

論文

## 籾殻と米粉ペーストを用いた積層造形技術における 材料特性および造形品質の評価

森本 康平<sup>\*1</sup>, 津田 和俊<sup>2</sup>

(2025.2.28 受理)

### Evaluation of Material Properties and Forming Quality in Additive Manufacturing Using Rice Husk and Rice Flour Paste

Kohei MORIMOTO<sup>\*1</sup> and Kazutoshi TSUDA<sup>2</sup>

This study explores the use of rice husks, an agricultural waste, as a material for material extrusion-based 3D printing to enable environmentally friendly product manufacturing using biodegradable, renewable resources. Rice flour, readily available in rice-producing regions, was used as a binder. Composite pastes were prepared by varying the heating time of rice flour and the grinding time of husks, and were evaluated for texture properties, printability, drying shrinkage, and surface quality. Use of coarser husks increased paste hardness but decreased cohesiveness, adhesiveness, and gumminess; thus, finer husk powder was found more suitable for 3D printing. Smaller particles also led to fewer cracks and better surface quality after drying. Although significant shrinkage in wall thickness and height was observed, heating time of rice flour had little effect on shrinkage. These results offer fundamental insights into material formulation and printing conditions for using rice husk-rice flour composites in 3D printing.

**Keywords** : Rice husk, 3D printer, Rice flour, Recycle, Circular design

本研究では、農産廃棄物である籾殻の有効活用および生分解性を有する再生可能資源を用いた環境負荷の少ないプロダクト製造の実現を目的として、籾殻を材料押出式 3D プリンタの材料として活用する技術の探求を行った。バインダーとして稲作地域で容易に入手可能な米粉に着目し、籾殻と米粉ペーストの混合材料を用いた積層造形技術の確立に向けた初期実験として、材料特性および造形品質の評価を行った。はじめに、加熱時間を変化させた米粉ペーストと粉碎時間の異なる籾殻を用いた複数のペースト材料を作製し、それぞれのテクスチャー特性を測定した。さらに、3D プリンタによる積層造形試験を実施し、乾燥後の収縮率の測定および造形物表面の観察を行った。その結果、粒径が大きい籾殻を用いた場合、ペースト材料のかたさは増す一方で、凝集性、付着性およびガム性は低下する傾向が見られ、粒径の小さい籾殻パウダーの方が 3D プリントに適することが示された。造形物の乾燥後の外観に関しても、粒径の小さい籾殻を使用した方が亀裂が少なく、表面品質において優位であることが確認された。また、造形後の乾燥により、壁厚および高さ方向の収縮が顕著であることが確認されたが、米粉ペーストの加熱時間の違いによる収縮率の明確な差異は確認されなかった。本研究を通じて、籾殻と米粉ペーストを活用した材料押出式 3D プリンタによる構造体の製作において、適切な材料作成条件および出力条件を検討するための基礎的知見を得ることができた。

**キーワード** : 籾殻, 3D プリンタ, 米粉, リサイクル, サーキュラーデザイン

## 1. はじめに

### 1.1 背景

新潟をはじめ稲作地域において大量に排出される籾殻は、煙や臭気の問題から野焼きが制限されつつあり、多くの場合、産業廃棄物として有償処理されている。また、籾殻は嵩が大きく運搬効率が低いため、その処理には多くの課題が存在する。近年、ガス化システムをはじめとする籾殻の有効活用技術の開発

\* 責任著者, Corresponding author

<sup>1</sup> 長岡造形大学大学院 造形研究科

〒940-2088 新潟県長岡市千秋 4-197

Graduate School of Design, Nagaoka Institute of Design.

4-197, Senshu Nagaoka-shi Niigata-ken 940-2088, Japan

<sup>2</sup> 京都工芸繊維大学 未来デザイン・工学機構

〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町

Center for the Possible Futures, Kyoto Institute of Technology.

Matsugasaki Sakyo-ku Kyoto 606-858, Japan

が進められているものの、これらの技術の導入には大規模な設備投資が必要であり、広範な普及には至っていない。このような背景から、中小規模の稲作地域においても導入可能な小規模設備により、地域内で有効利用する方法の確立が求められる。一方で、3Dプリンタをはじめとするデジタルファブリケーション技術の発展により、小規模設備でも多様な製造が可能となる技術基盤が整いつつある。そこで、粃殻を3Dプリンタの材料として活用することで、低コストの設備投資により多様なプロダクトの製造が可能となり、粃殻の有効活用に向けた新たな展開が期待される。さらに、地域で定期的に発生する材料を利用することにより、農業を基盤とした地域循環型のものづくりの提案につながると考えられる。

## 1.2 先行研究

近年、粃殻を3Dプリンタの材料として活用する研究が進展しており、筆者の先行研究において、粃殻をデジタルファブリケーションの材料として利用するための研究事例を調査した<sup>1)</sup>。3Dプリンタ材料としての粃殻の活用方法の中で最も広く採用されているのは、熱可塑性樹脂と混合し、FDM (fused deposition modeling) 型3Dプリンタの材料であるフィラメントを製造する手法である。たとえば、TsouらはPLA (Poly-Lactic Acid) 樹脂に粃殻を混合しフィラメントを作製する研究を行っており、粃殻の前処理により純粋なPLAと比較し、引張強度の低下を抑制しつつ、生分解性の向上を実現している<sup>2,3)</sup>。Moraleらは安価且つ環境負荷の低い3Dプリント材料の実現を目的として、PP (polypropylene) 樹脂と粃殻を混合したフィラメントを作製し、粃殻の重量比が材料の物性に与える影響を評価している<sup>4)</sup>。さらに、Pengらは材料に光学的特性を付与させるため、ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) 樹脂と粃殻灰を混合したフィラメントの研究を行っている<sup>5)</sup>。また、粉末材料にバインダーを噴射しながら積層造形を行うバインダージェット方式3Dプリンタへの植物由来粉末の応用に関する研究も報告されている。たとえば、Zeidlerらはススキ粒子や木粉を用いた積層造形の試験を行い、包装材への適用可能性を示唆している<sup>6)</sup>。粃殻を用いた実験は行われていないものの、有用な材料として言及している点が注目される。さらに、ペースト材料をシリンジ型装置で押し出す材料押出型3Dプリンタへの適用事例も存在する。Muthukrishnanらは、セメントに粃殻焼却灰を混合した材料を用いた3Dプリント技術の研究を行っており<sup>7)</sup>、またFerrettiらは土に粃殻および石灰を添加した材料を用いた積層造形技術を検討している<sup>8)</sup>。いずれも建築分野での活用を想定しているが、これらにおいてはセメントや土が主材料であり、粃殻や焼却灰は添加剤として位置づけられている。これらに対して、粃殻を基材として用いた材料押出型3Dプリントの事例として、Nidaらによる研究が挙げられる<sup>9)</sup>。同研究では、生分解性を持つ食品梱包材への応用を目的とし、グラインダーおよびミルという異なる粉碎方法によって得られた粃殻パウダーに、バインダーとして食用増粘剤であるグアーガムを添加した混合材料を作製し、レオロジー特性およびテクスチャー特性等を評価している。そして、それぞれの造形適正を評価した結果、ミルによって粉碎された粃殻パウダーの方が、より優れた印刷特性を有することを

