

高重力による 3D プリンタの超高機能化の研究

研究代表者：慶應義塾大学 小池 綾

【基本構想】

新しい生産技術として広く注目を集めている 3D プリンタは、複雑形状に対応しやすく、省資源性・省スペース性に優れることから、家庭用から先端産業用まであらゆる応用が進んでいる。この中でも、宇宙工学においては資源もスペースも限られた宇宙船内において部品の製造・修理を行ううえで適した生産技術として、微小重力場で利用可能な 3D プリンタの開発が進められている。しかしながら、微小重力場は材料の浮遊、材料供給の不安定化、内部欠陥の増加など、3D プリンティングを行う上で多様な技術課題の解決が求められる。これらの技術課題に対して、本研究は逆転の発想をもって、高重力場で 3D プリンティングを行うことで、材料の固定力増加、材料供給の安定化、造形物の高密度化といった、微小重力場の課題を莫大なメリットに転換することを提案する。遠心機と 3D 造形装置を融合することで、高重力場で 3D プリンティングを行える環境を整えた。とくに、本研究の対象とした材料押出 (Material Extrusion: MEX) では、単位時間当たりの材料押出量の増加による造形効率向上、造形物の線幅縮小による造形分解能の向上といった従来 3D プリンタの性能の限界を大きく超えた高機能性を有する 3D 造形となりえる。実験を通じて、高重力場が MEX にもたらす有用な効果を実証し、3D プリンティング技術の性能を飛躍的に向上させることを目指す。

1. 研究目的

近年、3D プリンタとして広く知られる付加製造 (AM: Additive Manufacturing) の発展は著しく、樹脂成形を行える家庭用 3D プリンタから金属材料にまで対応可能な産業用 3D プリンタまで、AM の応用の幅は拡大し続けている。しかしながら、AM にはいまだ、内部欠陥による造形物の強度低下や、除去加工等に比べて加工精度が劣るなど、多分野への導入する上で技術課題も多く残っている。

AM は 7 種類の方式があるが、その中でも樹脂の 3D 造形に適した図 1 のような材料押出 (MEX: Material Extrusion) は、家庭用 3D プリンタにもよく利用される、最も簡便な造形方式といえる。ワイヤ状にした樹脂材料をノズルに挿入し、ノズルを加熱することで、造形点において所定量の造形材料を熔融・凝固させて堆積させる。このプロセスを層状に重ねて繰り返すことで、任意の形状を造形できる。MEX は、液体や粉末が造形プロセスにおいて利用されないことから、宇宙船内などの微小重力場において安全運用しやすい造形方式としても注目を集めており、2014 年には、アメリカ航空宇宙局が国際宇宙ステーション内で MEX による造形試験を行っている[1]。資源もスペースも限られる宇宙船内における部品の製造・修理には、省資源性、省スペース性に優れる 3D プリンタが活躍するとも考えられている。

しかしながら、微小重力場におけるプロセス不安定化は、あらゆる AM における課題となる[2]。たとえば MEX においては、図 2 に示すとおり、造形中の材料の浮遊、材料供給の不安定化、内部欠陥の増加など、自然重力場(1G)における造形と比べると、造形物の機械特性や品質が大きく

低下する。各国の宇宙計画において微小重力場、もしくは月面などの低重力場における 3D 造形プロセスの不安定化は、解決が強く求められる課題といえる。

一方で、本提案の先行研究においては、こうした微小重力場・低重力場の課題を解決する提案ではなく、高重力場においてそれらの課題を多大なメリットに転換する提案を行っている[3]。つまり、3D 造形プロセスに対して微小重力場が不安定化をもたらすならば、逆に高重力場は安定化をもたらすと予想でき、材料の十分な接合や材料供給の安定化により、高精度、高強度な AM を実現できる。このように高重力場こそが AM にとって極めて理想的な環境とする概念に基づき、粉末床熔融結合法を高重力場で実行して、たしかに造形物が高密度化、高強度化し、スパッタが抑制され、通常では利用不可能な微細粉末による造形に成功するなど、多大なメリットが得られることが実験的に示された。

