エネルギー密度のレーザ照射で粉末床の温度上昇が抑制され、金属蒸気の発生量が減少して飛散したスパッタ量も減少したと考えられる。一方、第二工程では工程分割しないときと同じ高エネルギーのレーザ条件であるが、粉末が溶融・凝固してドロップレットが形成されていること、ドロップレットがプレート表面に凝着していることが相まってスパッタの飛散数が減少したと考えられる。また、工程分割しない場合、レーザ照射部で金属粉末が瞬間的に溶融して溶融池へ取り込まれるのに対し、工程分割するとドロップレットの熱容量に起因して溶融池への取り込みに時間を要することが確認された。粉末形態の急激な変化が抑制されたことも、発生したスパッタ数が減少した要因であると考えられる。

ドロップレットを形成させる第一工程とビードを形成させる第二工程に分割することで、造形中にレーザ照射部周辺から飛散するスパッタが大幅に削減できることがわかった。次章以降では、本手法を社会実装することを目的として、商用のPBF-LB/M装置を用いて検討した内容を報告する。

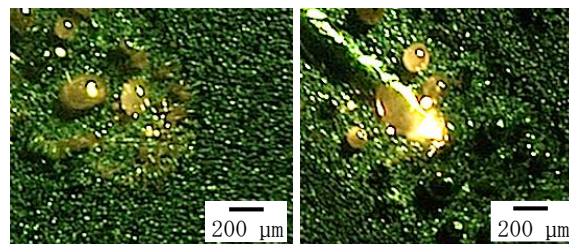
3. 商用 PBF-LB/M 装置を用いたスパッタレス造形

3.1 実験方法

表3に実験条件を示す。実験に用いた商用PBF-LB/M装置は、波長が1070 nmであるYbファイバレーザを搭載した(株)松浦機械製作所製のLUMEX Avance-25である。使用した金属粉末は、メディアン径(D50)が33 μmのマルエージング鋼であり、造形プレート(JIS:S50C)は溶融粉末のぬれ性を向上させるため、循環サンドブラスタ(秋山産業製:ASB-2型)でサンドブラスト処理を施した。造形チャンバ内部は、金属粉末の酸化を防ぐため窒素ガスで充てんし、実験中はチャンバ内部の酸素濃度が3%以下になるようにした。そして、造形プレート上に厚さが50 μmとなるように粉末を堆積し、レーザ出力、粉末床でのビーム径、レーザ走査速度を変化させながら長さが10 mmの単ライン造形を行った。また、複数ラインの造形では長さが10 mmでハッチングピッチごとに5本のレーザ照射を行った。得られた造形物はマイクロスコブ(AnMo Electronics Corporation製:Dino-Lite Premier)で観察し、溶融凝固が連続的に行われる「ビード」、不安定な溶融凝固に起因

表2 工程分割造形の実験条件

| | | |
|-------|--------|------------|
| レーザ出力 | [W] | 150 - 300 |
| 第1工程 | | 300 |
| 第2工程 | | |
| スポット径 | [μm] | 100 - 1000 |
| 第1工程 | | 100 |
| 第2工程 | | |
| 走査速度 | [mm/s] | 150 |



(a) 第一工程 (b) 第二工程
図4 工程分割による粉末様相の変化

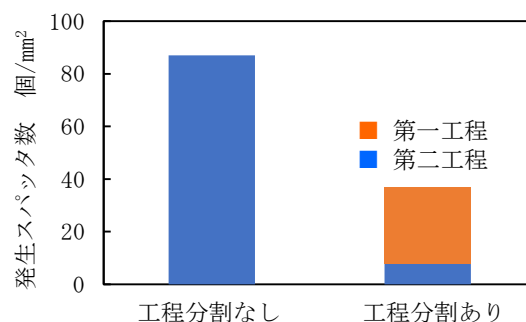


図5 工程分割によるスパッタ数の削減効果

表3 商用 PBF-LB/M 装置での実験条件

| | | |
|----------|---------|-------------|
| レーザ条件 | | Yb ファイバ(CW) |
| レーザ種類 | | |
| 発振波長 | [nm] | 1070 |
| 出力 | [W] | 100 - 200 |
| 走査速度 | [mm/s] | 100 - 2100 |
| スポット径 | [μm] | 100 - 600 |
| ハッチングピッチ | [μm] | 130 - 300 |
| 金属粉末 | | マルエージング鋼 |
| メディアン径 | [μm] | 33 |
| かさ密度 | [kg/m³] | 4380 |
| 堆積厚さ | [μm] | 50 |