示している。

一方で、米粉を材料とした3Dプリント技術の研究も行われている。田中らは米粉を用いた3Dプリントに関する研究を行い、食器をはじめとする多様な立体物の造形に成功している<sup>10)</sup>。また、西原らも米粉ペーストを用いた研究を実施し、造形後にオープン加熱を行うことで形状が変化する可食食器の提案を行っている<sup>11)</sup>。

以上のように、さまざまな形式の3Dプリンタを対象にした材料開発が進められているが、リサイクルを効率的に実施するためには、より多くの粃殻を活用でき、且つ導入コストの低い手法が望ましいと考えられる。バインダージェット方式と材料押出方式は粃殻を基材として使用でき、材料を多く活用することができる点で有利である。しかし、前者は高価かつ装置の構造が複雑で、造形エリアの大型化も困難である。したがって、材料押出方式3Dプリンタの材料として用いることが有効な選択肢であると考えられる。これまでに報告されている粃殻を基材とした材料押出方式3Dプリントの研究は、Nidaらの事例に限られており、他のバインダーと組み合わせに関して探求の余地があると考えられる。一方で、米粉を用いた3Dプリント技術に関する先行研究により、米粉ペースト単体での積層造形が可能であることが確認されており、バインダーとしての有用性が示唆されている。米粉ペーストは米糊という形で接着剤として利用されており、増粘剤であるグアーガムとは異なる特性を造形物に付与できる可能性がある。また、粃殻と米粉はともに生分解性を有し、かつ農産廃棄物であるため原材料生産のための新たなエネルギー投入を必要としない。さらに、稲作地域で容易に入手可能であることから、材料の移動が少なく造形物のライフサイクル全体での環境負荷を抑えたプロダクト生産が期待できる。これらの材料を3Dプリント用材料として活用できれば、生分解性を活かした育苗ポット等の農業資材や梱包材などの消耗品に加え、粃殻の質感を特徴とするトレイ、ラック、スツールといった屋内用製品への応用も期待される。しかし、粃殻と米粉ペーストを用いた積層造形の事例はこれまでに報告されておらず、粃殻の粉碎方法、米粉ペーストの作成方法、両者の混合比率、さらには造形時の出力条件など検討すべき要素が数多く存在する。そのため、米粉をバインダーとして活用し、粃殻を基材として活用する積層造形技術の可能性を検討するためには、基礎的な知見の蓄積が有用であると考えられる。

## 1.3 研究目的

本研究は、粃殻と米粉ペーストを用いた積層造形の可能性を探る初期的な試みとして、ペースト材料の作成条件と材料物性および造形品質との関係性を評価し、適切な材料および出力条件を検討するための基礎的知見を得ることを目的とする。具体的には、粃殻の粒径および米粉ペーストの加熱時間を変数として設定し、材料のテクスチャー特性（かたさ、凝集性、付着性およびガム性）を測定することにより、材料の吐出性、崩れやすさ、層間の結合力といった3Dプリント特性を評価する。さらに、乾燥後の収縮率の測定と表面観察を通して、造形物の寸法精度と外観品質への影響を評価する。

なお、効率的なリサイクルの実現に向けて、より高い粃殻含有率が実現できることを、適切な材料条件の一指針と位置づ

け、考察を行う。

## 2. 材料と造形方法

### 2.1 材料の準備

#### 2.1.1 籾殻（基材）

籾殻をそのまま使用すると、押出時に籾殻と米粉ペーストの分離が発生しやすいため、はじめに 2500 W の家庭用グラインダー HC-700 (CGOLDENWAL) を用い粉碎を行う。予備実験の結果、回転速度 28000 r/min で 30 s 粉碎した籾殻では、バインダーとの分離が生じシリンダーから米粉ペーストのみ押し出される現象が確認された。そこで、本研究では回転速度 28000 r/min で 60 s および 120 s 粉碎した籾殻 (Fig. 1) を材料として用い、前者を粉碎籾殻 (Crushed rice husk)、後者を籾殻パウダー (Rice husk powder) と定義する。なお、粉碎籾殻の比重は約  $0.33 \text{ g/cm}^3$ 、籾殻パウダーは約  $0.38 \text{ g/cm}^3$  であり、後者の方が約 15 % 高い値を示す。

#### 2.1.2 米粉ペースト（バインダー）

市販の米粉（株式会社箕輪漆行）を用いて米粉ペーストを作製する。まず、直径 16 cm の調理用鍋に米粉 80 g を投入し、22 °C の水 320 g を少量ずつ加えながら攪拌し、塊がなくなるまで溶く。次に 140 °C に加熱したホットプレート EHP-170N (アズワン株式会社) 上に鍋を載せ、所定の時間加熱を行う。加熱中は糊化の過度な進行を防ぐため、木べらを用いて適宜攪拌を行う。加熱後、糊化した部分と液状の部分が混合した状態の材料を 80 mesh の篩で裏ごしする。その後、十分に攪拌を行い、粘度が均一な米粉ペーストを作製する。

なお、予備実験において加熱時間 840 s の米粉ペーストを用いた籾殻ペースト材料による積層造形に成功した。そこで本研

究では、この加熱時間を基準とし、加熱時間を増減させた複数の作製条件を設定した (Table 1)。

#### 2.1.3 籾殻ペースト材料の作製

米粉ペーストと粉碎籾殻もしくは籾殻パウダーを重量比率 5:1 の割合で混合し、積層用の籾殻混合ペースト材料（以下、籾殻ペースト）を作製する。混合する際は、米粉ペーストに籾殻材料を少量ずつ加え、木べらを用いて攪拌しながら、均等に混合されるまで十分に混ぜる (Fig. 2)。

### 2.2 造形方法

#### 2.2.1 造形用 3D データの作製および出力条件の設定

サイズ評価用サンプルとして、直径 60 mm × 高さ 40 mm のカップ状の容器を作製する。出力用の 3D データは、3D CAD ソフト「Fusion 360」を用い、直径 60 mm × 高さ 40 mm の円柱モデルをモデリングする。その後、スライサーソフト「Cura」を用いて、壁面および底面のみ造形する G-code ファイルの生成を行う。出力条件として、積層高さを 4 mm、壁の層数を 1 層とし、積層スピードは材料の吐出状況を見ながら 3D プリンタの本体パネルで調整する。

