

# 3D プリンタを用いた封蝋表現手法の研究

菊地 勇斗<sup>1</sup> 塚田 浩二<sup>1,a)</sup>

**概要:**近年、安価な熱溶解積層方式 3D プリンタの普及によって、3D プリンタを G-code を介して直接制御することで、新たな表現力を模索する研究が増加している。本研究では、熱溶解積層方式 3D プリンタを G-code で直接的に制御することで、封蝋表現を行う手法を提案する。封蝋とは、封筒や文書に封印を施したり、瓶などの容器を密閉するために用いる蝋のことである。我々は、封蝋と 3D プリンタには、素材を溶解させてから造形する点で共通点があることに着目した。具体的には、ノズルの温度をフィラメントに最適な温度よりも高温に設定し、一か所に多量のフィラメントを押し出す。次に、手動または自動で型をフィラメントへ押し込むことで、フィラメントが封蝋のように固定される。また、性能評価を通して、作成した封蝋が封筒に封をして接着できるかを検証する。さらに、ユーザ評価を通して、従来の封蝋手法と提案手法を比較した印象を調査する。

## 1. 背景

封蝋は蝋を熱で溶かし、文字などを模した型を押し当て形を形成した蝋のことである。主にヨーロッパの貴族達の間で 11 世紀頃から広く使われ、使用人づての手紙の受け渡しの際に使用されていた。一度封筒の封を開けると砕けてしまう特性から、未開封である事の証明や、差出人個人や家系を表すシンボルを押し出す事によって、差出人を証明する意味があった。郵便制度の発達に伴い衰退したものの、現代でも重要な手紙の封緘や、条約締結書など最重要書類の署名を封じて改竄を防止するために使われたり、高級ウイスキーやワインのボトル、招待状など装飾目的でも使用されている [1]。図 1 は、市販の封蝋作成キットを用いて、著者が制作した封蝋の一例である。

一方、近年安価な熱溶解積層方式 3D プリンタの普及に伴い、3D プリンタを G-code を介して直接制御することで、新たな表現力を模索する研究が盛んである。例えば、高橋ら [2] は、熱溶解積層方式 3D プリンタが一時停止した際に発生する樹脂のこぼれを利用して外壁に模様や文字を造形する手法を提案している。

我々は、封蝋表現が熱で蝋を溶解させ造形物を作成することに注目した。3D プリンタは、フィラメントを熱で溶解させ、ノズルから樹脂を何層にも重ねて射出することで造形物を作成する。この熱で溶解させ、後から形を整えるという造形方法に封蝋との類似性があると考えた。

本研究では、封蝋と 3D プリンタの造形方法の類似性に



図 1 市販の封蝋作成キットで作成した封蝋の例

着目して、3D プリンタの表現力を拡張することを目的とする。そこで 3D プリンタを G-code を介して直接制御することで、封蝋表現を行う手法を提案する。具体的には、3D プリンタに封筒をセットしておくことで、自動的に封蝋を行えるような仕組みを構築する。

なお、本研究は WISS2022 でデモ発表 (査読無し, Non-archival) を行った [3]。

## 2. 関連研究

本章では、本研究に関連する 3D プリンタの研究事例として、「樹脂の射出方法による表現変化の事例」、「ヘッド等を制御し拡張性を持たせた事例」の 2 つの観点から説明する。

### 2.1 樹脂の射出方法による表現変化の事例

高橋ら [4] は、熱溶解積層方式 3D プリンタの様々な高さから押し出されたフィラメントの挙動と構造を調査し、

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学

<sup>a)</sup> tsuka@acm.org

熱溶解積層方式の新たな表現を発見した。具体的には、同じ形状を造形する時にノズルの高さを変えることで、表面のテクスチャの変化を調査し、ぬいぐるみや芝生などの質感を再現している。

Laput[6]は、樹脂の糸引き現象を活用した造形手法を提案している。この糸引き現象は、樹脂を押し出したままノズルを高速で動かすことで生じる造形エラーである。これを意図的に引き起こすことで、毛のような形状の造形を可能としている。

Reinerら[7]は、デュアルヘッドの3Dプリンタを用いて、波打った壁面を造形することで、ツートーン画像のような色調表現を行う手法を提案している。具体的には、ヘッドの制御で波打った壁面を造形することで、絵画のような繊細な色彩表現を可能としている。

Takahashiら[5]は、樹脂の射出量を調整することで、熱溶解積層方式の3Dプリンタの特徴であるざらざらした積層を目立たなくする手法を提案している。

## 2.2 3Dプリンタを制御し拡張性を持たせた事例

片倉ら[8]は、3Dプリンタのヘッド部をロボットのように制御することで、造形物に動きを与えるシステムを提案している。例えば、造形したオルゴールをヘッド部で動かして音を鳴らす事例を示している。

Teibrichら[9]は、造形物を削り取るミリングマシンと回転するプラットフォームを搭載した3Dプリンタを構築している。この3Dプリンタを用いて、造形物の作り直しや修復が可能な新しい造形手法を示している。

