

森本康平

MORIMOTO Kohei

キーワード
3Dプリンタ、粘土、陶芸、セラミック材料

Keywords
3D Printer, Clay, Pottery, Ceramic Materials

In this study, I investigated a simple evaluation method of material properties for modeling with a clay 3D printer and analyzed the relationship between material properties and modeling quality. In the process of clay 3D printing with different material samples, material hardness, moisture content, appearance evaluation and material shrinkage of the modeled object, and bending strength of the sample after sintering were measured. As a result, it was found that

measurement using a durometer may be a valid evaluation method for clay materials. In addition, it was suggested that the strength of the 3D printed object was less deteriorated than that of a clay piece filled to the same size. The strength degradation of the modeled object due to the amount of water contained in the material was small, but the shrinkage rate in the height direction was large. This study provides preliminary findings on clay 3D printing.

はじめに

3Dプリンタを活用したアディティブ・マニュファクチャリング（AM: 積層造形）技術は、生産工程の効率化や既存の技術では製造不可能な形状を実現できることから、工業用途をはじめとする多様な領域で活用が拡大している。また、機材の低価格化が進んだ結果、個人のユーザーへの普及も広がり、ものづくりに関与する人材の多様化にも繋がっている。さらに、近年は様々な材料のAM技術が進展しており、一般的なプラスチック材料に加え、金属や食品などの積層造形も可能となっている。

それらの一つとして、セラミック材料の3Dプリンティングに関する研究開発が数多く行われている。アルミナ粉末やジルコニア粉末をベースとした方式は、精密な造形物を製造できるため、工業用や医療用として研究開発が進んでいる。一方で、コンクリートや粘土等のペースト状のセラミック材料を押し出しながら積層させる造形方法は、主に建築業界で活用が期待され、実証実験が盛んに実施されている。また、後者に関しては、従来の製法の置き換えに留まらず、新たな造形表現のためのリサーチも行われており、シーラによる建築ファサードへの展開¹⁾や、ローゼンヴァッサーらによる網目状の表現への実践研究²⁾が行われている。これらの多くは、ロボットアームを使用するなど大型且つ高価な機材が使用されているが、ペースト材料の3Dプリンティングは安価な機材でも実現することができる。そのため個人ユーザーによる陶芸作品の制作を想定したデスクトップサイズの粘土3Dプリンタの開発も進んでおり、既に複数のメーカーから市販されている。また、機材の普及が推進される一方で、粘土3Dプリントを想定したデータジェネレートシステムの開発事例も報告されており³⁾、さらなる活用拡大が期待される。

しかし、粘土3Dプリンタの普及に関しては課題もある。その一つが造形の難しさである。プラスチック材料は、フィラメントと呼ばれる3Dプリント用の材料が販売されており、基本的な物性は統一されている。しかし、粘土は種類や産地によって物性が異なる上、実際に使用する際は、水分の追加や土練りなど、ユーザー自身による作業が必要となる。適切な造形条件に関しては、機材ごとのユーザーコミュニティの中で情報が共有されているが、定量的な研究は行われておらず評価方法も確立されていない。これは、機材の性能、ソフトウェアによる出力条件の設定、材料の物性及び焼成条件など、多数のパラメータが存在するため、比較評価を行うことが困難であるためと考えられ

る。しかし、一定の条件下において、各種パラメータが造形物に及ぼす影響を評価することは、機材の発展や造形表現の多様化に貢献できると考える。

そこで本研究では、粘土3Dプリンタによる造形のための材料物性の簡易的な評価手法について検証を行うとともに、小型の粘土3Dプリンタの出力条件と造形品質の関係性について評価、分析を行う。

1. セラミック3Dプリンタの動向と先行研究

1.1 セラミック3Dプリンタ

セラミック材料の3Dプリンティング技術は、大きく二つの方式に分類される。一つは樹脂をバインダーとして用いる方式で、セラミックス原料と樹脂バインダーの混合粉末の層にレーザーを照射することで樹脂を溶着させ、積層していく選択的レーザー溶融法や、粉末状のセラミックス材料に、つなぎとなる樹脂（バインダー）を噴射しながら積層して成形を行うバインダージェット方式、そして、光をあてると硬化する樹脂にセラミックス材料を混ぜたペースト状材料に紫外線を照射し、一層ずつ成形する光造形法などに細分化される。これらは、精度が高く工業製品や医療製品への用途が期待されている。いずれも成形した後に、焼成工程を経て完成するが、レーザー光によって一気に最終焼結まで行う技術の研究開発も進められている。

もう一つはペースト状の材料をスクリーンによって送り出しながら、積層する方式で、エクストルージョンベース3Dプリンティング（Extrusion-Based 3D printing）やダイレクトインクライティング（DIW: Direct Ink Writing）方式と呼ばれている。これらは、一般向けに普及している熱溶融積層（FDM: Fused Deposition Modeling）3Dプリンタと同様の機構を転用し、プラスチックを溶かしながら押し出すエクストルuderの代わりに、ペースト材料を吐出するエクストルuderを取り付けた方式のほか、ロボットアームの先端にノズルを取り付けるタイプも存在する。エクストルージョンベースの方式は、樹脂をバインダーとする方式と比較し安価で大型化も容易であることから、建築領域での活用が期待されている。また、近年はバイオインクと呼ばれる生体材料を使用する精密なDIW技術を活用し、骨などの生体パーツを生成する研究も進んでいる。

