

# 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を有する 3D 造形を高重力場で実現し得る。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 [1]。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 [2]。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。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莫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、莫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、高重力場によって莫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。

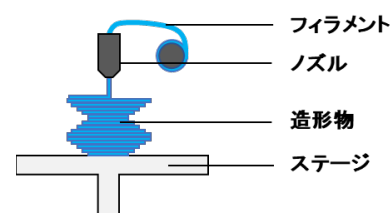


図 1: 材料押出 (MEX) の模式図

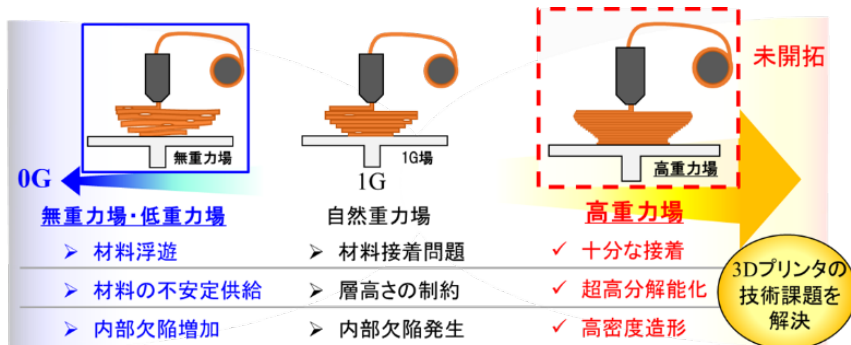


図 2：異重力場における MEX の特性変化

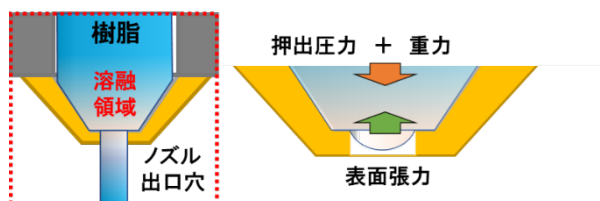


図 3：MEX における樹脂材料の押出プロセスの模式図

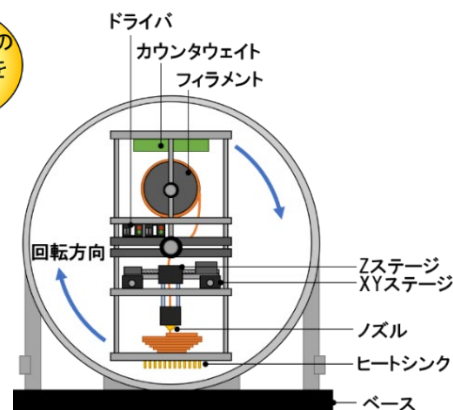


図 4：高重力場 MEX 装置の概要図

## 2. 高重量場における MEX の造形分解能向上

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。つまり、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/m<sup>3</sup>] は密度差、 $g$  [m/s<sup>2</sup>] は重力加速度、 $L$  [m] は代表長さ、 $\sigma$  [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 1n 倍の大きさとなった場合、重力加速度は n<sup>2</sup> 倍とすればよいことから、たとえば 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 ユニートを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 ±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場合は、この変動による造形プロセスへの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 倍にすることを目標としている。