#### 2.2.2 積層造形機材

材料押出型の 3D プリンタとして、市販のセラミック 3D プリンタ Eazao Zero (Eazao) を改造した機材を使用する [Fig. 3(a)]。当初、市販機をそのまま使用して実験を行ったが、材料をシリンダーから物理的に押し出す方式では、籾殻と米粉ペーストが分離し液状成分のみがシリンダーから押し出される現象が確認された。また、エクストルーダーからの押出時にはスクリーが空転し吐出が困難となる事例も見られた。そこで、シリンダーに最高圧力 1.0 MPa のレシプロ式エアコンプレッサー SW-L25MPF-01 (藤原産業株式会社) [Fig. 3(b)]

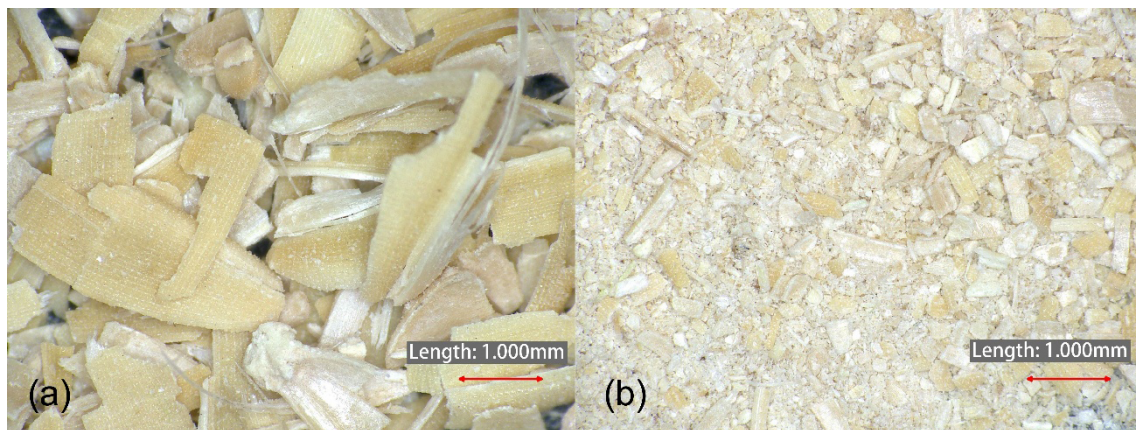
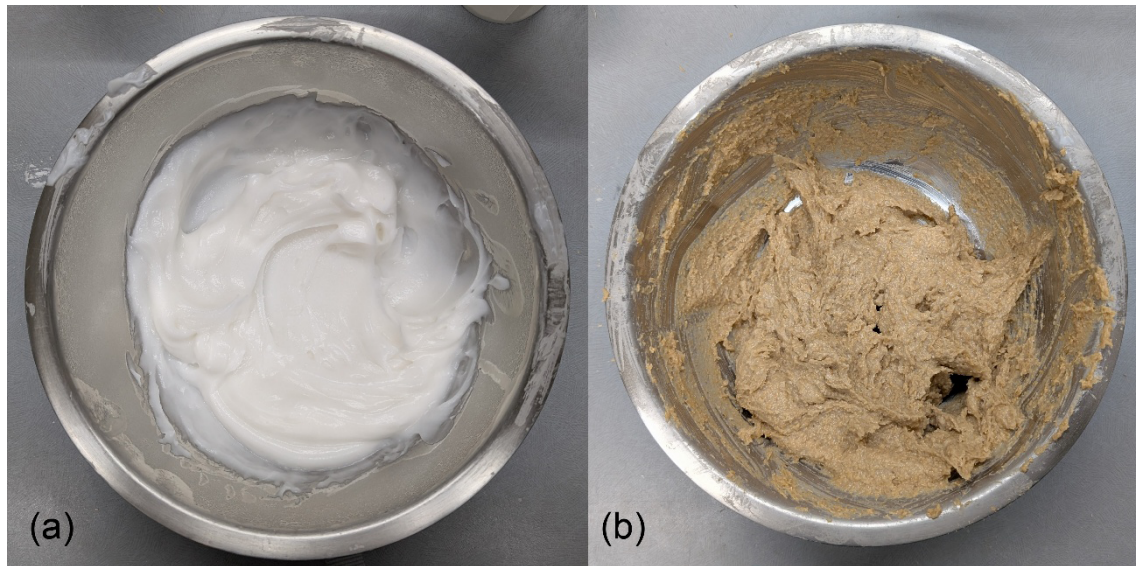


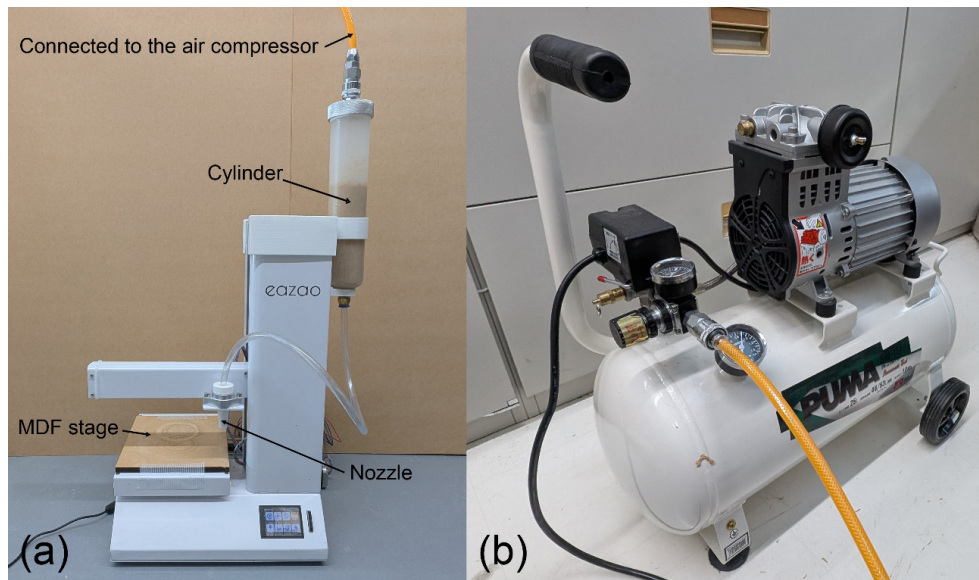
Fig. 1 Magnified images of crushed rice husks (a) and rice husk powder (b).