1.2 粘土3Dプリンティングに関する先行研究の調査

粘土3Dプリンティングに関する研究事例は、コンクリートやモル

タルの3Dプリンティングと比較し非常に少ないが、海外を中心に多様な試みがなされている。

例えば、サンジョルジオらは、粘土3Dプリンティングによって生成される粘土レンガに関する研究を行っており、パラメトリックモデリングを利用して、多様な内部構造を持つ18個のレンガのセットをモデル化し、強度解析及びプロトタイプ制作を実践している⁴⁾。また、シルバラは、赤土とコーヒー残渣を混合したセラミックペーストの提案を行っており、造形物の外観、化学的特性、機械的特性を評価するとともに、ペーストの挙動を調査し、3Dプリンティング試験を実施している⁵⁾。また、機材に着目した研究も行われている。マニカンダンは、ノズル形状が、元データとの輪郭偏差及び造形物の機械的特性へ与える影響を評価し、円形ノズルは表面粗さと輪郭偏差が小さく、角形ノズルは圧縮強度に関しては性能が上がるが、輪郭偏差と表面粗さは比較的大きくなることを明らかにしている⁶⁾。

個人向けの粘土3Dプリンタ用いた事例としては、バルドワジらが実施した研究事例が挙げられる。彼らはWASP社の粘土3Dプリンタ「Delta WASP 2040」を用いて、出力パラメータと出力されたサンプルの表面品質に及ぼす影響を分析しており、出力速度、層厚、空気圧などのパラメータの組み合わせが表面品質に影響を与えることを明らかにしている⁷⁾。

これらの多くは、機材の構造や出力条件に関する記述はあるが、モーターのトルクやシリンダー径など、機材の吐出能力に影響する言及が行われていない。また、使用する材料に関しても、水等との配合率は記載しているが、物性の定量的な評価は行われていない場合が多く、比較評価が行いにくいという問題がある。

2. 粘土3Dプリンタの仕組み

2.1 粘土3Dプリンタの仕組み

陶芸用のExtrusion-Based 3Dプリンタは、WASP社やEazao社など、複数のメーカーから市販されており、現在も開発が進んでいる。本研究では2021年に販売が開始されたEazao社のEazao Zeroを使用した。本機を元に粘土3Dプリンタの構造の説明を行う。



fig.1 粘土3Dプリンタの外観

粘土3Dプリンタの構成要素は、大きく以下の4つの部分に分けられる。

- ・材料タンク／押し出し機構
- ・エクストルーダー（押し出し器）
- ・3Dプリンティング機構
- ・スライサー（出力設定用ソフトウェア）

材料タンク／押し出し機構

材料となる粘土を充填するシリンダーと、材料を押し出す機構が一体となっている。(fig.2) 押し出し機構は、ネジを切られたシャフトをステッピングモーターにより回転させながら先端のピストンを送り出す方式と、ポンプを接続し空気圧で送り出す方式がある。材料の硬さや造形速度に応じて、モーターの回転速度や空気圧を調整する。

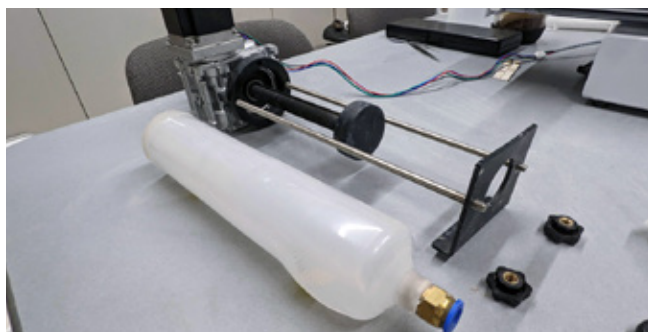


fig.2 材料タンクと押し出し機構

エクストルーダー（押し出し器）

エクストルーダーは、スクリーを回転させるステッピングモーター、材料を投入するシリンダー、及び先端ノズルから構成される。(fig.3) 材料タンクから押し出された材料は、チューブを介してシリンダーの側面の穴から内部に送り込まれる。シリンダーの内部は縦に円筒状の穴が開いており、同径のスクリーが嵌るようになっている。出力時は上部のステッピングモーターによってスクリーを回転させ、スクリーの溝を介して材料を送り出し、先端のノズルから吐出する。(fig.4) 造形速度や積層高さに応じて適切な量の粘土が吐出されるよう、モーターの回転スピードを制御することができる。



fig.3 エクストルーダーの構造

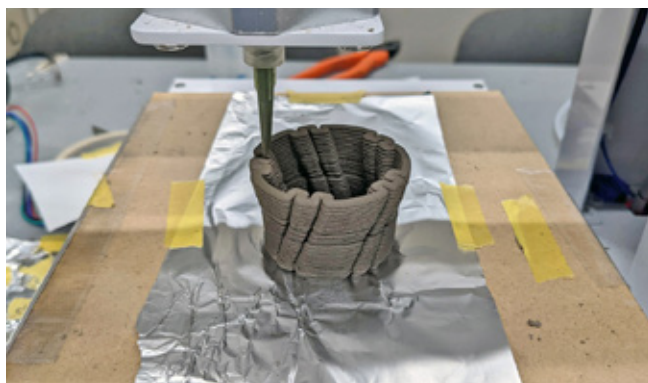


fig.4 粘土3Dプリンタによる出力の様子

3Dプリンティング機構

造形データを元にエクストルーダーの位置を制御し、材料を一層ず

つ積層させながら立体物を造形する機構。一般的なFDM型3Dプリンタと同様にボックス型の機体と、3本の支柱で構成されるデルタ型の機体がある。また、ロボットアームの先端にエクストルーダーを取り付ける場合もある。