本研究では、他の造形方式においても同様に、高重力場によって多大なメリットがもたらされると考え、もっとも広く普及している造形方式である MEX を対象に、基礎的な実験を行うことで、高重力場 MEX の有用性を示すことを目的とする。

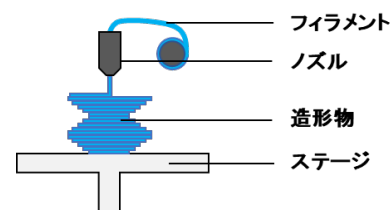


図 1: 材料押出 (MEX) の模式図

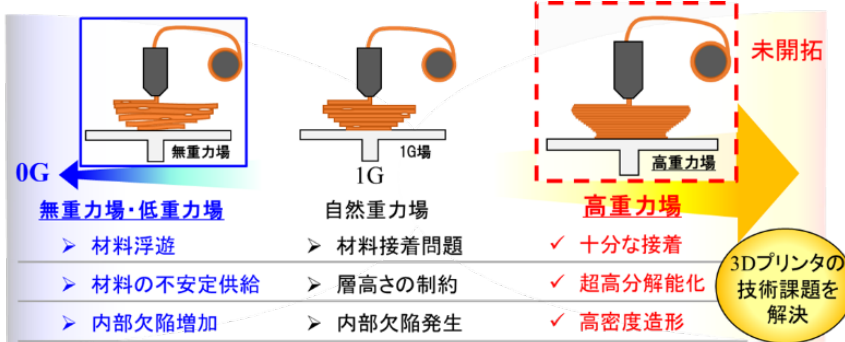


図 2：異重力場における MEX の特性変化

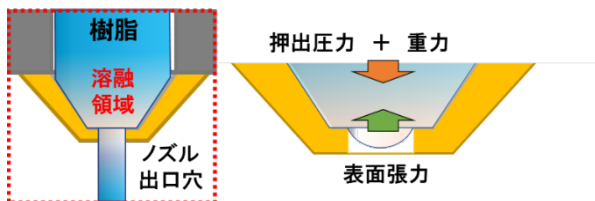


図 3：MEX における樹脂材料の押出プロセスの模式図

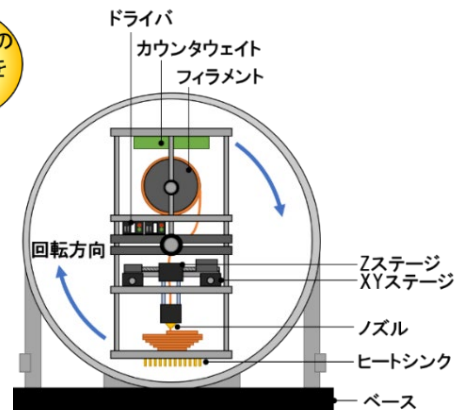


図 4：高重力場 MEX 装置の概要図

2. 原理

MEX を含め、AM は積層造形方式であるため、造形分解能の向上する上で、1 層あたりの高さを低減する必要がある。また、MEX に注目すると、図 3 に示すとおり、造形物表面の凹凸や内部の空隙の大きさは、ノズル出口穴径に大きく影響を受ける。ノズル出口穴径を小さくできれば、造形分解能を容易に向上できるが、微細穴を流体が通過する場合、材料を押し出す合力が、表面張力よりも大きくなる必要がある。こうした特徴をとらえる無次元量として、重力と表面張力の比を示すエトベス数 E_0 が用いられ、式 (1) のように定義される。

$$E_0 = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta\rho$ [kg/m³] は密度差、 g [m/s²] は重力加速度、 L [m] は代表長さ、 σ [N/m] は表面張力である。このとき、出口穴径が代表長さにあたるため、出口穴径が小さくなると表面張力が支配的となる。また、 E_0 を保ったまま代表長さを小さくするためには、重力加速度を大きくすればよいこともわかる。とくに、ノズル出口穴径が $1/n$ 倍の大きさとなった場合、重力加速度は n^2 倍とすればよいことから、 $1/10$ 倍の造形分解能を目指すならば、 $100G$ を付与すればよいことが理論的にも求まる。

