

高重力場を応用した粉末床溶融結合法の基礎的研究

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○尾部偉大, ◎小池 綾

要旨

粉末床溶融結合法(PBF)は金属積層造形技術の一種であり多様な造形パラメータの影響が調査されているが、重力変化に関する議論はまだ少ない。本研究は、高重力場がPBFに与える有益な効果を示すために、遠心機とPBF装置の融合試験機内で造形を行い、スパッタの飛散距離、造形物の密度、硬さの変化を評価した。重力加速度の大きさに応じてスパッタ抑制、造形物の高密度化・高強度化が実現できることを実験的に示した。

1. 結論

近年、複雑形状を容易に造形する Additive Manufacturing (AM)技術が注目を集めている。AM技術は省資源性や省スペース性などから宇宙空間における製造方法として有望視されており、パラボリックフライト試験などを用いた微小重力場における適用可能性についても議論が進められている[1]。これらの研究は、重力変化を克服すべき問題と捉えているが、本研究では逆に、重力変化をAMに試みるものである。AMの一方式である粉末床溶融結合法(PBF)は、造形中に発生するスパッタや粉末の凝集による形状精度の低下などのプロセス不安定性に課題がある。本研究は、こうした課題に対して、高重力場を造形プロセスに付与することで、能動的なプロセス安定化を提案する。高重力場がPBFプロセスと造形物の機械特性に与える影響を、10Gまでの人工高重力場において評価した。

2. HG-PBF (High Gravity-Powder Bed Fusion)

本研究では、人工高重力場を造形プロセスに作用させる試験機として、遠心機とPBF装置を融合することで図1に示すようなHG-PBF装置を開発した。PBFユニットをターンテーブル上に載せ、自然重力加速度 a_g と遠心加速度 a_c の合成加速度 a_r を造形プロセスに作用させる。また、図2のようにPBFユニットの設置角 θ [deg] を調節し、造形面に対して合成加速度を垂直に作用させる設計となっている。合成加速度 a_r は以下の式によって決定する。

$$a_c = r\omega^2 \quad (1)$$

$$a_r = \sqrt{a_c^2 + a_g^2} \quad (2)$$

ただし、中心軸からの距離を r [m]、ターンテーブルの回転角速度を ω [rad/s] としており、回転角速度 ω を変えることで、任意の合成加速度 a_r を造形空間に作用させる。

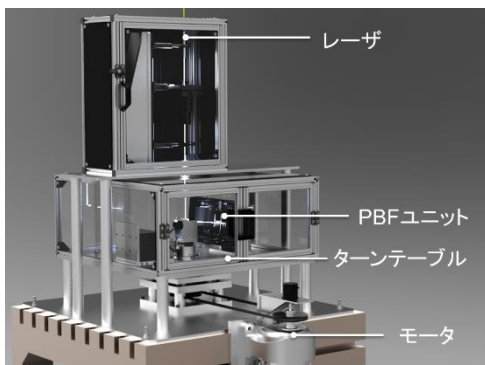


図1 利用したHG-PBF装置

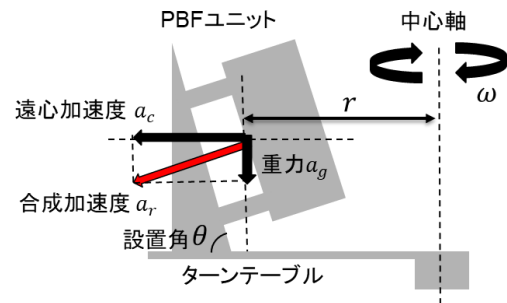


図2 PBFユニット設置模式図

3. 造形プロセスへの影響評価

造形中のスパッタの発生高さ h [m]は、運動エネルギーが位置エネルギーにすべて変換されると仮定すると、スパッタが発生時に付与される運動エネルギー K [J]、質量 m [kg]、重力加速度 g [m/s²] を用いて次式で表せる。

$$h = \frac{K}{mg} \quad (3)$$

HG-PBFにおける造形プロセスでは合成加速度 a_r が重力加速度 g に対応することから、合成加速度の増加に伴い、スパッタ発生高さが減少すると考えられる。そこで、HG-PBF装置によって造形プロセスに高重力場を作用させた際に生じるスパッタの様子を図3のようにカメラを設置して観察した。実験条件を表1に示す。