スライサー（出力設定用ソフトウェア）

3Dモデルを3Dプリント用のGコードデータに変換するためのソフトウェア。(fig.5) 材料の特性や求める品質に応じて、積層高さ、移動速度、内部の充填率などの設定を行う。

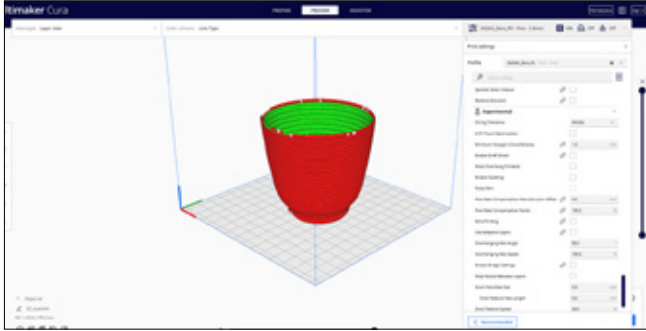


fig.5 スライサー（Cura）の設定画面

2.2 Eazao Zeroの仕様

本研究で使用する Eazao Zero は、個人ユーザー向けの粘土3Dプリンタで、2021年に販売が開始された。同社は2019年頃から粘土3Dプリンタを開発、販売していた企業で、同機はその最新モデルとなる。

本機材の仕様の中で、機材の性能に関する項目を抜粋し table 1 に記す。なお、ステッピングモーターの仕様は品番を元に調査し、材料シリンダーとチューブ内径は実寸を計測した。



fig.6 Eazao Zeroの外観

ステッピングモーター (押し出しロッド)	保持トルク	1.2 N.m
	ローター慣性モーメント	280 g.cm ²
ステッピングモーター (エクストルーダー)	保持トルク	0.4N.m
	ローター慣性モーメント	57g.cm ²
材料シリンダー内径		50mm
チューブ内径		6.5mm
ノズル直径		1.5mm
ワークサイズ		150 x 150 x 240 mm
定格電圧 / 電流		DC 12V / 10A

table 1 Eazao Zeroの仕様

3. 研究方法

3.1 材料サンプルの作成方法

材料となる粘土は、陶芸用の粘土として一般的に使用されている信楽特選白土（手びねり用）（陶芸.comにて購入、<https://www.tougei.com/shop/c/c71/>）を選定する。本材料を用いて、水分量の異なる4種類の材料サンプルを作成する。各材料サンプルの水の配合比率を table 2 に示す。なお、各材料は、水分を吸収しないようプラスチックトレーの上で荒練りを行った後、水を徐々に加えながら、水分が全体に分散するよう十分に捏ねる。(fig.7)

材料	粘土 [g]	水 [ml]	重量比率 [%]
材料サンプル①	500	5	1
材料サンプル②	500	10	2
材料サンプル③	500	15	3
材料サンプル④	500	20	4

table 2 材料サンプルの粘土と水の配合比率



fig.7 材料に水を加えた様子(左) / 完成時の状態(右)

3.2 材料の評価方法

(1) 硬さ計測

材料の押し出し易さを計測するため、各サンプルの硬さ測定を行った。コンクリートや塗料などのペースト状材料の場合、一般的に粘度計を用いた評価が行われるが、粘土は非常に粘度が高いため、同様の手法による計測が困難である。このような場合は、テクスチャーアナライザによる評価が適切であると考えられるが、計測機器は非常に高価であり、一般のユーザーが制作過程の中で使用することは難しい。そこで、本研究では、安価で簡易的な評価手法としてデュロメータを用いた硬さ測定を試す。計測には、デュロメータ (GS-754G, TECLOCK) と計測スタンド (GS-612, TECLOCK) を用い、下降速度 2mm/s、おもり無しで測定を行う。(fig.8)

評価サンプルは内寸幅 110mm × 奥行 60mm × 高さ 11mm の型枠の中に各材料サンプルを隙間なく敷き詰めることで作成する。測定時は型枠を外し、材料端面から 12mm 以上離れた地点を 5 点計測し、平均値を算出する。



fig.8 硬さ試験の様子

(2) 水分量の測定

各材料サンプルの断面をランダムに 5 か所選択し、水分測定器 (SA-940A, 株式会社佐藤計量器製作所) を用いて計測し、平均値を

算出する。なお、粘土材料は随時乾燥及び硬化が進むため、硬さ、水分量の測定は、各材料サンプルの生成直後に行い、その後速やかに造形テストを実施する。

3.3 試験片サンプルの作成方法

造形品質を評価するために、2種類のサンプルを制作する。

(1) オーバーハング試験サンプル

エクスルージョンベース 3D プリンティングでは、オーバーハング状に積層させる場合、外側に当たる箇所が垂れ、造形不良になるという問題がある。サポート材を同時に出力することで回避することもできるが、一定程度の角度であれば、サポート材を付けることなく造形できる可能性がある。そこで、幅 15mm×厚み 3mm×高さ 15mm の直方体を、水平面と外壁の角度が、30°、45°、60°、75°、90°になるよう傾斜させた 3D モデル (fig.9) を生成し、サポート材無しで出力した場合の、造形可能性と外観の品質を評価する。