して生じる「不十分ビード」、ベースプレートとともに粉末が溶融凝固して形成される「ドロップレット」、ドロップレットがベースプレートに固着せずに飛散する「飛散」に大別し、造形条件との関係を調べた。また、プレート上に形成されたドロップレットについて、造形長さ10 mmあたりに形成されたドロップレット数を計測するとともに、ドロップレットのサイズや分布様相を Image J(National Institutes of Health製)で評価した。

3.2 条件による単ライン造形物の様相変化

レーザ出力が 100 W のとき、レーザ走査速度や粉末床ビーム径の違いで生じる造形様相の変化を調べた結果を図 6 に、各条件で得られた特徴的な造形様相を図 7 に示す。造形物は、レーザ走査速度が速くなるにつれて、粉末床のビーム径が大きくなるにつれて造形物形態がビードからドロップレットへと変化した。エネルギー密度の減少にともなう粉末の熔融領域が変化したためである。金属粉末は、レーザ照射での入熱による熔融と熔融粉末の表面張力による凝集によって熔融領域を形成し、レーザ通過後に冷却されて造形物を形成する。エネルギー密度が大きい条件では、熔融粉末の領域がプレートを経た熱伝導に起因して広がり、その粉末が凝集することでビードを形成した。エネルギー密度が減少すると、レーザ照射部への入熱が減少するため、粉末の熔融領域の減少にともなう十分な熔融粉末が得られず不完全なビードが形成された¹¹⁾。さらにエネルギー密度が減少すると、熔融粉末が減少することに加え、熔融領域の温度低下によって熔融粉末が凝集せずにドロップレットが形成された。しかしながら、エネルギー密度が極端に低い条件ではレーザ照射下部のプレートが熔融せず、形成されたドロップレットがプレートに固着せずに留まり、熔融領域周辺のガス流れ場の影響を受けて飛散した。ドロップレットがプレート上に分散しながら凝着する条件は、7.0-9.0 J/mm³であった。

3.3 レーザ出力によるドロップレット径の変化

レーザ走査速度が 1100 mm/s、粉末床のビーム径が 300 μm のとき、レーザ出力が 100 W および 150 W の条件で造形して得られたドロップレットの分布を比較した結果を図 8 に示す。レーザ出力が 100 W のとき、観察されたドロップレット数は 13 個であり、100~193 μm の大きさで分布して平均粒径は 156 μm であった。一方、レーザ出力が 150 W のとき、観察されたドロップレット数は 24 個に増え、サイズは 79~170 μm の範囲で分布して平均粒径が 124 μm と 100 W の条件よりも小さくなった。これらの変化は、エネルギー密度が低下することで粉末熔融領域の温度が低下したことが要因であると考えられる。熔融池に生じる表面張力は、温度が低下するにつれて大きくなることが知られている¹²⁾。レーザ出力が 100 W の条件では、150 W より投入エネルギーが減少して温度が低下し、表面張力が大きくなってドロップレット同士の凝集が増え、ドロップレット数が減ってサイズが大きくなったと考えられる。また、レーザ出力で標準偏差に違いが見られず、ドロップレットのばらつきに対するレーザ出力の影響は小さかった。これらの結果から、プレート上に小さなドロップレットを均一に分散させるためには、ドロップレットが形成される造形条件範囲のなかで大きなレーザ出力を選択する必要があることがわかった。