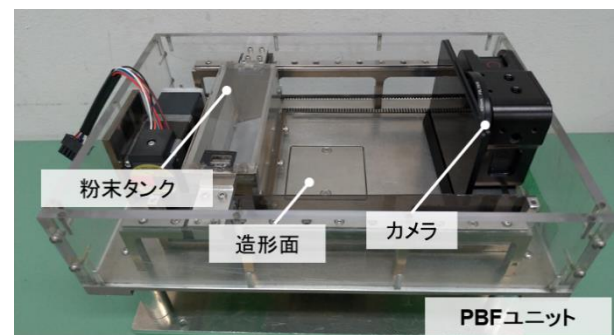


図3 スパッタ観察方法

表1 スパッタ観察実験条件

レーザー出力	50 W
走査速度	50 mm/s
スポット径	60 μ m
積層高さ	50 μ m
合成加速度	2 ~ 10G

図4に結果を示す。スパッタ発生高さが高重力場の影響により抑制されていることが確認された。これより高重力場の影響により造形プロセスが安定化したことが示唆された。

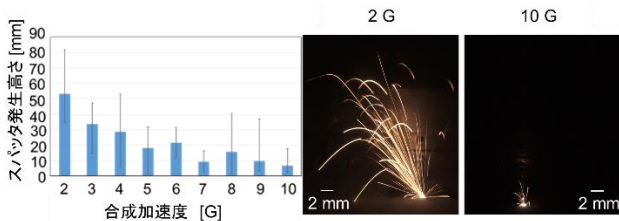


図4 各合成加速度場におけるスパッタ発生高さとの観察結果

4. 造形物への影響評価

高重力場が造形物に与える影響を評価するために、1層造形物および多層造形物に対して密度、硬さの評価を行った。造形物の作製条件を表2に示す。

表2 造形物作製条件

レーザ出力	50 W
走査速度	6 ~ 100 mm/s (1層) 25.0 ~ 62.5 mm/s (多層)
スポット径	60 μm
積層高さ	50 ~ 200 μm (1層) 50 μm (多層)

まず、基礎実験として1ライン1層造形を行った。まず、図5のような造形物の三次元データを光学顕微鏡より取得し、三次元データから得られた輪郭曲線をもとに算術平均うねりを算出した。

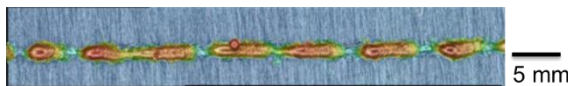


図5 三次元データ

造形物作製条件に対する算術平均うねりの二次等高線図を図6にまとめる。10Gの高重力場において全体的に造形物のうねりが低くなる傾向を確認できた。また、高走査速度、高積層高さ条件において造形物観察を行った観察結果を図7に示す。1G場で観測された造形物が途切れる現象(ポーリング現象)が、10Gの高重力場において抑制されることが確認できた。これらの結果より、高重力場はPBFプロセスの安定化を促し、造形物の形状精度を向上させる可能性がある。