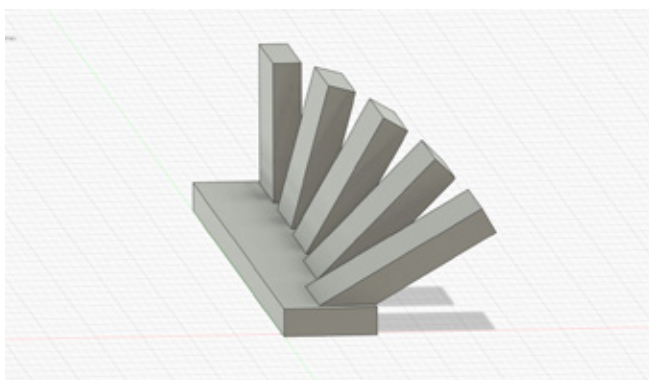


fig.9 オーバーハング試験サンプルの3Dモデル

(2) 物性試験サンプル

強度試験用のサンプルとして、板状の試験片の制作を行う。試験方法に関しては、ファインセラミックの曲げ強度試験について規定した日本工業規格 JIS R 1601 : 2008 を参考にする。しかし、規定されている試験片のサイズは非常に小さく、粘土 3D プリンタで造形することが困難である。そこで樹脂材料の強度試験のサイズを参考に、長さ 80mm×幅 10mm×高さ 4mm の試験片を作成する。(fig.10)

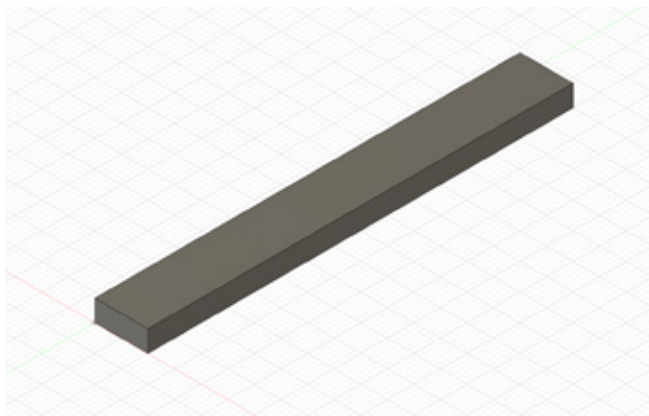


fig.10 物性試験サンプルの3Dモデル

3.4 粘土3Dプリンタによる出力

粘土 3D プリンタ Eazao Zero を用いて試験片サンプルの造形を行う。出力条件を設定するためのスライサーはオープンソースのソフトウェア「Cura」を用い、各パラメータは Eazao 社による推奨値をベー

スとして設定する。主な設定値を table 3 に示す。

なお、本来は材料の特性に合わせてパラメータを変更することで、良好な造形結果を得ることができる。しかし、造形スピード等のパラメータを変更することで、造形物の物性値に影響を与える可能性があり、材料ごとの品質の違いを正確に評価できなくなる。そのため、本研究では、全ての材料サンプルを同一の出力条件で加工し、材料物性の違いが造形プロセスや出力物の物性に与える影響を評価する。

また、強度試験サンプルに関しては、3D プリンタで造形された試験片に加えて、同サイズの型枠に材料を隙間なく敷き詰めて作成した試験片を用意した。この試験片を通常の陶芸のプロセスにて制作される状態と想定し、比較対象として強度試験を実施する。

パラメータ	設定値
LayerHeight	0.6 / 1.0 / 2.0mm
Line Width	1.5mm
Wall Line count	2
Initial Bottom Lines	2
Infill	100%
Infill Line Distance	1.5mm
Infill Pattern	Lines
All Flow Parameter	100%
Print Speed	20mm/s
Initial Layer Speed	15mm/s

table 3 粘土3Dプリンタの出力設定

3.5 材料の特性と造形品質の関係に関する評価方法

(1) オーバーハング形状の造形品質の評価方法

材料の物性が成形性や造形品質に与える影響を調査するため、各材料サンプルを用いて、粘土 3D プリンタによりオーバーハング試験サンプルの造形テストを実施する。積層高さ (Layer Height:LH) を 0.6mm / 1.0mm の 2種類設定し、それぞれの造形の可否、及び造形後の外観の評価を行う。

(2) 出力物の収縮率の評価

粘土による造形プロセスにおいては、成形後の乾燥工程において造形物の収縮が発生する。水分量を増加させることで押し出し易さは向上するが、乾燥後のサイズ変化に影響がある可能性がある。そこで、造形品質の評価の一つとして、物性試験サンプルの造形直後と乾燥後のサイズを計測し、材料の特性と収縮率の関係性を評価する。

3.6 焼成後の曲げ強度

物性試験サンプルに対し 3 点曲げ試験を行い、3D プリンティングによる粘土造形物の強度評価を行う。試験片は、3.4 で作成した物性試験サンプルを素焼きし作成する。素焼きは、室温で 48 時間乾燥させた後、陶芸用電気窯 (KCE-15W、共栄セラミック株式会社) で焼成を行う。(fig.11) 焼成プログラムは 400℃ で 3 時間、800℃ で 6 時間とし、プログラム完了の 24 時間後に取り出す。(fig.12)