高重力化は流体を微細穴に通す上で効果的な手段であり、同様の原理は、綿菓子製造機などにも用いられている。本研究は、こうした重力加速度がノズルからの材料押出プロセスに与える効果を評価する。

3. 高重量場におけるの造形分解能向上

宇宙開発などで低重力場実験を行う場合、自由落下塔を利用する、パラボリックフライト試験を行う、実際に鋼臭い宇宙ステーション等で実験するなど、実験に至るまで多額の費用が求められるほか、安定的に長時間の実験を行う

ことが難しい。一方で、高重力場の実験は、遠心機程度の単純で安価な機構でも長時間安定的に実行可能である。したがって、MEX が高重力場で得られる効果を評価するためには、遠心機と MEX ユニットの融合した機構の設計が合理的である。本研究では、図 2 に示すように水平軸型遠心機において回転機構に MEX を組み込む設計を行い、高重力場 MEX 装置を試作した。遠心機には、回転軸の設定によって、鉛直軸型遠心機と水平軸型遠心機が存在するが、鉛直軸型は設置面積が大きくなりやすく、インプロセスに重力レベルを変更することが難しいほか、万一の事故時に部品がオペレータ側に飛散してくる可能性がある。一方で、本研究で採用した水平軸型は、回転数を変更することで重力レベルをインプロセスに容易に変更でき、破損部品が正面側に飛散してくることがないため、機能面、安全面ともに優れたデザインである。しかしながら、水平軸型のデメリットとして、1 回転中に $\pm 1G$ の変動が生じてしまうことが避けられず、付与する重力レベルが低い際は、この変動による影響も考慮しなければならないことが挙げられる。

本研究における試作機は、最大回転数を 700 rpm とし、最高で $100G$ までに造形実験をできるように設計している。これにより、従来 MEX 装置の造形分解能を $1/10$ 倍にすることを目指している。

4. 実験結果

本研究は 2 ヶ年を計画しており、回転機構、MEX 機構、ステージ駆動機構など、開発が完了し搭載可能となった機構から順次、本体への組み込みを行う形で開発を進めている。1 ヶ年終了時点では、すでにステージ駆動系以外の機構はすべて開発が完了した。2 ヶ年終了時点では、2 軸駆動ステージ上で $7G$ までの薄壁造形に成功し、層間の接合強度や硬さの向上など、高重力場における造形特性の変化について評価を行った。