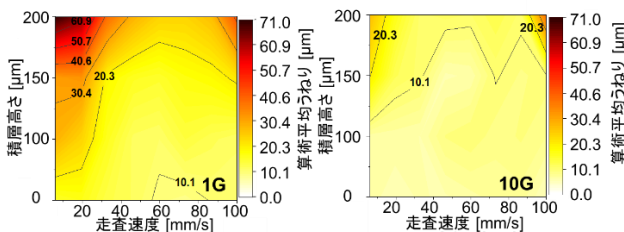


図6 2次等高線図

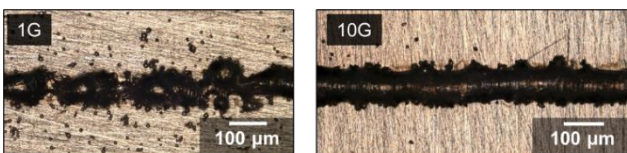


図7 造形物観察結果

次に多層を行い、光学顕微鏡で造形物断面を観察した。1つの造形物に対して3つの断面を観察し、断面全体の面積と空孔部分の面積の比を取ることで密度を推定した。結果を図8に示す。全てのレーザ走査速度において10Gで作製された造形物の密度が向上し、1Gと比較して平均で3.3%向上する結果が得られた。また、造形物内の空孔の大きさと円形度を評価対象として50 mm/sでの造形物に対して解析を行った。結果を図9に示す。10Gで作製された造形物内部では400 μm²以上の空孔がなくなったことが確認された。これより、PBFプロセスを高重力場で行うと造形物の密度が向上することが確認された。

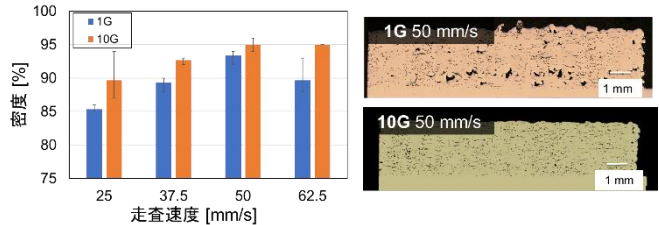


図8 断面観察結果

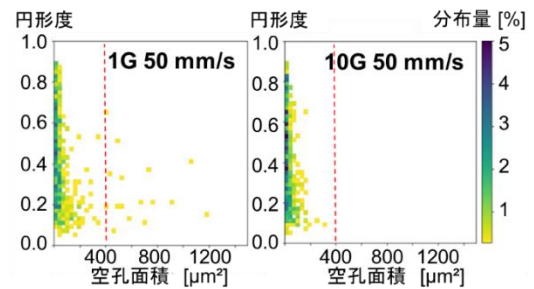


図9 空孔評価結果

最後に多層造形物のビッカース硬さ試験を行った。計測位置としてベースプレートからの造形高さ0.25 mmの位置から0.75 mm間隔で4測定点の硬さを計測し、その平均値をまとめた結果を図10に示す。10Gで作製された造形物は、自然重力場で作製された造形物よりも硬さが向上した。10Gにおいて造形物の密度が向上したことも合わせて考慮すると、高重力場は造形物の内部欠陥を除去する作用をプロセスに与えると考えられる。

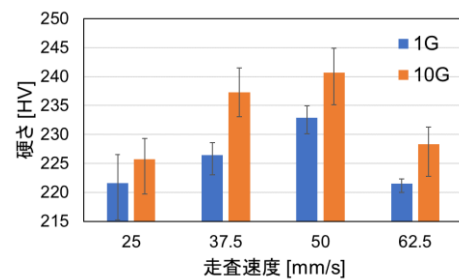


図10 硬さ試験結果

5. 結論

本研究は、PBFに高重力場を付与することで得られるメリットとして、スパッタの抑制効果や造形物内部欠陥の除去効果が得られることを実験的に評価した。以下に得られた結果を要約する。

- 10Gにおいて造形物表面のうねりが低減され、ポーリング現象の抑制も確認された。
- 多層造形物内部の空孔が小さくなり、密度や硬さが向上する結果が得られた。

参考文献

[1] Andrea Zocca, "Enabling the 3D Printing of Metal Components in μ-Gravity", Advanced Materials Technologies, 4, p.190056, 2019.