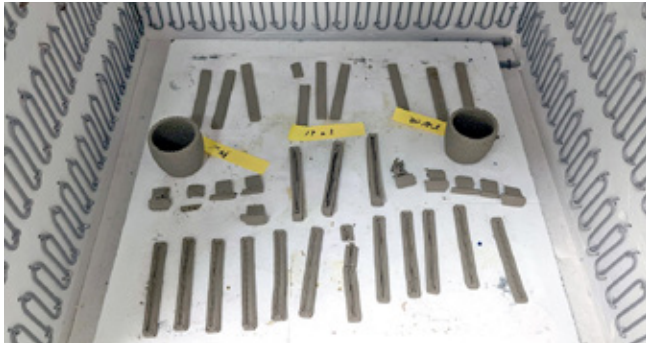


fig.11 電気窯による焼成

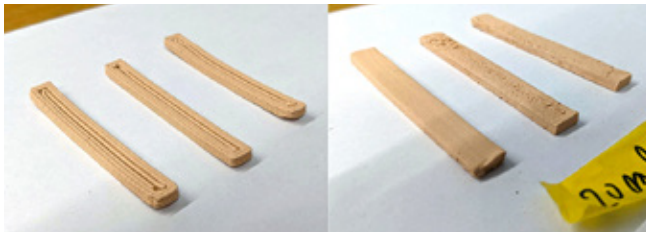


fig.12 焼成後の物性試験サンプル (左:3Dプリント/右:型枠充填)

設定項目	設定値
ストロークスピード	1.00mm/min
試験力レンジ	50N
サンプリング時間間隔	50msec
停止方法	手動
支点間距離 (L)	30mm
支持具曲率半径 (上部)	5mm
支持具曲率半径 (下部)	2mm

table 4 3点曲げ強度試験の試験条件

4. 結果と考察

4.1 材料の物性

各材料サンプルの硬さの測定結果を fig.15 に示す。デュロメータはバネで支持された先端の指針を対象物に押し当て、反力と釣り合った状態の数値を読み取る測定器であり、通常はゴムのような弾性体の硬さ計測に用いられる。粘土のような塑性変形する材料の場合、数値を絶対評価することはできず、正確な硬さ計測には適さない。しかし、材料サンプル③までは一定の傾きで数値が推移しており、計測値の再現性もあるため、材料の状態を管理し、他の材料との比較用途であれば活用できると考える。ただ、サンプル④は塑性変形の度合いが大きく、数値の信頼性がより低下していると推察される。そのため、同一の状態を再現する用途には活用できるが、他の水分量との硬さの比較には使用できないと考えられる。



fig.15 各材料サンプルの硬さの測定結果

強度試験は新潟県工業技術総合研究所中越技術支援センターの精密万能材料試験機 (AG-100KNG-M1、株式会社島津製作所) を用いて実施する。table 4 の試験条件により、最大点試験力 (破断荷重: P) と最大点応力 (曲げ強度: σ) を計測する。(fig.13, 14)



fig.13 万能材料試験機

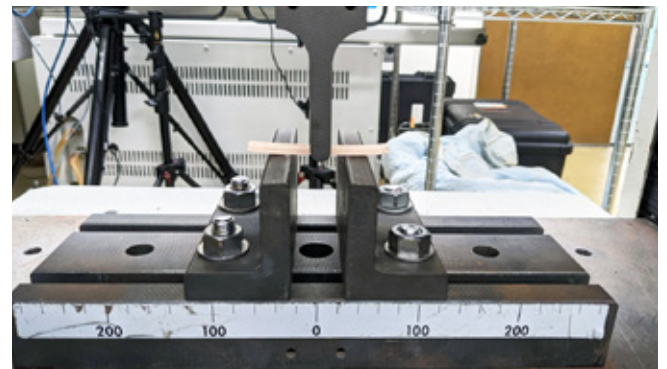


fig.14 万能材料試験機による3点曲げ強度試験

曲げ強度は、以下の式により算出する。

$$\sigma \text{ (曲げ強度)} = \frac{3 \times P \text{ (破断荷重)} \times L \text{ (支点間距離)}}{2 \times W \text{ (試験片幅)} \times t \text{ (試験片厚み)}}$$

焼成後の各サンプルの試験片幅と試験片厚みの計測値を元に応力を算出し、サンプル種別ごとの平均値及び最大値、最小値の評価を行う。

次に水分量の測定結果を fig.16 に示す。混合する水の重量の増加に応じて、わずかに水分量の増加傾向が見られる。しかし、材料サンプル①と②、及び②と③の結果の差は非常に小さく、水分量の数値によって状態を判断することは困難である。また、材料④に関しては、硬さの数値が大きく低下しており、実際の感触も他の材料サンプルと比較して相当柔らかくなったと感じたにも関わらず、水分量の数値は硬さの測定結果のような変化は見られなかった。これらより、測定器の検出レンジの検証や、測定方式自体の再検討が必要であると考えられる。