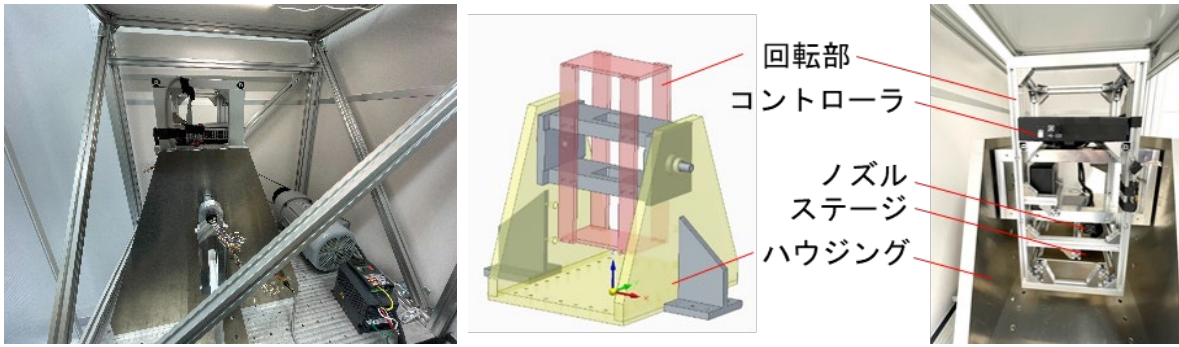


図 5：高重力場 MEX 装置の開発状況

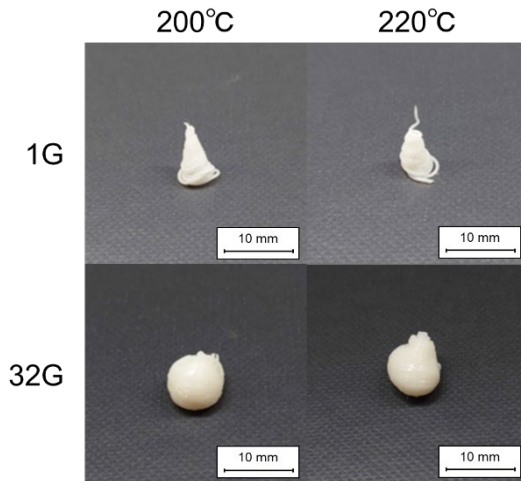


図 6：造形物の外観

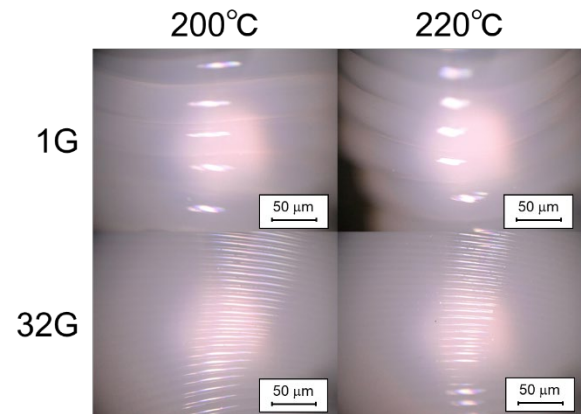


図 7：造形物表面の拡大写真

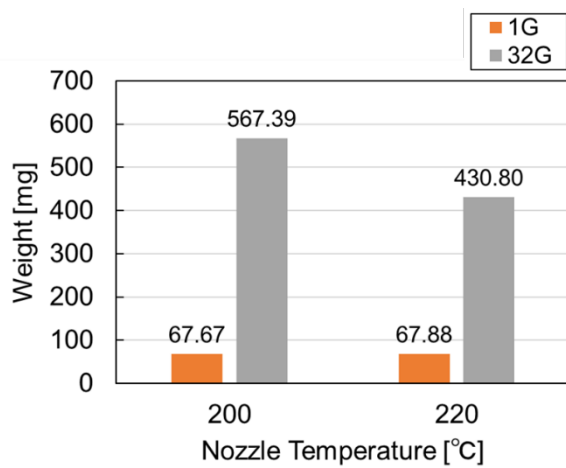


図 8：造形物重量の比較

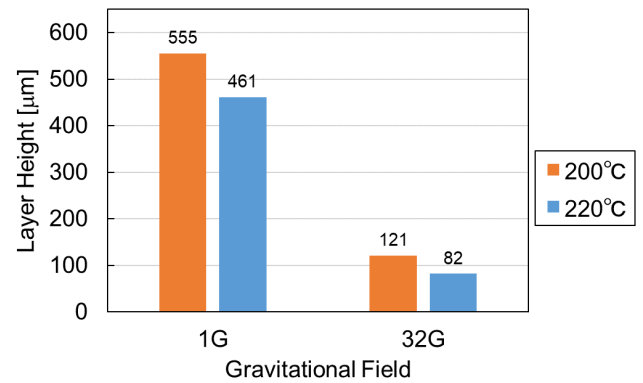


図 9：造形物の 1 層あたりの高さ

図 5 に本研究で開発した高重力場 MEX の外観を示す。本研究では、押出ノズルから材料が供給されるプロセスに注目したため、まずは押出ノズルを動かさず、その場で材料を押し出した。遠心加速度は 32G 場とし、1G 場において押し出された材料の様子と比較した。材料はポリ乳酸 (PLA) とし、ノズル温度は 200 °C、220 °C の 2 種類に設定した。なお、ノズル出口穴径は 0.4 mm である。図 6 に 10 秒間押し出された材料の様子、図 7 にその顕微鏡観察写真を示す。1G 場と 32G 場の実験結果を比較すると、32G 場の方がより多量の材料が押し出されながら、直径が非常に

小さい構造物が確認された。

図 8,9 にそれぞれ、造形物の重量および 1 層あたりの平均高さについてまとめる。単位時間あたりに押し出される材料の重量は、1G 場と比較すると 32G 場において激増しており、200 °C では 8.38 倍、220 °C では 6.33 倍になった。1 層あたりの高さについても、32G 場の結果は 1G 場の結果と比べ、200 °C では 0.21 倍、220 °C では 0.17 倍になった。より高い重力場を付与することで、MEX の造形効率と造形分解能を両立して劇的に高められる可能性を示した。

