

高重力場を援用した粉末床溶融結合法の高機能化に関する研究

慶應義塾大学 システムデザイン工学科

准教授 小池 綾

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021214-B2)

キーワード：粉末床溶融結合法，金属 3D プリンタ，高重力場

1. 研究の目的と背景

3D プリンタはアディティブマニュファクチャリング (AM) として世界的に研究が行われる中で、金属材料へ対応可能な造形方式は産業応用が始まっている。とくに粉末床溶融結合法(PBF: Powder Bed Fusion) は AM の中でも造形精度の高さや技術的参入障壁の低さから、極めて実用的な造形方式として、発展途上国から先進国まで巻き込んだ世界的な開発競争が繰り広げられている。PBF について、造形物内部に空孔などの欠陥が残ったり、靱性が低くなりやすかったりといった技術課題の解消を目指す研究も多く行われているが、造形精度を向上させるといった付加価値の向上を目指す提案はあまり多くない。PBF における造形精度は、造形に利用する粉末の粒径に大きく影響を受け、造形精度を向上させるためにはより微細な粉末を利用すべきだが、現状では 30 μm 程度の粒径が PBF に利用可能な粉末の最小サイズと考えられている。30 μm よりも小さな粉末は凝集しやすく、簡単に飛散するため、PBF で安定的に利用することが極めて難しい。したがって、先進国と発展途上国の間で技術格差が生じにくい点からも、国際市場をリードすべく、多くの国々で国家プロジェクトとして AM の開発に注力しているといえる。

AM の活躍は産業界のみではなく、宇宙開発においても活発に議論されている。2020 年代に入り大々的に開始されたアルテミス計画や火星有人着陸計画は、従来プロジェクトよりも長期間の宇宙滞在が求められ、宇宙船の修理・保全のために微小重力場で利用可能なものづくり技術が求められる。したがって、切りくずなどの廃棄物が生じず、省資源性や省スペース性に優れる AM は、宇宙開発プロジェクトに適していると考えられている。しかしながら、微小重力場での AM では、プロセスの不安定化が課題となり、NASA が 2014 年に国際宇宙ステーションで 3D 造形試験を行った結果を発表したり¹⁾、中国やドイツがパラボリックフライト試験による微小重力場 AM の実験結果を発表したりしている²⁾が、重力加速度の低さがプロセスに与える悪影響が甚大であることが明らかになってきている。なお、日本では国際的な宇宙計画に参画する動きは見せているものの、微小重力場用の AM について類似研究の報告がない。

こうした背景に対して、本研究は微小重力場の AM の技術課題を、技術的メリットに転換する高重力場 AM の開発を目指す。図 1 に示すとおり、微小重力場で PBF を行う場合に生じ得る技術課題は、粉末の浮遊、劇的なスパ

ッタ、浮力が生じないため残留気泡の増加などが考えられる。しかしながら、これらの技術課題は微小重力場特有の問題ではない。自然重力場においても、粉末が十分に充填できない、スパッタが激しく生じる、小さな気泡が造形物内部に残るなど、同等の技術課題が低度度生じている。この対応関係から、本研究では、微小重力場の問題が 1G 場において緩和するならば、さらなる高重力場では、PBF が抱えている技術課題のほとんどが解決すると考えた。

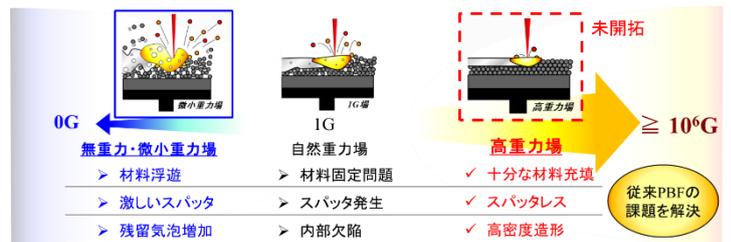


図 1 重力レベルの違いによる PBF の特徴。

高重力場では、粉末を再高密度で充填した層を形成でき、スパッタが生じず、大きな浮力によって微細な気泡すら残さない高密度造形ができると考えられる。この仮説を立証するために、先行研究では図 2 に示すとおり、遠心機と PBF ユニートを融合した、高重力場 3D 造形装置を世界で初めて開発した。