Eickhofら[10]は、レーザーカッターなどの工作機械をゲーム機とみなして、センサを内蔵したデバイスを振りレーザーカッターを制御することで、オブジェクトを破壊するゲームを開発した。

Solid Vibrations[11]は、音の振動を意図的にプラットフォームに伝え振動させることで、造形物の表面に模様を作り出す造形手法である。振動によって、樹脂の溢れ具合が周期的に変化するため、モアレ模様のような表現が可能になる。

Kanada[12]は、円柱等の単純なモデルを変形させることで、多様な形状を探索・造形できる手法を提案している。また、透明PLAを螺旋状に積み上げて、印刷物が光を鮮やかに反射するような表現を試作している。

## 2.3 本研究の特徴

このようにG-codeで3Dプリンタの挙動を制御することで多様な表現が行われてきたが、本研究では封蝋表現に着目する点に独自性がある。樹脂の射出量を調整することで蝋に見立てた高温の樹脂を出力し、ヘッド部の移動を制御して型を押し込むことで樹脂の形状変化と紙等への圧着を実現する。

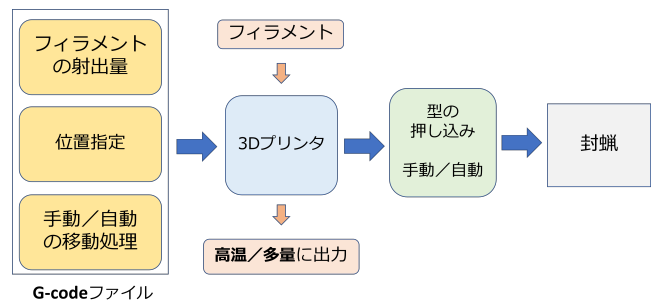


図2 システム構成

## 3. 提案システム

本章では、本研究のコンセプトやシステム構成、及びG-codeの概要について説明する。

### 3.1 コンセプト

封蝋は、装飾品としての側面に加えて、「封筒等の封をする機能」と「開封したことを確認できる機能」を備えている。本研究のコンセプトは、3Dプリンタを用いて、こうした機能を備えた封蝋表現を行うことである。

### 3.2 システム構成

上述したコンセプトを実現するために、本研究ではG-codeで制御可能な3Dプリンタに着目した。なお、G-codeについては3.3節で紹介する。

システム構成図を図2に示す。まず、3Dプリンタに封筒等を設置し、封蝋を行う位置<sup>\*1</sup>に対してフィラメントを出力する。この際、G-code制御で高温/多量のフィラメントを出力し、溶けた蝋のような状態で封筒上に配置する。次に、事前に用意した型をフィラメントに押し当てる。ユーザーが手動で判子のように推す方式と、3Dプリンタが自動で型押しを行う方式の2種類を想定する。自動方式においては、プリントヘッドの横に型を取り付け可能な機構を用意し、G-code制御で型を押し込む。

なお、G-codeはファイルとして用意し、フィラメントの射出量や封蝋の位置、自動で型を押し際のヘッド制御等の情報を含む。このファイルを機種に応じて、制御用ソフトウェアに読み込んだり、SDカード経由で3Dプリンタに転送する。

### 3.3 G-code

G-codeとは、デジタル工作機械を数値制御するためのプログラミング言語である。例えば、3Dプリンタにおいては、ノズル温度や樹脂の射出量、ヘッドの位置や移動速度など幅広く設定できる。

ソースコード1に、G-codeの一例を示す。G0とG1はヘッドの移動を命令するコマンドであり、G1はフィラ

\*1 封筒の形状や厚みに応じて、位置や高さを調整する。

#### ソースコード 1 G-code の例

```
1 ;Move head to 10/10/5 (x/y/z)
2 G0 F2400 X10 Y10 Z5
3 ;Move head to 100/10/5 while extruding
  filament 20mm
4 G1 F1200 X100 Y10 Z5 E20
```

メントを射出しながら移動する。4行目を例にオプションについて説明する。F1200はヘッドの移動速度（分速1200mm）、XYZは移動位置（100/10/5の座標にヘッドを移動）、E20はフィラメントの射出量（長さ換算で20mm）を調整する。本研究で利用したG-codeの詳細については、実装で紹介する。

## 4. 実装

本章では、システムの実装として、フィラメントの出力、型の作成、手動/自動型押し、及び制作事例について説明する。なお、3Dプリンタとしては封蝋の作成にKINGROON製のKP3Sを利用し、型の作成にUP Plus2を利用した。

### 4.1 フィラメントの出力

本研究ではノズル温度が190℃～220℃で正確な造形が出来る直径1.75mmのPLAフィラメントを利用する。しかし、適正温度で造形した場合、出力直後に温度が下がり硬化するため、型押しによるフィラメントの変形は難しい。そこで、ノズルの温度を260℃に設定し、造形物の温度を下げる要因となるファンも停止させた。このようにして、フィラメントの温度低下を遅らせ、数十秒の変形可能時間を持たせた。さらに、少しずつ高さを上げながら一か所に多量のフィラメント（長さ500mm）を押し出すことで、型押しに十分な体積を確保した（図3）。変形可能時間は外気温等にも左右される可能性があるが、我々の環境では約20秒でフィラメントの表面が固定された。よって、出力されてから10秒前後までに型を押し込み始めるのがよいと考える。