## 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ており、高重力場におけるノズルからの材料押出実験結果が揃いつつある。図 5 に現状の装置開発状況を示す。

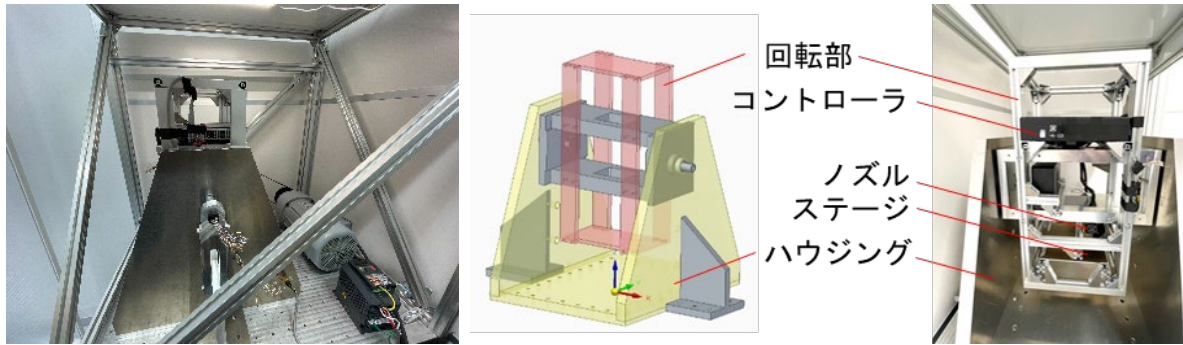


図 5：高重力場 MEX 装置の開発状況

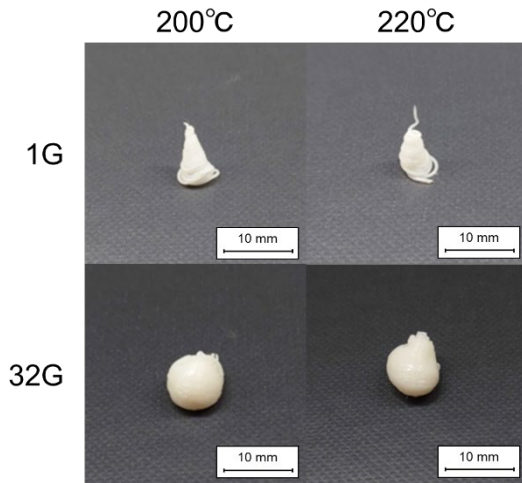


図 6：造形物の外観

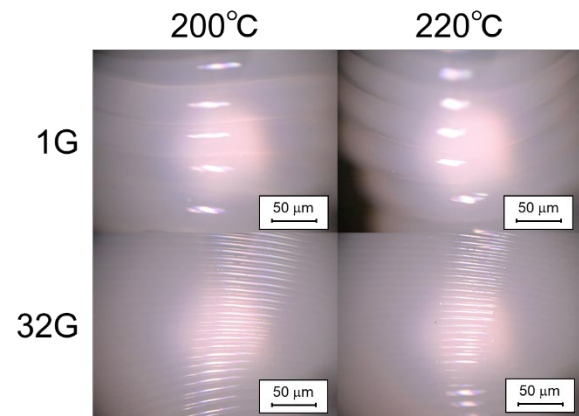


図 7：造形物表面の拡大写真

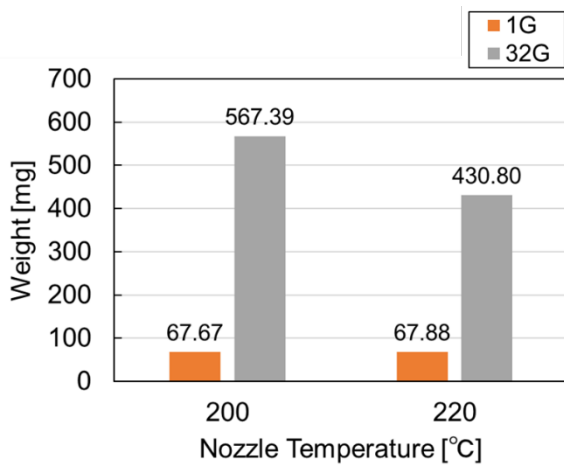


図 8：造形物重量の比較

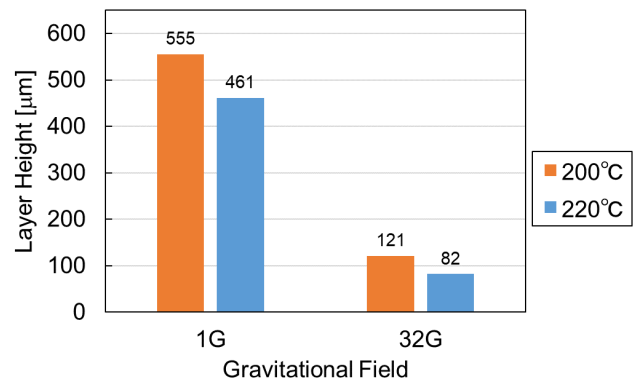


図 9：造形物の 1 層あたりの高さ

まず、押出ノズルから材料が供給されるプロセスに注目するため、押出ノズルを動かさず、その場で材料を押し出す実験を行った。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 に設定した。なお、ノズル出口穴径は 0.4mm 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、非常に径が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といえる。