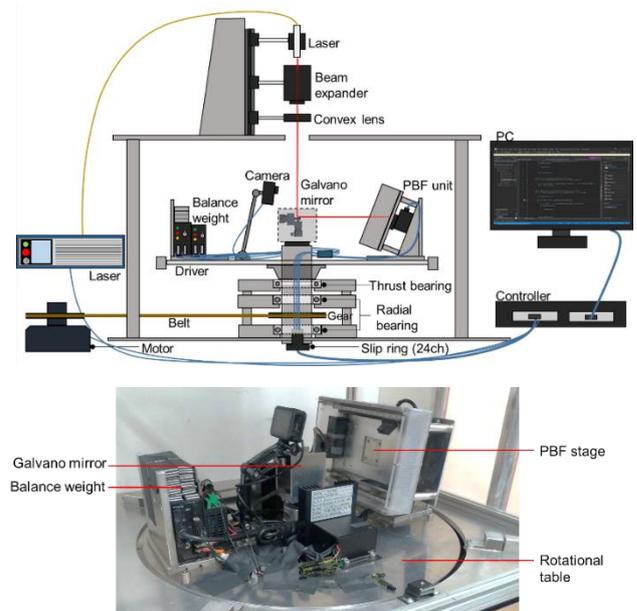


図 2 高重力場 3D 造形装置の概要図

10G までの高重力場で PBF を行う実験を通じて、スパッタの抑制、造形密度の向上、造形物機械強度の向上、7.5 μm の微細粉末による安定造形に成功するなど、PBF の技術革新を推し進める多様な成果を得ることに成功した^{3,4)}。

しかしながら、先行研究の成果は開発した装置の性能によってプロセスに付与できる加速度の限界が 10G までであり、より微細な粉末を利用した造形や完全スパッタレスの造形など、さらなる成果を求めめるためには、より高い重力加速度で造形試験を行う必要がある。とくに、遠心機を高速回転させた際には、図 2 のシステム構成ではレーザーの光軸がぶれてしまい、図 3 に示すとおり、造形台へのレーザー走査はサイクロイド状の誤差が生じてしまう。低回転数においてはガルバノミラーの制御によって誤差を補正できるものの、高速回転数となるとガルバノミラーの応答が間に合わなくなってくるため、光学的なシステム構成によって走査誤差をなくしたい。

現行開発中の装置において、回転による誤差を大幅に低減する新たな光学システムを構築し、より高精度な造形技術の確立を目指す。

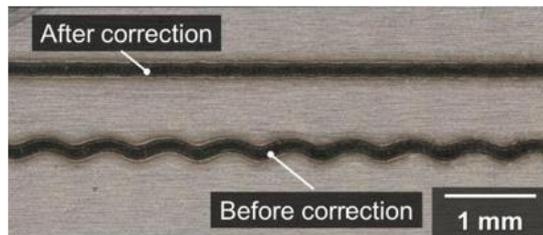


図 3 サイクロイド状の走査誤差

2. 実験方法

2-1 実験装置の概要

本研究では、より実用的な高重力場 3D 造形装置の開発を目指し、図 4 に示す新たな試作機を構築している。回転軸を水平方向にすることで、回転速度をインプロセスに変更できるようになるため、サポート構造などの低密度化が求められる造形にも対応できる。また、万一の脱落事故時に部品が操作者側に飛ばなくなるので安全性を確保できるほか、設置スペースも削減しやすいなど、水平軸型の回転機構を利用した高重力場 3D 造形が得られるメリットは大きい。一方で、回転時に $\pm 1\text{G}$ の変動が生じてしまう点は注意が必要だが、100G レベルの出力を目指す機構開発においては、1%まで抑えられる誤差であり、造形プロセスの安定性に大きな影響を与えないと考えられる。

本研究では、光軸のぶれを低減するための工夫について議論する。レーザー発振器の本体は重量が大きいので、回転部分に設置することは難しい。したがって、試作機的设计上、回転部分の回転軸に沿わせるようにレーザーを入射させることで、回転軸上に設置されたガルバノミラーを介し、造形ステージにレーザーを照射している。この工夫は垂直軸型の高重力場 3D 造形装置でも同様であり、ガルバノミラ

ーのように慎重に扱うべき電子機器を、高加速度場に設置しなくて済む点でも的確な機構設計といえる。しかし、回転軸と光軸がわずかにずれただけでも、図 3 に示したような走査誤差が生じるといった問題がある。

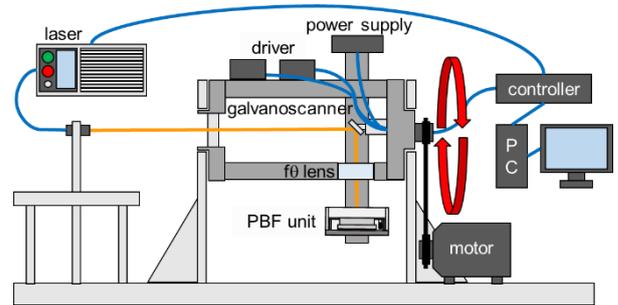


図 4 水平軸型高重力場 3D 造形装置の概略図

そこで本研究では、図 5 に示すような、光スリップリング機構を開発する。回転軸とレーザー光路が一致にくい理由としては、光学デバイスの単純な設置誤差だけではなく、ビーム径がそもそも小さいことも挙げられる。ビーム径が小さいままでは、光軸と回転軸を一致させることが難しく、結果として図 3 に示した走査誤差を小さくすることが難しい。したがって本研究では、静止座標系から回転座標系へレーザーが照射される区間で、ビーム径を太くし、回転系内でレーザーを絞り直す、光スリップリングと名付けた機構の開発を目指した。