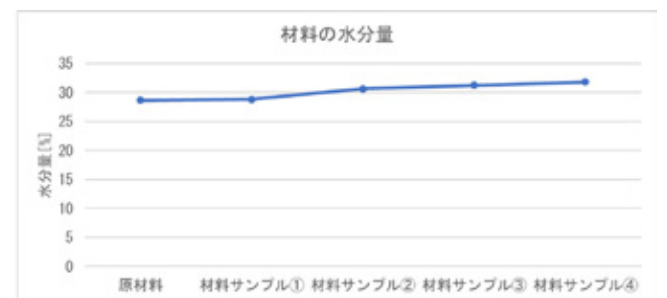


fig.16 各材料サンプルの水分量の測定結果

4.2 材料の物性と出力の可否

粘土 3D プリンタを活用し、各材料サンプルの造形試験を行ったが、適切に出力できたものは材料サンプル③（水/粘土重量比率 3%）のみであった。サンプル①（同比率 1%）は、材料タンクからエクストルーダーまで押し出すことはできたが、ノズルから出力することはできなかった。これは、材料の粘度が高すぎたことでノズルの先端から押し出されることなく、詰まった状態となったためと考えられる。なお、その状態で押し出しテストを繰り返した結果、材料タンクのシリンダー部が大きく膨張したことから材料サンプル①による出力テストを停止した。(fig.17)

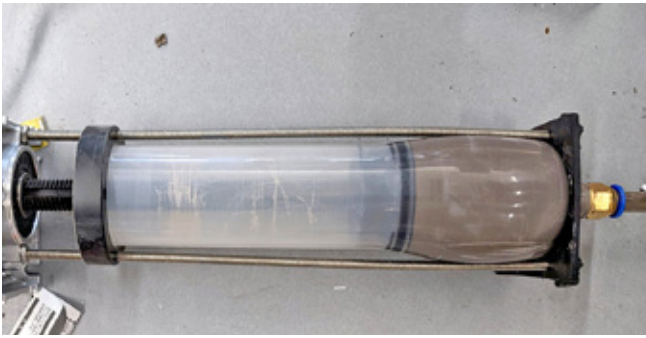


fig.17 材料タンクが膨張した様子

材料サンプル②（同比率 2%）は押し出すことができたが、積層中に粘土の吐出が途切れ、良好な造形物を得ることができなかった。(fig.18)



fig.18 材料の吐出が途切れる様子 (材料サンプル②)

また、本サンプルもシリンダー部が膨張する様子が観察された。サンプル①と同様に、材料の粘度が高いため、ノズル先端からの出力量より、タンクからの押し出し量が多い状態となったものと考えられる。ただ、先端のノズルパールを取り外し、吐出口が直径 2.9mm の状態になるとスムーズに吐出されたことから、ノズルの形状を変更することで造形できる可能性はある。

一方、材料サンプル④（同比率 4%）も、ノズルからの出力はできず、ノズルを外した状態でのみ吐出することができた。ただ、より粘度の高いサンプル③では、ノズルから出力できたことから、押し出しロッドやエクストルーダーの付属モーターのトルク不足が原因ではないと考えられる。さらに、材料タンクからエクストルーダーに送る工程までは、他のサンプルよりもスムーズであったことから、材料サンプル①②とは逆に、粘度が低すぎることから、材料吐出時にノズル先端に圧力が高まった際に、エクストルーダー内のスクリーと円柱状の空洞の隙間から材料が漏れ、内部で空転しているような状態になっているのではないかと考える。

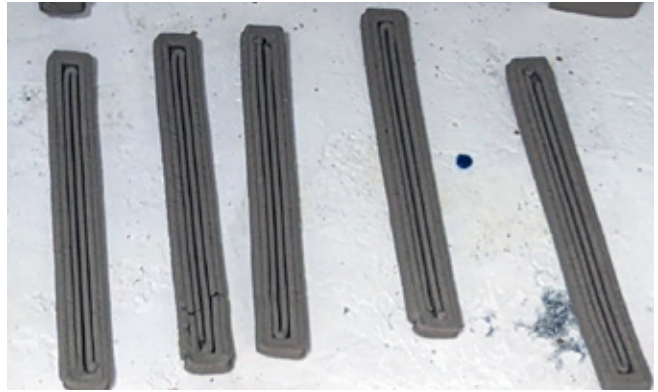


fig.19 3Dプリンタで制作した物性試験サンプル

材料③（同比率 3%）については、スムーズに吐出され、オーバーハング試験サンプル及び物性試験サンプルを造形することができた。(fig.19) そのため、以降の試験、及び分析は材料サンプル③の試験片のみを用いて実施した。

なお、材料サンプル②や材料サンプル④も、出力スピード等を調整することで造形できる可能性はある。また、よりトルクの大きなモーターや圧力に強い金属製の材料タンクを持つ機材であれば、同一の条件でも出力できるかもしれないが、本試験で使用した機材のように、モータートルクが小さく、シリンダー等が安価な仕様で設計された機材の場合、材料の物性と出力条件の許容幅は小さく、正確なパラメータ設定が求められると言える。