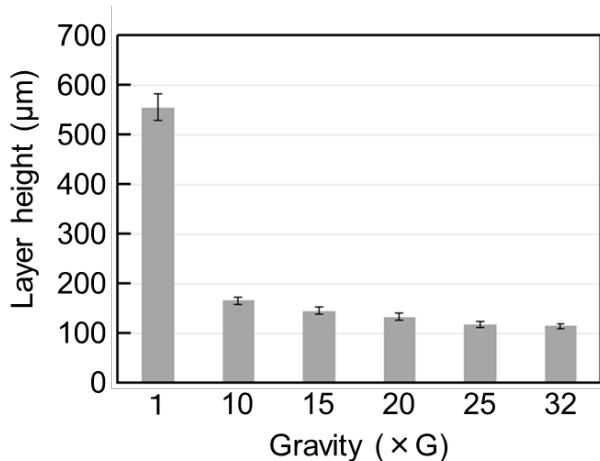


図 10：1層あたりの高さの比較

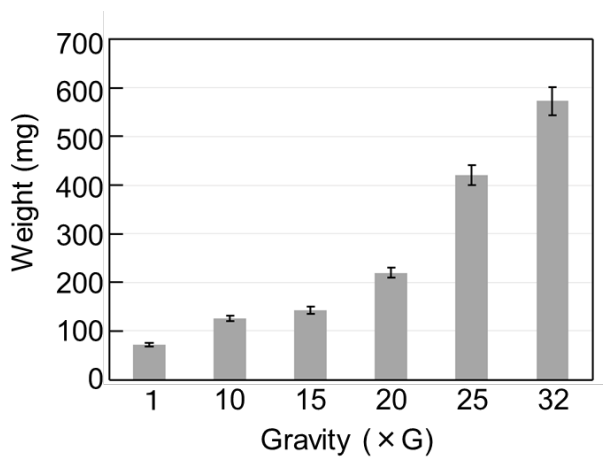


図 11：堆積物重量の比較

つぎに、ノズル温度は 200°C に固定し、押し出された堆積物の層高さと質量について、同様の評価を 1G から 32G の間のさまざまな重力レベルにおいて行った。10 秒間押出を行った際の、堆積物の 1 層あたりの高さと質量について、図 10, 11 にまとめる。1 層あたりの高さについては、10G でも 1G と比べて劇的に小さくなっていることから、高重力場によるサイズ縮小効果が顕著に現れることがわかった。一方で、堆積物重量については、重力加速度を高めるほど向上する傾向が確認できた。単位時間当たりの材料押出量を高めることによって、造形効率を大幅に高められるため、3D プリンタの技術的な弱点である造形時間の大幅な短縮に寄与できる結果といえる。

以上の結果を踏まえて、2 カ年目の早期にステージ駆動系を完成させて、本格的な MEX を高重力場で実行することで、実形状を造形する上でも高重力場がたしかに有用な効果を発揮することを今後示していく。

## 5. シミュレーション結果

本研究では、高重力場において MEX が得られる効果を理論的に説明する上で、流体シミュレーションも活用している。実現象を十分に再現可能なシミュレーションは、今後の装置改良などにおいても最適解を導出するために利用できる[4,5]。

MEX における材料の質量流量解析を行うにあたり、作製した 3D モデルを図 12 に示す。溶融した材料が通り得る空間を定義し、材料密度と空気密度の差から、材料押出の様子を再現する。このシミュレーションの解析結果の例として、図 13, 14 において、PLA の物性値を適用した質量流量解析の結果の例を示す。図 13 からわかるとおり、1G 場においてはノズル出口から押し出された材料の先端が丸みを帯びているのに対して、図 14 に示すとおり、32G の高重力場においては押し出された材料先端が細くなっていることがわかる。このことから、ノズル出口径を変更しなくても、押し出される材料の線幅は高重力場において非常に小さくなる可能性がある。この傾向は、実験において 1 層あたりの高さが高重力場において小さくなったことと一致している。