Table 1 Rice flour paste material preparation conditions.

|                          | Rice flour paste A | Rice flour paste B | Rice flour paste C | Rice flour paste D |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Rice flour (g)           | 80                 | 80                 | 80                 | 80                 |
| Water (22 °C) (ml)       | 320                | 320                | 320                | 320                |
| Heating temperature (°C) | 140                | 140                | 140                | 140                |
| Heating time (s)         | 720                | 780                | 840                | 960                |



**Fig. 2** Appearance of paste material. (a) rice flour paste (b) rice husk paste.



**Fig. 3** 3D printing device (a) customized ceramic 3D printer (b) air compressor.

を接続し、空気圧による押出方式に変更した。さらに、FDM型3Dプリンタを用いて、チューブを直接挿入できるノズルを製作し、エクストルーダーを介さず、空気圧によりシリンダーから吐出された材料をダイレクトに吐出させる機構に改良した。吐出口の直径はチューブの内径の7.5 mmとなる。空気圧の調整は、コンプレッサーに付属する圧力計の値を基に手動で行い、出力中も空気圧が一定に保たれるよう適宜微調整を行う。また、機体の造形エリア上にMDF (medium density fiberboard) で作製したステージを固定し、その上で造形を行う。

### 2.2.3 乾燥工程

自然乾燥でも固化するが、米粉ペーストが完全に乾燥するまでの時間が長くなると造形物上にカビが発生する。そのため、

3Dプリンタで造形後、MDFのステージに載せたまま定温乾燥器DY300 (ヤマト科学株式会社) に投入し、70℃で24 h乾燥を行う。

## 2.3 測定方法

### 2.3.1 テクスチャー特性の測定

米粉ペーストの加熱時間と粃殻の粒径が異なる複数の粃殻ペースト材料を作製し、各材料のテクスチャー特性を測定する。Nidaらの研究においては、かたさ (Hardness)、凝集性 (Cohesiveness)、付着性 (Adhesiveness)、ガム性 (Gumminess) を測定することで、材料の3Dプリント適性を評価している<sup>9)</sup>。本研究においても同様の測定を行い、材料の適正を評価するとともに、先行研究との相違点について考察を行う。

はじめに、2.1.2項で示した手順に従い、加熱時間が720 s、

780 s, 840 s および 960 s の 4 種の米粉ペーストを作製し、それぞれを Rice flour paste A, B, C および D と定義する。その後、各米粉ペーストを 150 g ずつに分け、それぞれに粉碎籾殻または籾殻パウダーを 30 g 混合し、2 種類の籾殻ペーストを作製する。そして、テクスチャープロファイルユニット TPU-2DN (株式会社山電) を用いて、米粉ペースト単体および 2 種類の籾殻ペーストのテクスチャー特性を計測する (Fig. 4)。計測方法は、直径 8 mm のプランジャーを用いた部分圧縮テストとし、押し込み速度を 10 mm/s、押し込み回数を 2 回に設定する。1 回目の押し込み時の最大応力をかたさの値として採用する。それぞれのサンプルで 4 回計測を行い、平均値を算出する。

### 2.3.2 乾燥後の収縮率の測定

本実験においては、加熱時間の違いに焦点を当てるため、用いる籾殻は籾殻パウダーのみとする。そして、2.1.2 項および

Table 1 で示した条件に従って作製した 4 種の米粉ペースト (Rice flour paste A, B, C and D) を用い、4 種類の測定用サンプル (Model A, B, C and D) を作製する。作製にあたっては、はじめに各材料を用いた造形テストを実施し、積層造形の可否を確認するとともに、出力条件の設定を行った。出力条件の設定においては、材料が安定的に吐出されるよう空気圧を調節した上で、ノズルから吐出された材料が下層に定着し、壁面が垂直に積層されるようヘッドの移動速度を調整した。これらの出力条件の詳細を Table 2 に示す。なお、最も加熱時間が短い Rice flour paste A をバインダーとして用いた場合、材料がやわらかすぎることから、Fig. 5 に示す通り積層時に形状を保つことができず、造形は不可能であった。そのため、収縮率の測定は、残る 3 種のバインダーを用いた Model B, C および D (Fig. 6) を対象として実施する。

そして、Fig. 7 の通り、各サンプルの天面側直径、底面側直

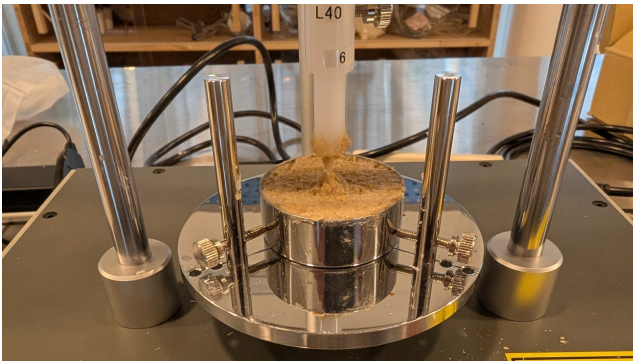


Fig. 4 Measurement of texture properties using a texture profile unit.



Fig. 5 3D printing result using a composite of rice flour paste A (heating time: 720 s) and rice husk powder.

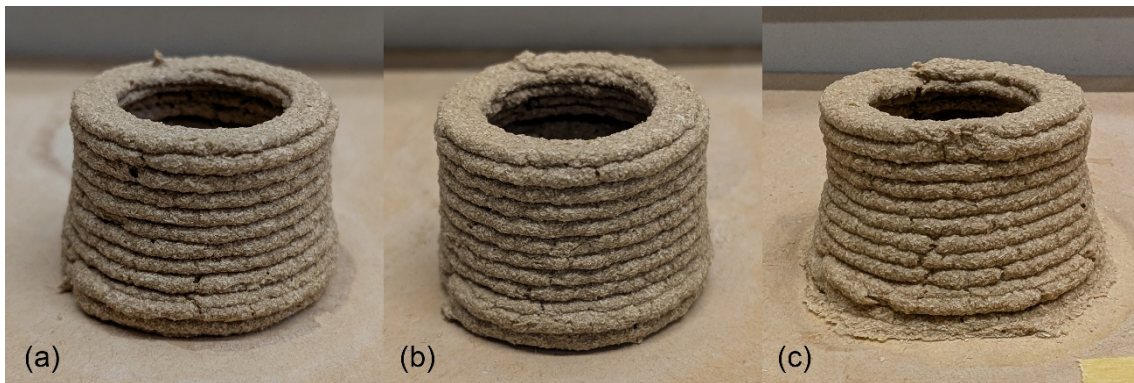


Fig. 6 3D printed objects using three types of rice flour paste with different heating times (a) rice flour paste B (b) rice flour paste C (c) rice flour paste D.