3.4 ハッチングピッチによる層造形物の様相変化

レーザ出力が 200 W、走査速度が 1700 mm/s のとき、ハ

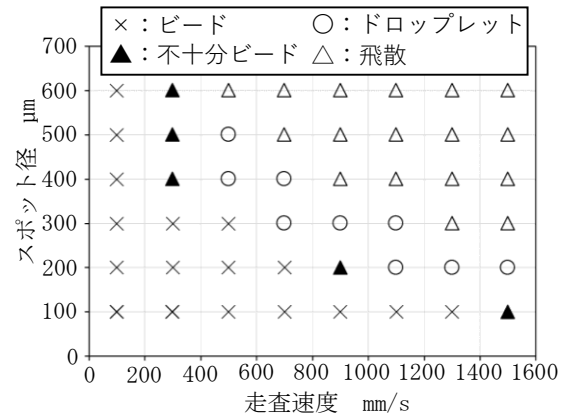


図 6 造形条件による粉末様相の変化

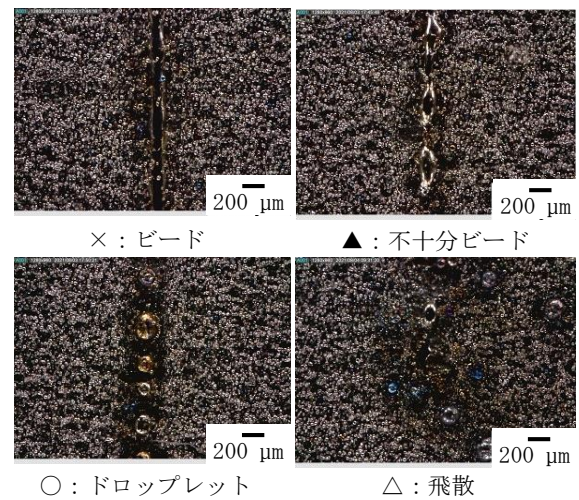


図 7 得られた造形物の様相

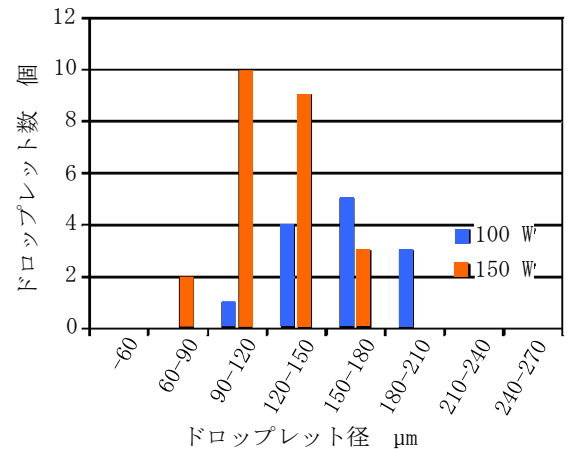
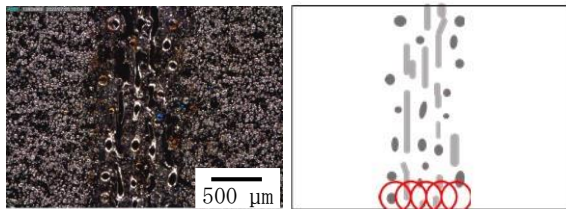