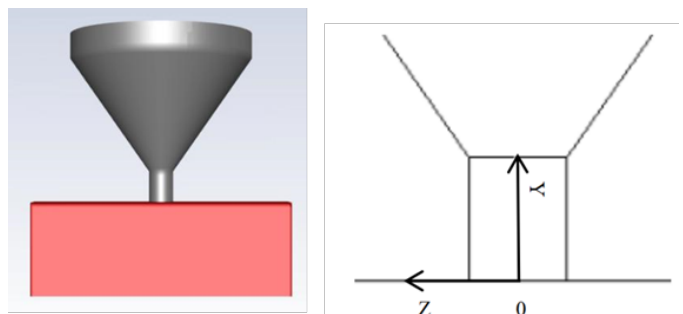


図 12：MEX プロセスの 3D モデル

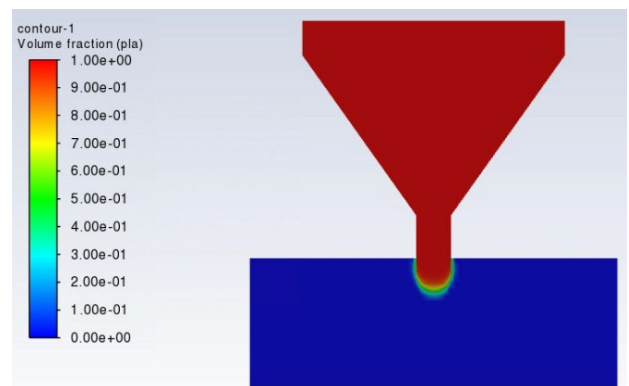


図 13：造形開始直後の材料押出の様子（1G）

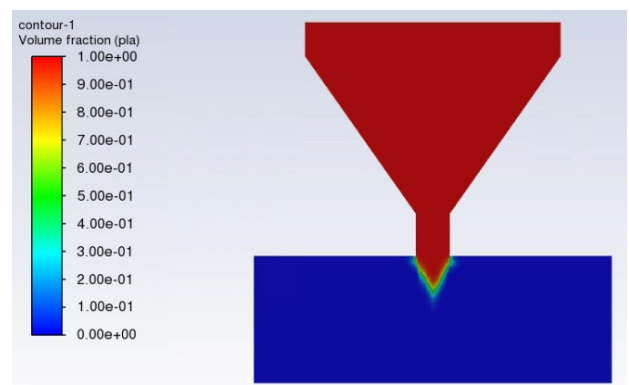


図 14：造形開始直後の材料押出の様子（32G）



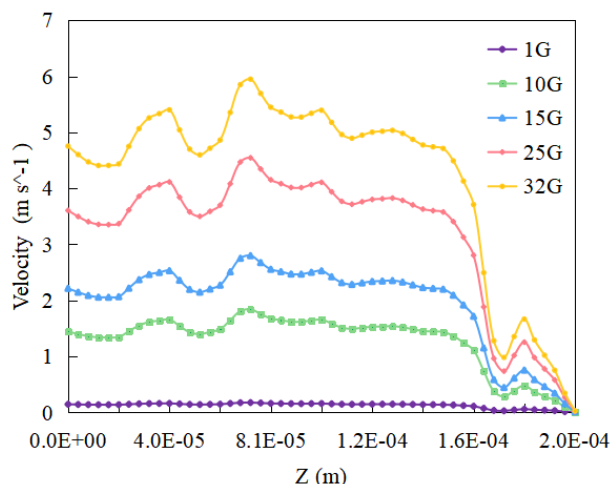


図 15：各重力レベルにおけるノズル出口近傍の材料押出速度の違い

図 15 にノズル出口の材料押出速度について、重力加速度ごとに示したグラフを示す。1G と比較すると、単位時間あたりにノズル出口から押し出される材料の質量が、他のどの高重力場においても増加することがわかる。また、図 11 の堆積物質量を確認すると、重力加速度が大きくなるほど材料押出質量も大きくなるという傾向と一致している。以上から MEX プロセスは質量流量解析によって一定の信頼性をもって解析が可能と考えられる。

本研究では今後、ノズル形状の設計や、ステージの駆動条件等と合わせて、プロセスパラメータの最適化のために流体シミュレーションを活用していく。

## 6. まとめ

本研究では、高重力場において MEX が得られる効果として、造形効率の向上と造形分解能の向上に寄与する、ノズルからの材料押出プロセスについて実験的かつ解析的に評価を行った。高重力場において単位時間当たりの材料押出質量は大幅に向上し、1 層あたりの高さも劇的に小さくできる効果を確認できた。シミュレーションにおいても押出材料の小径化や単位時間当たりの押出量の増加を確認することができ、MEX に高重力場を付与する優位性をたしかに示すことができた。今後、ステージ駆動系を適用することで、MEX 造形物の品質が向上することを、実形状を造形することで示し、高重力場 MEX の有用性を明らかにしていく。

### 【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

## 【口頭発表】

### 1.小池綾

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、  
2023年3月6日、九州工業大学 戸畑キャンパス

### 2.小池綾

高重力場における材料押出法の材料供給特性評価

2023年精密工学会秋季大会学術講演会、2023年3月  
16日、東京理科大学 葛飾キャンパス

## 【特許】

(1)国内特許出願 1件