Table 2 Printing conditions of sample model for size measurement.

|                               | Model A            | Model B            | Model C            | Model D            |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Binder                        | Rice flour paste A | Rice flour paste B | Rice flour paste C | Rice flour paste D |
| Print speed (mm/s)            | 3.00               | 3.00               | 2.70               | 2.40               |
| Air compressor pressure (MPa) | 0.01               | 0.20               | 0.30               | 0.32               |
| Print results                 | Failure            | Success            | Success            | Success            |

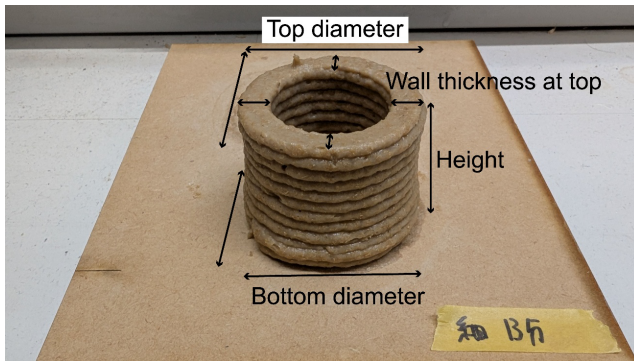


Fig. 7 Measuring point of size of a 3D printed object.

径、上端の壁厚、高さの計測を行う。直径はXおよびY方向の平均、壁厚はXおよびY方向の4箇所の平均、高さは最も高い地点を計測する。造形直後に初期計測を行い、その後、定温乾燥器に投入して乾燥処理を行う。そして、乾燥開始から12h後および24h後に乾燥器から取り出し計測を行う。造形物は各種類につき2個ずつ作製し平均値を算出する。

### 2.3.3 外観品質の観察

本観察では、籾殻の粒径の違いが造形物の外観品質に及ぼす影響について評価を行う。加熱時間による外観の顕著な差異は見られなかったことから、加熱時間の基準として設定した840sの米粉ペースト（Rice flour paste sample C）を用いた造形物を代表例として評価する。米粉ペーストの作製は、2.1.2項およびTable 1で示した条件にしたがって行う。そして、米粉ペースト300gと、粉碎籾殻または籾殻パウダー60gを混合した籾殻ペーストを使用し、2種類の積層造形サンプルを作製する。各サンプルを24h乾燥させた後、目視による亀裂等の確認を行い、さらにUSB実体顕微鏡TS-2500（J-scope）を用いて造形物の天面および側面の観察を行う。

## 3. 結果と考察

### 3.1 ペースト材料のテクスチャー特性の測定結果

2.3.1項に基づき作製した米粉ペースト単体および粒径の異なる2種類の籾殻をそれぞれ混合した籾殻ペーストの計3種類の材料についてテクスチャー特性の測定した。その結果をFigs. 8, 9, 10および11に示す。

#### 3.1.1 かたさ

Figure 8に示すように、いずれの材料においても、米粉ペーストの加熱時間が長いほどかたさが増加する傾向が認められた。さらに、籾殻を混合することで、米粉ペースト単体に比べてかたさが大きく増加することが確認され、より粒径の大きい籾殻を混合した場合の方が、かたさの増加率が高い傾向にあることも示された。かたさが増加することで、Table 2に示されるように、吐出にはより高い空気圧が必要となり造形速度も遅くする必要がある。したがって、吐出性を考慮すると、より細かい籾殻を使用の方が有利であると言える。また、籾殻の投入量の増加に伴ってかたさが増加すると仮定した場合、加熱時間が短い米粉ペーストを用いる方が、かたさの開始値が小さいため、装置の押し出し能力の上限に達するまでに、より多くの

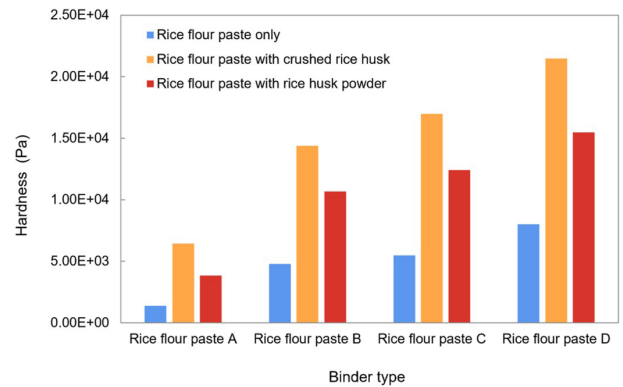


Fig. 8 Comparison of hardness in different paste materials.

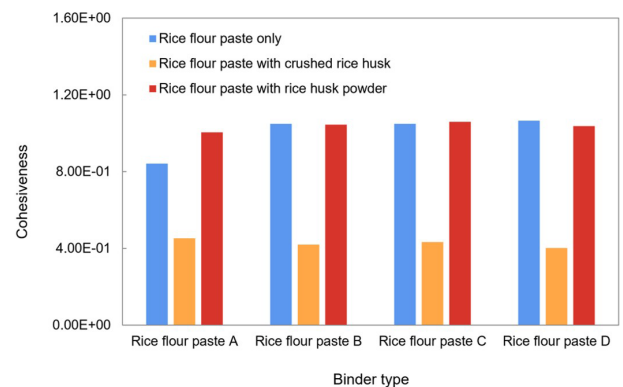


Fig. 9 Comparison of cohesiveness in different paste materials.

籾殻を混合できると想定される。しかし、かたさの数値が同等であっても、その増加がバインダーの糊化の進行によるものか、あるいは籾殻の添加によるものかによって、物性が異なる可能性がある。したがって、今後、籾殻の投入量を変化させた実験を実施するとともに、粘弾性測定に基づく流動性の正確な評価を試みる必要がある。

#### 3.1.2 凝集性

Figure 9に示すように、籾殻パウダーを用いた籾殻ペーストは、米粉ペースト単体の凝集性と同程度の凝集性を示し、米粉ペーストの加熱時間の違いによっても大きな変化は認められなかった。一方、粒径の大きい粉碎籾殻を用いた籾殻ペーストでは凝集性が著しく低下することが確認された。凝集性の低下により材料のまとまりが損なわれ、崩れやすくなるため、吐出時に空隙や材料の途切れが発生する可能性が高まる。さらに、予備実験において粉碎時間30sのより粗い籾殻を使用した場合、押出時に液状成分のみが吐出されることが確認されたが、この現象も凝集性の低下により、米粉ペーストと籾殻の分離が生じたことによるものと推察される。これらのことから、より細かい籾殻を用いる方が凝集性を維持でき、造形に適した材料特性が得られると考えられる。