4.3 オーバーハング試験サンプルの外観品質

材料サンプル③を用いて、オーバーハング試験モデルを積層高さ 0.6mm と 1.0mm で出力した結果、fig.20 と fig.21 のような外観となった。

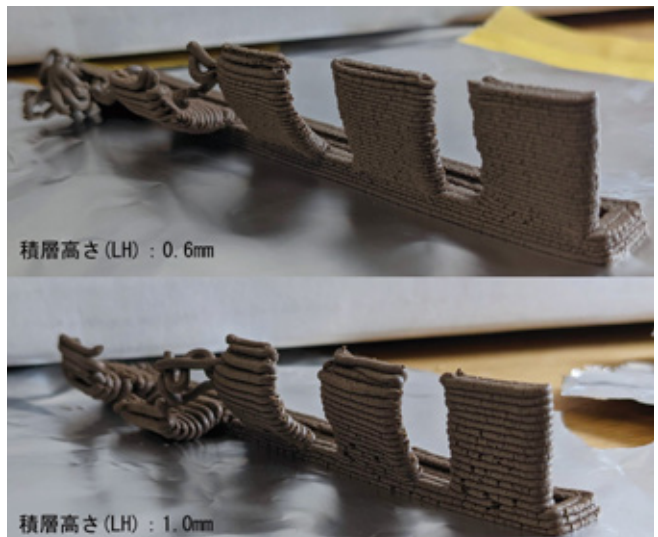


fig.20 オーバーハングモデルの造形試験結果①

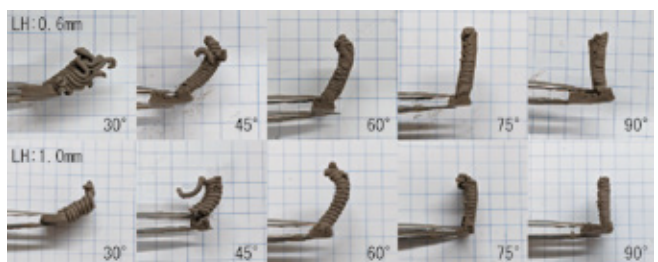


fig.21 オーバーハングモデルの造形試験結果②

いずれも 30°の傾斜を付けたモデルは全く造形することができず一方で、90°(垂直)のモデルでは良好な結果を得た。45°から 75°までの傾斜をつけたモデルでは、いずれも出力当初は良好であったが、オーバーハング部が続くことで、造形物の傾きが大きくなり、一定の高さ以上になると、吐出された材料に引っ張られ、内側に湾曲していく傾向が見られた。また、45°のモデルと比較すると、1.0mmで出力した造形物は完全に倒れているが、0.6mmで出力した造形物は、湾曲しているものの最後の層まで積層させることができた。一層の高さが小さい方が、オーバーハング部の造形には有利で、より複雑な形状に対応できると考えられる。

4.4 造形物の収縮率の測定結果

型を用いて作成したサンプル(材料サンプル②~④)と3Dプリンタを用いて作成したサンプル(材料サンプル③のみ)の収縮率の測定結果を table 5 に示す。なお、材料サンプル①については、乾燥工程において割れが生じたため、サイズの計測及び曲げ強度試験の対象から除外した。また、長さ及び幅はサンプルの中心を計測し、高さ方向は3点を計測し平均値を算出した。

本結果から高さ方向の収縮が比較的大きくなる傾向があり、水分量が多い材料サンプル④で特に顕著であることが確認される。これより、水分が抜けることによる収縮よりも、硬化するまでの重力による圧縮の影響が大きいと考えられる。なお、今回は薄板で評価したが、高さのあるモデルの場合では、この傾向が顕著に現れる可能性がある。このことから、水分比率が少なすぎるとサンプル①のように割れが生じるリスクが高まるが、一定程度に抑えた方が良好な造形結果に繋がると考えられる。ただ、今回の試験サンプルは各部位が平滑ではないため、測定誤差が発生している可能性がある。そのため、計測方法の見直しと計測サンプル数の増加が必要と考える。

	乾燥後			焼成後		
	長さ	幅	高さ	長さ	幅	高さ
材料サンプル②	96.3%	94.5%	94.5%	96.5%	94.4%	91.9%
材料サンプル③	95.6%	96.2%	92.3%	95.4%	96.3%	90.1%
材料サンプル④	95.7%	95.5%	87.9%	96.6%	95.3%	87.0%
3DP_LH1mm	97.0%	96.5%	98.6%	95.9%	96.4%	99.2%
3DP_LH2mm	99.4%	99.2%	99.1%	99.1%	97.9%	95.8%

table 5 収縮率の測定結果

4.5 曲げ強度試験結果

型を用いて作成したサンプル(材料サンプル②~④)と3Dプリンタを用いて作成したサンプル(材料サンプル③のみ)の曲げ強度試験結果を table 6 及び fig.22 に示す。

材料サンプル②~④は、元の材料の水分量の増加につれて、曲げ強度の平均値が高まる傾向にある。水分量が高い方が、乾燥時のクラックが少なくなり、亀裂のきっかけになる要因が減少することが要因の一つと考えられる。一方で最大値は材料サンプル②が最も大きく、材料サンプル④の最小値は、材料サンプル③の値を下回っている。このことから、材料表面の平滑性や微小なクラックの影響があると考えられ、材料間の強度差は誤差の範囲の可能性もある。より多くの試験サンプルによる評価が必要であると考えられるが、適切な状態で成型できれば、材料の水分比率による強度への影響は小さい可能性は高いと言える。また、3Dプリンタで造形したサンプルの強度を、型枠で成型したサンプルの平均値(4.87N/mm²)と比較すると、積層高さ1.0mmのサ