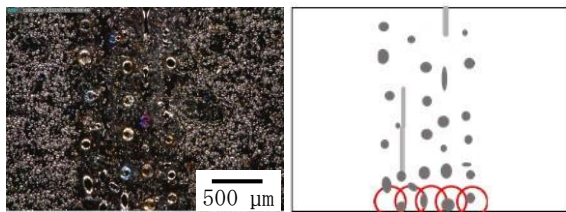
図 8 レーザ出力によるドロップレット径分布の変化

ッチングピッチの違いによる造形様相を比較した結果を図 9 に示す。造形様相の模式図も併せて示している。ドロップレットの形成様相はハッチングピッチによって変化

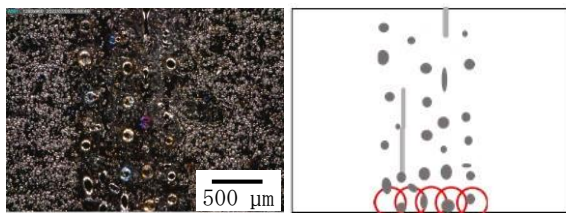
した。ハッチングピッチが 250 μm の条件では、ライン造形時のドロップレットが独立して形成されたのに対し、ハッチングピッチが 200 μm 以下の条件では既に造形されたドロップレットが再溶融・凝固して一部がビード状の造形物となった。隣り合うレーザの照射領域が狭いためであり、適切なハッチングピッチとすることでドロップレットが散在することがわかる。



(a) ハッチングピッチ : 150 μm



(b) ハッチングピッチ : 200 μm



(c) ハッチングピッチ : 250 μm

図9 ハッチングピッチによる粉末様相の変化

4. 結言

本研究では、レーザ照射部から発生するスパッタやヒュームを抑制するため、粉末床の予備焼結と本造形に工程分割する手法を提案するとともに、第一工程である粉末床の予備焼結について、単ラインで造形したときに生じるドロップレットの形態や粉末様相を調べた。また、面造形時のハッチングピッチがドロップレット形態に及ぼす影響を調べた。得られた結果は以下の通りである。

1) レーザ走査速度や粉末床でのビーム径が大きくなると、造形物の形態がラインからドロップレットに変化する。エネルギー密度が極端に低い条件では、ベースプレートが溶融しないためドロップレットがプレート上に固着せず、溶融領域周辺のガス流れ場の影響を受

けて飛散する。ドロップレットがベースプレート上に凝着するエネルギー密度は 7.0–9.0 J/mm^3 の範囲である。

- 2) ドロップレットが形成される造形条件の範囲では、レーザ照射部の温度に起因した表面張力の違いより、レーザ出力が大きい方が小さなドロップレットが分散する。
- 3) 適切なハッチングピッチを選択することで、既に形成されたドロップレットが再溶融・凝固することなくドロップレットを分散させることが可能となる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団「一般研究開発助成」の助成を受けて行われた。記して深甚なる謝意を示す。

参考文献

- 1) ASTM, ASTM F2792-10e1: ASTM International (2012), 671-673.
- 2) Kodama, H.: Review of Scientific Instruments, 52-10 (1981), 1770-1773.
- 3) Khairallah, S.A., Anderson, A.T., Rubenchik, A., King, W.E.: Acta Materialia, 108 (2016), 36-45.
- 4) Ladewig A., Schlick G., Fisser M., Schulze V., Glatzel U.: Additive Manufacturing, 10 (2016), 1-9.
- 5) Tsubouchi, K., Furumoto, T., Yamaguchi, M., Ezura, A., Yamada, S., Osaki, M., Sugiyama, K.: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120 (2022), 1821-1830.
- 6) Young, Z.A., Guo, Q., Parab, N.D., Zhao, C., Qu, M., Escano, L.I., Fezzaa, K., Everhart, W., Sun, T., Chen, L.: Additive Manufacturing, 36 (2020), 101438.
- 7) Anwar, A.B., Pham, Q.C.: Additive Manufacturing, 22 (2018), 86-97.
- 8) Yamaguchi, M., Kushima, K., Ono, Y., Sugai, T., Oyama, T., Furumoto, T.: Journal of Materials Processing Technology, 311 (2023), 117817.
- 9) Furumoto, T., Oishi, K., Abe, S., Tsubouchi, K., Yamaguchi, M., Clare, A.T.: Journal of Materials Processing Technology. 299 (2022), 117384.
- 10) Furumoto, T., Egashira, K., Munekage, K., Abe, S.: CIRP Annals, Manufacturing Technology, 67-1 (2018), 253-256.
- 11) 古本達明・上田隆司・細川晃・Abdullah Yassin・阿部諭:精密工学会誌, 74-8 (2008), 836-840.
- 12) 田中敏弘・原茂太:まてりあ, 36-1 (1997), 47-54.