#### 3.1.3 付着性

Figure 10に示すように、いずれの材料においても、米粉ペーストの加熱時間を長くするほど付着性は増加する傾向が見ら

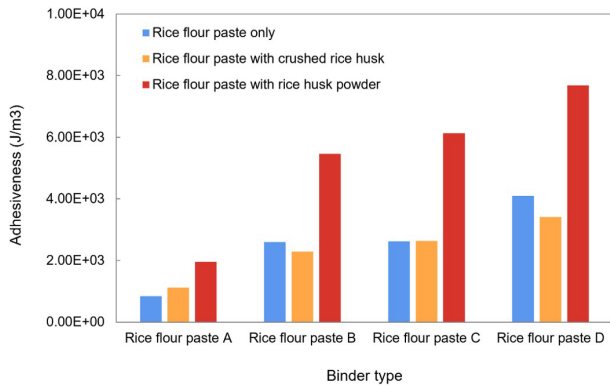


Fig. 10 Comparison of adhesiveness in different paste materials.

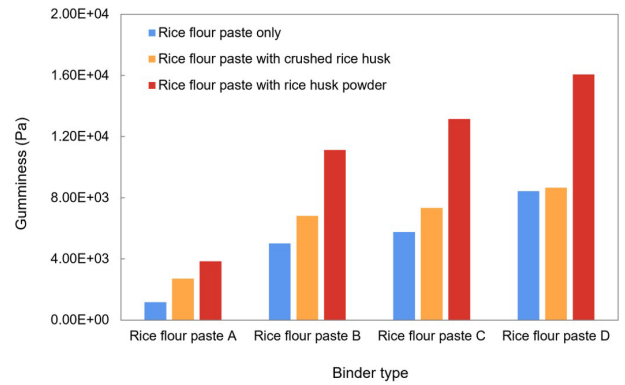


Fig. 11 Comparison of gumminess in different paste materials.

れた。また、粉碎籾殻を混合した材料では、米粉ペースト単体と比較し付着性の差は小さい一方で、籾殻パウダーと混合した材料では付着性が大きく増加することが確認された。付着性は層間の結合強度に影響を与えるため、値が大きい方が積層造形に適すると考えられる。したがって、より加熱時間が長い米粉ペーストと粒径の細かい籾殻を用いることで3D プリントに適した材料特性が得られる可能性がある。しかし、付着性の増加はシリンダーやノズルの内壁への付着し吐出性に影響を与える可能性がある。Kwan らによる、骨材を被覆するペースト材料の膜厚がモルタルの特性に与える影響を評価した研究において、付着性と流動性との間に逆相関があることが示されている<sup>12)</sup>。このため、付着性の向上が一概に3D プリント特性の向上につながるとは限らず、適切なバランスを考慮する必要があると考えられる。

#### 3.1.4 ガム性

Figure 11 に示すように、いずれの材料においても、米粉ペーストの加熱時間を長くするほどガム性は増加する傾向が見られた。また、粉碎籾殻と比較し籾殻パウダーを混合した方が、ガム性が大きく増加することが確認された。ガム性が向上することで材料の復元力が高く、材料の積層から乾燥までのプロセスにおける形状の維持に寄与すると考えられる。したがって、より細かい籾殻を混合し、加熱時間の長い米粉ペーストを用いる方が、3D プリントに適していると考えられる。

#### 3.1.5 Nida らの実験結果との相違点

Nida らの実験<sup>9)</sup>においては、かたさおよび凝集性に関して、籾殻の粉碎方法の違いによる有意な差は見られなかった一方で、付着性およびガム性においては、より粒径の大きなミル粉碎の籾殻を用いた方が高い値が得られており、本実験における結果とは異なる知見を示している。両者の実験条件の相違点として、バインダーの種類および籾殻とバインダーの混合比率の違いが挙げられる。本研究の方がバインダーの混合比率が高く、バインダーの影響がより顕著に現れている可能性がある。さらに、より大きな相違点として、Nida らの実験では、いずれの籾殻もパウダー状になるまで粉碎されており、本実験で用いた粉碎籾殻のような大きな粒径を有する材料との比較は行っていない点が挙げられる。なお、Nida らは付着性の差異の要

因として、粒径ではなく、ミルでの粉碎により表面が粗くなることに起因する表面積の増加を挙げている。したがって、微細な粉末同士で比較する場合には、粒径の大小よりも籾殻の構造的特徴が材料特性に与える影響が大きくなる可能性がある。そのため、今後籾殻パウダーを用いて、さらなる材料最適化を追求する際には、粉碎方法も検討要素として考慮する必要がある。