	最大点応力 [N/mm ²]			N 数
	平均値	最大値	最小値	
材料サンプル②	4.78	5.61	4.01	3
材料サンプル③	4.89	5.00	4.79	2
材料サンプル④	4.94	5.35	4.53	3
3DP_LH1mm	4.05	5.53	1.97	5
3DP_LH2mm	4.18	4.64	3.79	5

table 6 曲げ強度試験の測定結果

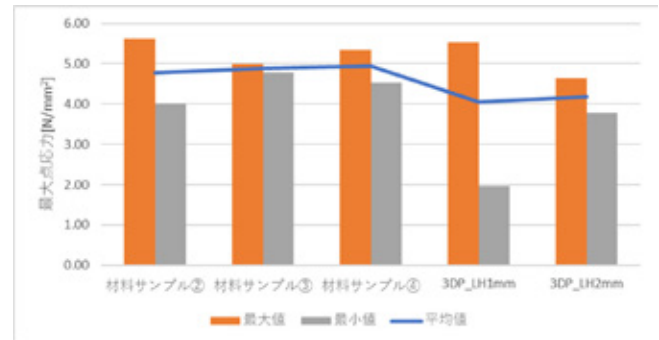


fig.22 曲げ強度の測定結果(平均値/最大値/最小値)

ンプルでは 17%、2.0mmのサンプルでは 14.2%減少している。しかし、積層高さ 1.0mmの結果に関しては、最大値が材料サンプル②~④の値に匹敵する一方で、最小値が 1.97N/mm²という非常に小さな値となっている。この最小値を測定したサンプルは、試験機の負荷がかかった後、早い段階で内部の一層が破壊し、その時の値を最大試験力として測定した。その結果、応力が非常に小さい値となり、全体の平均値を下げることになっているが、本試験結果を除いた場合の平均値は 4.577N/mm²となり、型枠により成形したサンプルとの強度の差は小さくなる。3Dプリントで積層する際は、下部の層に押し付けてはいるものの、圧力をかけて成形しているわけではなく、また、内部に隙間があることを考えると、良好な数値ではないかと考える。

5. まとめ

本研究では、材料の物性の評価方法及び材料物性と造形品質の関係に関する評価、分析を実施した。材料物性の簡易的な評価方法としては、デュロメータを用いた測定を検証し、一定の範囲内において利用価値があることが示唆された。本手法は、個人ユーザーが材料の状態を管理し、効率的な実験や作品制作を実施する上で有用な手段となり得ると考える。

また、今回用意した材料サンプルの中で、水分比率が 3%の材料サンプル以外では 3Dプリンタによる造形ができなかった。このことから、材料と出力パラメータとの関係において適切な条件があり、特定の出力パラメータがカバーできる材料の物性の幅は大きくないことが推察される。一方、同一の条件であれば、積層高さが小さい方が複雑な造形に対応できる可能性が示唆された。しかし、バドルワジらの研究において出力条件に関する各パラメータは互いに相関関係にあり、最適設定値は他のパラメータとともに複合的に決める必要があると報告されている。そのため、本結果の検証に当たっては、さらなる評価が必要であろう。

材料の水分比率に関しては、曲げ強度に与える影響は少ないが、高さ方向の収縮率に影響を及ぼす可能性が確認された。水分率が低すぎるとクラックの発生や出力不良に繋がる可能性があるため、水分量の

把握は良好な造形を行う上で重要になると考える。

強度試験からは、3Dプリンタで出力した造形物の強度低下の影響は少ないことが確認されたが、クラックの有無等、制作物の状態に大きく影響されるため、より多くのサンプルによる評価が必要であると考える。

今後の研究において、テクスチャアナライザを用いた材料の評価を実施し、デュロメータによる計測結果との関係性を分析することで、本研究で提示した簡易的な評価手法の有効性を評価できると考える。また、3Dプリンティングによる造形物は、積層方向によって大きく強度が異なるため、積層面に対して水平方向に荷重をかけた場合の評価も必要であろう。さらに、今回は同一のパラメータによる評価を行ったが、出力パラメータを変更した試験を実施し、出力可能な材料物性の範囲や、造形品質の検証を行うことで、粘土3Dプリンタを活用した造形技術に関する知見をより多く提供し得ると考える。

6. 謝辞

長岡造形大学職員風間真氏には陶芸技術に関する適切なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) Ji Shi, Yesul Cho, Meghan Taylor, and David Correa "Guiding Instability-A craft-based approach for modular 3D clay printed masonry screen units" Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference - Volume 1, University of Porto, 11-13, pp. 477-484, Sep. 2019
- 2) David Rosenwasser, Sonya Mantell, and Jenny Sabin "Clay Non-Wovens" Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) Cambridge, MA 2-4, pp. 502- 511, Nov. 2017
- 3) Benay Gürsoy "From Control to Uncertainty in 3D Printing with Clay" Proceedings of the 36th eCAADe Conference - Volume 2, Lodz University of Technology, pp. 21-30, Sep. 2018
- 4) Valentino Sangiorgio, Fabio Parisi, Francesco Fieni and Nicola Parisi "The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries" Sustainability 2022, 14 (2), 598, Jan. 2022
- 5) Sara Silva, Ana Rita Fonseca and Geoffrey Mitchell "Optimization of a New Material with Clay and Waste Coffee Grounds for Additive Manufacturing" Mater. Proc. 2022, 8 (1), 69, Jun. 2022
- 6) Karthick Manikandana, Xuepeng, Jianga Amit A.Singhb, Beiwen Li, and Hantang Qin "Effects of Nozzle Geometries on 3D Printing of Clay Constructs: Quantifying Contour Deviation and Mechanical Properties" Procedia Manufacturing, Volume 48, 2020, Pages 678-683
- 7) Abhinav Bhardwaj, Negar Kalantar, Elmer Molina, Na Zou, and Zhijian Pei "EXTRUSION-BASED 3D PRINTING OF PORCELAIN: FEASIBLE REGIONS" Proceedings of ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Jun. 2019