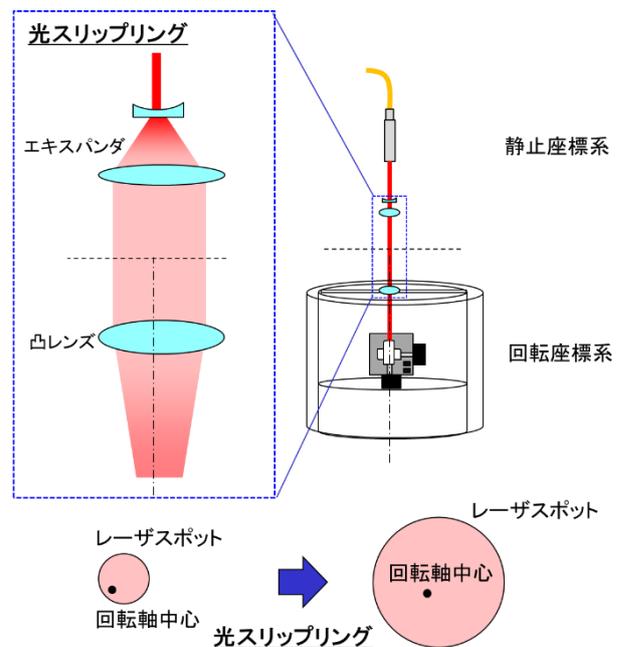


図 5 光スリップリングの概要。回転座標系に集光用光学系を組み合わせることで、回転ブレや位置調整ミスの影響を大幅に低減する。

2・2 実験条件

本研究では表1に示す造形条件において実験を行った。一般的なPBFの実験においては、レーザ出力や走査速度などのパラメータを変えて、最適造形条件の探索などが行われる。本研究の目的は重力加速度がプロセス安定性に与える影響の評価であるため、重力加速度と走査速度を変化させて、造形物の機械特性などを評価する。

表1 造形条件

重力レベル [m/s ²]	1G, 10G, 16G (G=9.81)
レーザ出力 [W]	50 W
走査速度 [mm/s]	50, 75, 82.5
1層当たりの高さ [μm]	25, 100
粉末の平均粒径 [μm]	7.04, 31.3
粉末材料	SUS316L

3. 実験結果

3・1 1ライン造形実験

10G場で造形をした場合において、31.3 μm 粒径粉末で100 μm 高さ1ライン造形物に生じる変化について議論する。デジタル顕微鏡を用いて得た造形物の外見とプロファイルデータをそれぞれ図6, 7に示す。