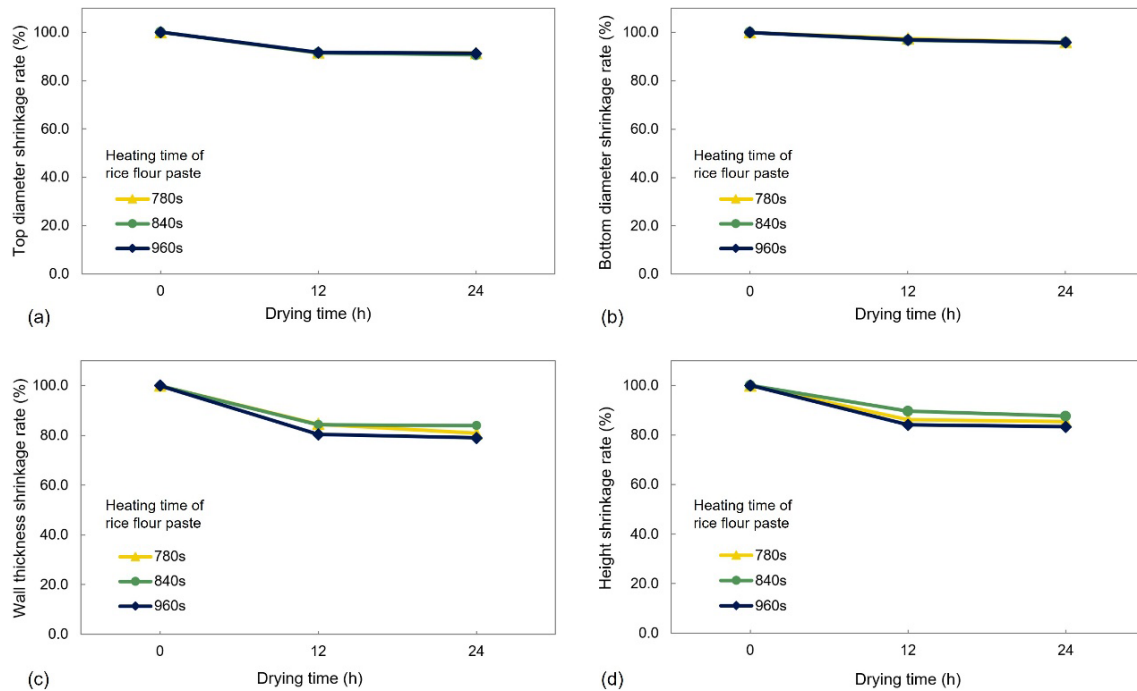
#### 3.1.6 材料のテクスチャー評価のまとめと今後の課題

各材料のテクスチャー特性を評価した結果、粒径の小さい籾殻パウダーを用いる方がかたさの増加が抑制され、吐出時の圧力を低減できることが示された。さらに、凝集性が高いため崩れにくく、材料の途切れや空隙も発生しにくい可能性が高い。また、付着性およびガム性の観点からも、3D プリント特性に優れていると評価できる。一方で、米粉ペーストの加熱時間を長くすることで、付着性およびガム性が向上し、積層に有利となる可能性があるが、かたさも増加するため、吐出性は低下すると考えられる。加えて、加熱時間 720 s の米粉ペースト (Rice flour paste A) と籾殻パウダーの籾殻ペーストを用いた場合には形状を保持できないことが確認された。この結果より、米粉ペースト (Rice flour paste B) と籾殻パウダーの混合材料の物性との間に造形可否の境界が存在すると推察され、積層造形には 10 MPa 程度のかたさおよび 6 MPa 程度のガム性が必要であると考えられる。今後これらの情報を元に、籾殻の混合比率を変化させた実験を行うとともに、実際に造形テストを実施し、造形条件の最適化を目指す。

なお、本研究においては、テクスチャープロファイルユニットによるかたさの測定結果に基づき、吐出性の評価を行った。しかし、吐出性の評価には粘弾性特性の測定がより適している。実際に、Nida らの研究においても、吐出性の評価手法として粘弾性測定が併用されている。そのため、今後、材料条件および出力条件の最適化を図る上では、粘弾性評価の導入が必要であると考えられる。

#### 3.2 乾燥後の積層造形モデルの収縮率の測定結果

2.3.2 項で示した造形サンプル (Model B, C and D) の乾燥の進行に伴う測定対象箇所ごとの収縮率を Fig. 12 に示す。いずれの米粉ペーストを用いた材料も乾燥工程を経て全体的に収



**Fig. 12** Drying shrinkage rates of 3D printed objects. (a) top diameter shrinkage rate (b) bottom diameter shrinkage rate (c) wall thickness shrinkage rate (d) height shrinkage rate.

縮することが確認された。直径については、MDF ボードに固定された底面側よりも、自由に変形可能な天面側の方が大きな収縮を示している [Fig. 12(a)(b)]。また、壁厚および高さの収縮率はさらに大きく、特に壁厚に関しては約 20 % の減少が認められた [Fig. 12(c)(d)]。

しかし、一部にわずかな差異が見られたものの、米粉ペーストの加熱時間に比例した変化は全体として確認されず、造形後の収縮率との明確な関係性は認められなかった。この要因としては、米粉ペーストの糊化プロセスの特性が挙げられる。米粉ペーストは加熱により糊化が進行することで、見かけ上の水分量は低下するが、これは水分が蒸発によって失われたものではなく、でんぷんへの吸着により内部に保持されている状態である。このため、バインダーの実質的な水分量に大きな違いが生じず、乾燥後のサイズ変化に対する影響も限定的であったと推察される。これらより、吐出性を優先し、加熱時間の短い米粉ペーストを使用した場合でも、材料収縮による寸法精度への影響は小さい可能性があると考えられる。

なお、3.1.4 項で示した通り、加熱時間の増加に伴ってガム性が増加することから、自重による変形への耐性も向上すると考えられる。しかし、高さ方向の収縮率 [Fig. 12(d)] において加熱時間に比例した変化は見られなかった。この理由として、サンプルの積層造形時に、同一の壁厚で出力されておらず、下層にかかる荷重にバラつきが生じたことが影響した可能性がある。さらに、米粉ペーストの作製時における攪拌の回数やタイミングの違いにより糊化の進行状況が変動する可能性があるほか、造形時の吐出圧力や造形速度の違いによって、材料に加わる圧力が変化することも、収縮率の測定結果全体に影響している可能性がある。さらに、収縮率には影響を及ぼさない



**Fig. 13** Appearance of 3D printed objects using rice husk paste.

場合であっても、加熱時間の違いにより糊化の程度に差が生じることから、造形物の機械的強度には影響を及ぼす可能性がある。そのため、今後は各条件を統一した上で評価を行うとともに、造形物の強度に関する検証を進める必要がある。

### 3.3 積層造形モデルの表面情報の観察結果

**Figure 13** より、粉碎籾殻を用いた造形物の方が、表面に多くの凹凸や亀裂が観察された。また、顕微鏡による拡大写真 (**Fig. 14**) では、籾殻パウダーを用いた造形物にも一部に空隙が確認されるものの、粉碎籾殻を用いた方がより多くの空隙が観測された。この要因として、3.1.2 項で示した通り、粉碎籾殻を用いた材料は凝集性の低下により崩れやすくなっていることが挙げられ、乾燥に伴う収縮に対し造形物の形状変化が追従できず、亀裂の発生に繋がったものと考えられる。

また、粉碎籾殻を用いた場合、Fig. 14(a)および(c)の赤丸で示されるような、米粉ペーストのみで固まっている箇所が確



**Fig. 14** Magnified images of 3D printed objects using rice husk paste (a) crushed rise husks: top (b) rice husk powder: top (c) crushed rise husks: side (d) rice husk powder: side.