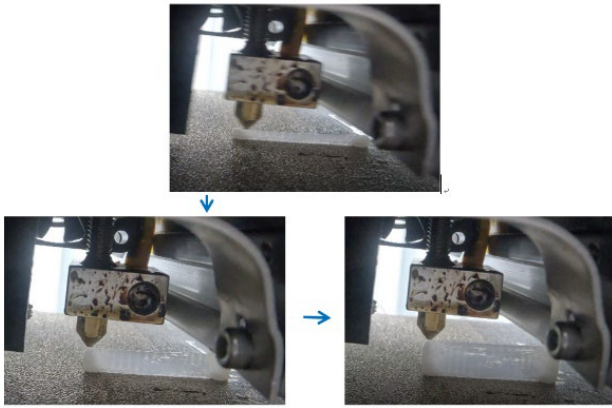


図 10：高重力場における薄壁造形の様子

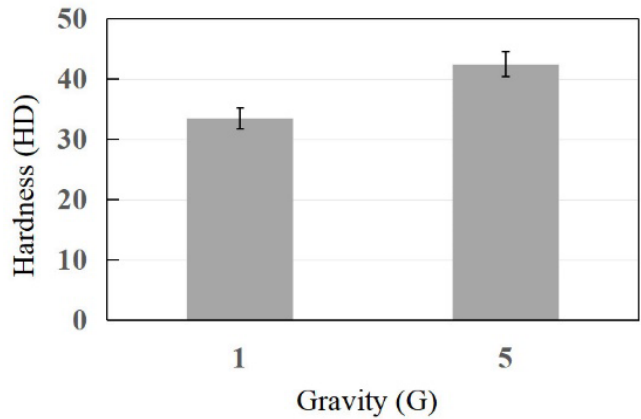


図 11：薄壁側面上のピッカース硬度試験の結果

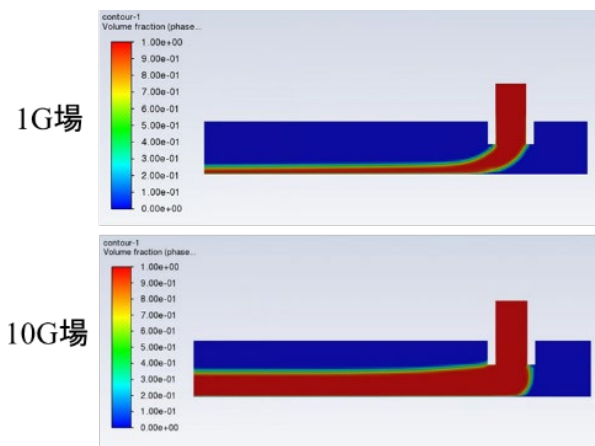


図 12：固液混相流体解析による高重力場 MEX の材料押出の解析結果。

次に、2 軸ステージを実装し、5G 場までの高重力場で 0.4 mm ノズルによる 3D 造形を行った様子を図 10 に示す。回転中でも安定的に造形できることを示したが、回転時にノズル先端に振動が生じ、壁面にうねりが生じた。図 11 に示すとおり、側面からのピッカース硬度試験において、5G 場において造形したサンプルの方が高い硬さを示したことから、層間の接着強度は高まったといえるが、ノズル駆動系の剛性設計が不十分であり、ノズルの振動を抑制できれば、より高強度な造形物を作製できたと考えられる。現状では、10G 場以上でノズルの振動がさらに大きくなり、安定的な造形が困難となった。

図 12 には、MEX に対する高重力場の影響を理論的に評価するために、固液混相流体シミュレーションによる解析を行った結果を示す。10G 場においてより多くの材料を押し出していることがわかる。図 13 に示したノズル出口付近での流体通過速度の分布からも、重力加速度を高めるほど単位時間あたりに押し出される材料の質量が大きくなることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究は 2 ヶ年において、高重力場 MEX の開発に挑戦し、高重力場において MEX のプロセス特性が大きく変化することを実験的に示した。材料押出プロセスについては、