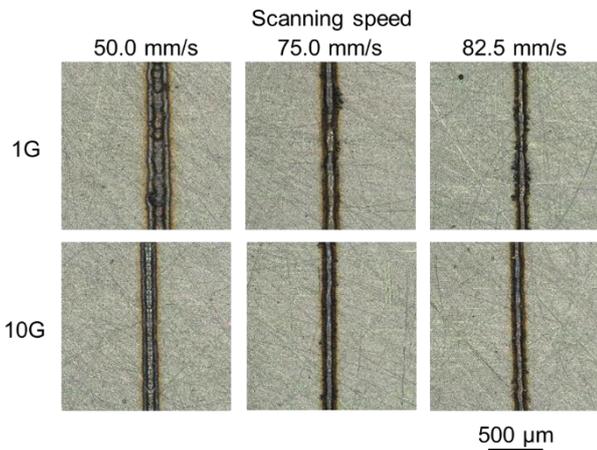


図6 1ライン造形物の外観

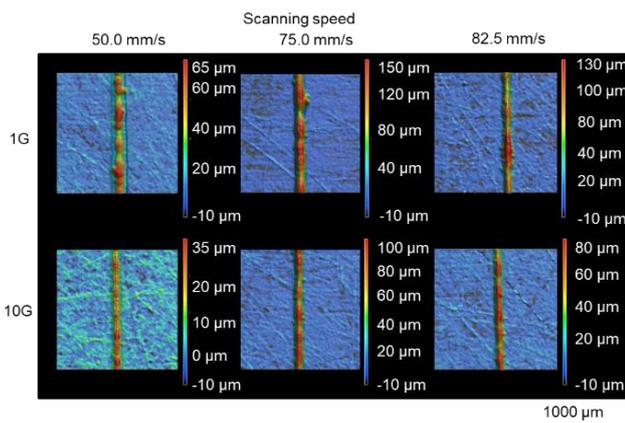


図7 1ライン造形物のプロファイル

1G場で造形を行った場合には、いずれも高低差が激しく変動している区間が確認できた。熔融金属の表面張力は高く、ビードが途切れてしまう問題をポーリング現象と呼ぶ。1G場では、ポーリング現象が顕著に見られたのに対して、10G場では高低差の変動が残るものの、連続的なビードを形成できていることがわかる。ビードの丸まりは表面張力によって生じるが、これを抑える方法として、界面活性剤によって表面張力を小さくするか、重力加速度を高めるなどの工夫が考えられる。高重力場では、付加的材料を添加することなく、任意の材料組成に対してもビードの連続性を確保できることから、高重力場3D造形は、造形物の面精度を高める上で、極めて実用的なアプローチといえる。

3・2 7.04 μm 微細粉末リコート試験

先述のとおり、30 μm よりも小さな粒径をもつ粉末は、粉末粒子をステージに押しえつける重力よりも、凝集や飛散に寄与する静電気力や抗力の影響が大きくなる。したがって、微細粉末を用いてPBFを安定的に実行することは困難となるが、本研究では重力加速度を高めることで粉末粒子にかかる重力を再び支配因子にすることから、30 μm 未満の微細粉末を用いても安定的に造形ができる。

図8に、1G場、10G場、16G場でそれぞれ7.04 μm 粒径の粉末でベースプレート上に粉末層を形成した結果を示す。なお、1層当たりの高さは25 μm に設定した。ベースプレートをアルマイト処理によって黒く着色しているため、SUS316L粉末を敷くと、十分に粉末が供給されていない領域が黒く見える。実験結果からわかるとおり、1G場においてもまったく粉末層を形成できないわけではなく、とくに1層だけをベースプレート上に形成するならば、粉末粒子・ベースプレート間のファンデルワールス力などにより、高いリコート率を示している。しかしながら、複数層を形成していくと、粉末粒子間のファンデルワールス力や静電気力の影響が大きくなり、粉末層を正常に形成できなくなった。一方で、重力加速度を高めた場合、粉末層の見た目からもわかるとおり、凝集を抑制できており、複数層を重ねても高いリコート率を示している。以上から、高重力場は造形プロセスの安定性を高めるために有効であることが明らかとなった。

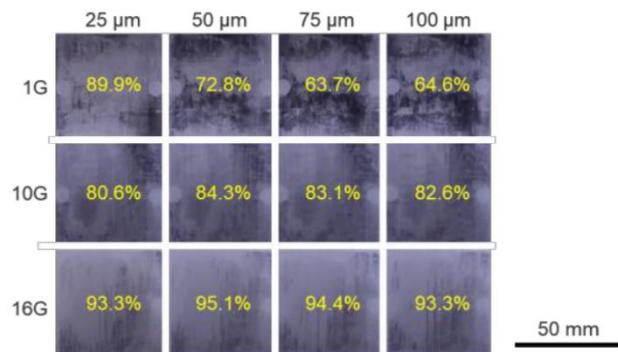


図8 各重力加速度における粉末層形成の様子

なお、図6に示されたとおり、10G場の実験でも造形物をまっすぐに形成できていることから、光スリッピングが有効に機能しているといえるが、光スリッピングがない場合との対照実験を行えていない。また、複数層の造形試験を実行できていないなど、新たに開発した高重力場3D造形装置において行うべき実験が多く残っている。今後の予定としては、ブロック状の造形物を作製することで、機械強度試験やX線CTスキャンによる内部構造観察など、実用的な造形プロセスの実現につながる実験成果を示すことを目指す。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成（AF-2021214-B2）により実行したものです。ここに、新研究を開始する機会を与えてくださったことに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) T. Prater・N. Werkheiser・F. Ledbetter・D. Timucin・K. Wheeler・M. Snyder : 3D printing in zero G technology demonstration mission: complete experimental results and summary of related material modelling efforts, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 101 (1996), 391-417.
- 2) C. Neumann・J. Thore・M. Clozel・J. Günster・J. Wilbig・A. Meyer : Additive manufacturing of metallic glass from powder in space, microgravity, 9 (2023) 80.
- 3) R. Koike・Y. Sugiura : Metal powder bed fusion in high gravity, CIRP Annals 70, 1 (2021), 191-194.
- 4) Y. Sugiura・R. Koike: High-gravitational effect on process stabilization for metal powder bed fusion, Additive Manufacturing 46 (2021), 102153.