認された。これは籾殻と米粉ペーストが十分に混合されなかった、あるいは造形プロセス中に両者が分離したことによると考えられる。このような糊の塊が表出していることで、籾殻の質感が失われるとともに、水分の付着により溶解し、表面のぬめりにつながる。以上の結果から、表面品質の観点においても、3D プリントの材料としては、粒径の細かい籾殻パウダーの方が望ましいと言える。

#### 4. おわりに

本研究では、籾殻の粒径と米粉ペーストの加熱時間をパラメータとして変化させ、積層造形プロセスに与える影響を評価した。籾殻の粒径に関しては、テクスチャー特性の評価結果より、粒径の小さい籾殻パウダーを用いた方が、吐出性および3D プリント特性の両面において優れていることが示された。また、外観品質の観点からも、籾殻パウダーの方が亀裂の発生が少ないなどの利点を確認され、より適正があると考えられる。また米粉ペーストの加熱時間の違いの影響を比較した結果、テクスチャー特性の評価からは、加熱時間を長くするほど、積層特性は向上する一方で、吐出性は低下することが確認された。造形後の収縮率に関しては、壁厚と高さ方向の収縮率が比較的大きいものの、加熱時間の違いによる影響は確認されなかったことから、寸法精度への影響を気にせず、吐出性を考慮して、加熱時間の短いバインダーを用いることが可能である

ことが示唆された。また、本実験では、加熱時間 720 s と 780 s の米粉ペーストの間で、造形物の形状保持の可否に関する境界が確認された。両材料の物性は、吐出性と積層特性を両立できる材料作製条件を検討する上で重要な指針となると考えられる。一方で、今後の実験においては、粘弾性測定による吐出性の精緻な分析、米粉ペースト作製工程における糊化の進行状況の管理、および造形時の空気圧や造形速度が造形物に与える影響の評価を行うことが課題であると考えられる。

さらに、本実験で用いた積層造形装置は、材料をノズルに送る際にチューブ内壁との間で摩擦が発生するため、粘着性の高いペースト材料の吐出には適していない。このため、材料の吐出性を向上させるために、ノズルの直上にシリンダーを設置する構造への改造が望まれる。また、本装置では空気圧の調整を手動で行っているため、制御精度および応答性が低く、造形可能な形状のバリエーションも少ない。今後は、空気圧制御のための電磁弁を導入し、G-Code との連携によって自動制御させるなど、装置の改善を図る必要がある。

本研究では、条件を変えて作製した籾殻と米粉ペーストを、いかなる組み合わせで用いた場合でも安定的に造形物が得られるよう、混合する籾殻の割合を低く設定して実験を行った。しかし、廃棄籾殻の有効利用を目的とする場合、より多くの籾殻を利用できる方が望ましい。そのため、本研究で得られた知見を元に、籾殻比率を高めた場合の造形可能性や造形物の物性に

ついて、さらなる研究が必要である。さらに、育苗ポットなどの農業用資材や屋内用プロダクトなどへの応用を想定した強度、精度、および耐水性等の測定を行う必要がある。今後さらに技術開発を進め、国内における米および米粉の生産状況も視野に入れながら、農業生産や自然のサイクルに適合したものづくりの可能性を探索したい。

なお、本文および図表中に記載の社名、および製品名は各社の商標または登録商標である。

## 参考文献

- 1) K. Morimoto, K. Tsuda, D. Mizuno, "Literature Review on the Utilization of Rice Husks: Focus on Application of Materials for Digital Fabrication," *Materials*, **16**(16), 5597 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16165597>.
- 2) C. S. Wu, C. H. Tsou, "Fabrication, characterization, and application of biocomposites from poly (lactic acid) with renewable rice husk as reinforcement," *Journal of Polymer Research*, **26**, 44 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1710-z>.
- 3) C. H. Tsou, W. H. Yao, C. S. Wu, C. Y. Tsou, W. S. Hung, J. C. Chen, J. Guo, S. Yuan, E. Wen, R. Y. Wang, M. C. Suen, S. C. Liu, and M. R. De Guzman, "Preparation and characterization of renewable composites from Polylactide and Rice husk for 3D printing applications," *Journal of Polymer Research*, **26**, 227 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1882-6>.
- 4) M. A. Morales, C. L. Atencio Martinez, A. Maranon, C. Hernandez, V. Michaud, and A. Porras, "Development and characterization of rice husk and recycled polypropylene composite filaments for 3D printing," *Polymers (Basel)*, **13** (7), 1067 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13071067>.
- 5) H. Peng, C. Yang, Y. Wei, Y. Ruan, Y. Hsu, C. Hsieh, and C. Cheng, "Terahertz complex refractive index properties of acrylonitrile butadiene styrene with rice husk ash and its possible applications in 3D printing techniques," *Optical Materials Express*, **11** (9), pp. 2777-2786 (2021). <https://doi.org/10.1364/OME.433534>.
- 6) H. Zeidler, D. Klemm, F. Böttger-Hiller, S. Fritsch, M. J. le Guen, and S. Singamneni, "3D printing of biodegradable parts using renewable biobased materials," *Procedia Manufacturing*, **21**, pp. 117-124 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.101>.
- 7) S. Muthukrishnan, H. W. Kua, L. N. Yu, and J. K. H. Chung, "Fresh properties of cementitious materials containing rice husk ash for construction 3D printing," *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**(8), 04020195 (2020). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003230).
- 8) E. Ferretti, M. Moretti, A. Chiusoli, L. Naldoni, F. de Fabritiis, and M. Visonà, "Rice-husk shredding as a means of increasing the long-term mechanical properties of earthen mixtures for

3D printing," *Materials (Basel)*, **15**(3), 743 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15030743>.

- 9) S. Nida, T. Anukiruthika, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "3D printing of grinding and milling fractions of rice husk," *Waste Biomass Valorization*, **12**, pp. 81-90 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01000-w>.
- 10) H. Tanaka, Y. Asano, M. Watanabe, and A. Masumori, "Food Printing Technologies out of White Rice," *NIP & Digital Fabrication Conference*, **31**, pp. 289-292 (2015). [https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2015.31.1.art00064\\_1](https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2015.31.1.art00064_1).
- 11) Y. Nishihara, Y. Kakehi, "magashi: 4D Food Printing with Rice Flour Paste," *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, **26**(4), pp. 220-229 (2021) [in Japanese]. [https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.4\\_220](https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.4_220).
- 12) A. K. H. Kwan, "Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar," *Materials and Structures*, **45**, pp. 1359-1374 (2012). <https://doi.org/10.1617/S11527-012-9837-Y>.



森本 康平

2004年京都大学工学部（物理工学科）を卒業。2006年東京大学大学院工学系研究科（マテリアル工学専攻）を修了。2006年株式会社イトーキに入社。家具材料および環境関連サービスの研究開発を経て、2013年よりファブラボ北加賀屋の活動に参画。2017年同施設の運営母体としてファブソサエティエクスペリメンツを設立し、代表理事に就任（現職）。2020年長岡造形大学大学院造形研究科イノベーションデザイン領域に着任。



津田 和俊

2008年千葉大学大学院自然科学研究科（多様性科学専攻）修了。博士（工学）。2010年からデジタルファブリケーションの応用可能性を模索するファブラボのネットワークに参加し、2013年にファブラボ北加賀屋（大阪市）を共同設立。2016年から山口情報芸術センター〔YCAM〕の専門委員（研究員）として、主に「YCAM バイオ・リサーチ」を担当（現在も継続中）。2020年京都工芸繊維大学に着任し、2024年から未来デザイン・工学機構准教授、KYOTO Design Lab デザインファクトリーユニット長。