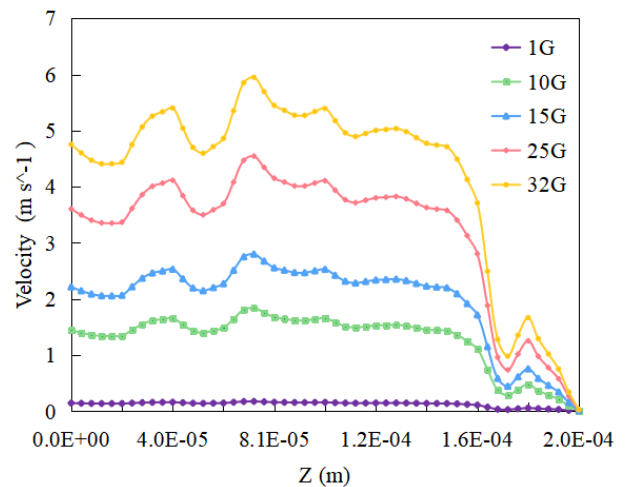


図 13：ノズル出口近傍における熔融材料の押し出速度と重力加速度の関係。

32G 場までの高重力場で、単位時間当たりの材料押出量が大幅に増加することを明らかにした。一方で、立体造形物を作製する場合は、回転中にノズル先端に振動が生じてしまい、5G 場程度の重力レベルでなければ安定的に造形できなかった。5G 場までの成果でも、造形物の強度が向上することは明らかとなった。今後、より高い重力場加速度においてもノズル送りを安定的に行える 3 軸駆動ステージの開発を行い、更なる高重力場における実験を行い、最高 100G 場の実験結果を取得することを目標とする。

【参考文献】

1. M. Schmidt et al., CIRP Annals, **66**(2), 561 (2017).
2. T. Prater et al., The Int. J. of Adv. Manuf. Tech. **101**, 391 (2019).
3. R. Koike et al., CIRP Annals, **70**(1), 191 (2021).
4. G. Sontti et al., CHEM. ENG. J. **330**, 245 (2017).
5. S. Cai et al., ASC Omega **6**(51), 35711 (2021).

業績

【原著論文】

- 1.Xin Jiang, Ryo Koike, Polymers, 15(14), 3037 (2023)
- 2.Xin Jiang, Ryo Koike, Scientific Reports, 13, 14224 (2023)
- 3.Xin Jiang, Ryo Koike, Heliyon, 10(11), e32161 (2024)

March, 2024.

【特許】

- (1)国内特許出願 1件 (2023年7月)
- (2)国際特許出願 0件

【口頭発表】

1. 小池綾, Xin Jiang
流体解析に基づく重力変化が材料押出法に与える影響の評価
日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2023、
九州工業大学 戸畑キャンパス、2023年3月6日
2. 小池綾, Xin Jiang
高重力場における材料押出法の材料供給特性評価
2023年精密工学会春季大会学術講演会、東京理科大学
葛飾キャンパス、2023年3月16日
3. 小池綾, Xin Jiang
高重力場材料押出プロセスにおける材料特性の影響の評価
2023年精密工学会秋季大会学術講演会、福岡工業大
学、2023年9月13日
4. Xin Jiang, 小池綾
Computational fluid dynamics simulation for evaluating
influence of gravitational acceleration on material extrusion,
2023年精密工学会秋季大会学術講演会、福岡工業大
学、2023年9月13日
5. Xin Jiang, Ryo Koike
Design and Evaluation of High-gravitational Fused
Deposition Modeling System, 4D Materials Design and
Additive Manufacturing 2023, Atlanta, USA, 7th September,
2023.
6. Xin Jiang, Ryo Koike
Evaluation for fused deposition modeling in high
gravitational fields, The 25th International Symposium on
Advances in Abrasive Technology, Taichung, Taiwan, 11th
December, 2023.
7. Xin Jiang
Effects of High Gravity Conditions on Additive Manufacture
by Fused Deposition Modeling, 2nd International Conference
and Expo on 3D Printing and Additive Manufacturing, 22nd