さらに、3Dプリンタのプラットフォームの原点から20mmの地点へ目印を付ける機能をG-codeを用いて実装した。原点から離れた理由は、3Dプリンタが造形開始時に原点付近でノズル内の残存樹脂を押し出すためである。この目印を封筒を置く際の目安とすることで、正確な位置に封蝋を行えるよう配慮した（図4）。

### 4.2 型の作成

封蝋を行う上で必要になる型の作成について説明する。本研究では、190℃～220℃で最適な造形ができるPLAフィラメントを、260℃という高温で出力している。そのため、同じPLAで造形した型を押し込んだ場合、型本体

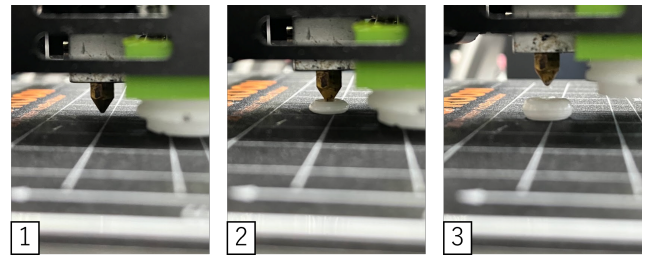


図3 フィラメントの出力の様子



図4 プラットフォームに目印を出力。封筒を正確な位置に配置できる。

まで溶解してしまうことを確認した。そのため、270℃で最適な造形ができるABSフィラメントを使用することとした。

図5に、ABSを利用して造形した型の一例を示す。サイズとしては、10mm～20mmの範囲で作成した。文字や模様、並び替えて日付を示す型等を作成した。

なお、型の溝は当初直角（90度）で設計していたが、押し込んだ際にフィラメントが食い込んでしまい、型の取り外しが困難であった。よって、図6にあるように、溝の傾斜を約50度とゆるやかに調整することで、取り外しがしやすいように工夫した。



図5 ABSで作成した型。手動と自動の例

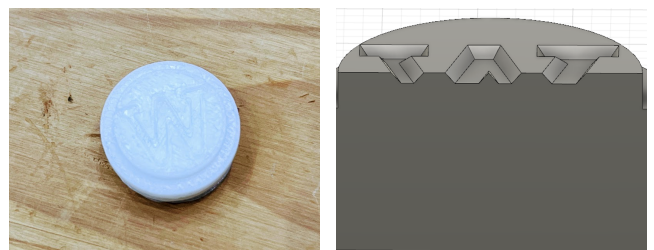


図6 型の溝の傾斜。作成した型と3Dモデルの断面



### 4.3 手動型押し

3Dプリンタで押し出されたフィラメントに手で型を押し込む方式について説明する。手順としては、3Dプリンタで指定した位置に多量のフィラメントを押し出した後、ヘッドがその場から離れて停止する。そのタイミングで、溶解した樹脂の塊へ上から手で型を押し込むことで形を固定する(図7)。課題としては、型を引きはがすタイミングが難しく、長く押し込みすぎた場合、型と樹脂の隙間にカッター等を入れて慎重に剥がす必要がある。また、印刷が終了したタイミングを見逃すと、溶解したフィラメントがそのまま固定化してしまう。

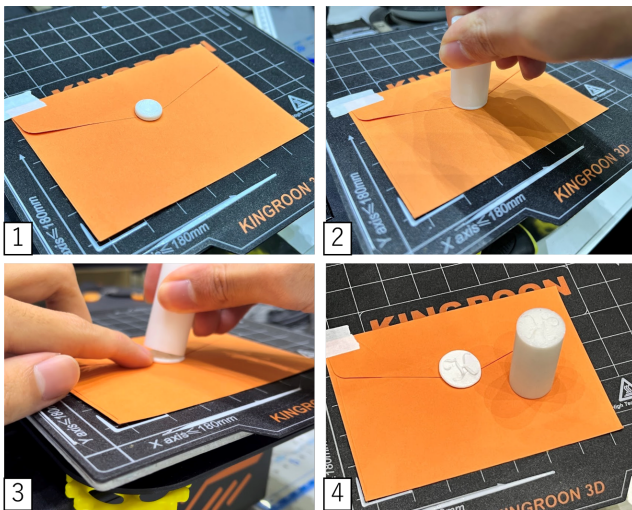


図7 手動型押しの手順

### 4.4 自動型押し

3Dプリンタに型を取り付けることで、封蝋の型押しを自動化する手法を説明する。図8に型を3Dプリンタのヘッドに取り付けるための機構を示す。ファンから送風して造形物を冷却するための部品を加工して、ヘッドの横に型を取り付けた。ネジ状にすることで、型の交換が容易となるよう工夫した。

型の押し込み方法としては、ノズルと型の位置関係を事前に計算して、G-codeでヘッドの位置制御を行うことで、型を溶解したフィラメントに押し込む。また、押し込んだ状態でヘッド位置を20秒程度停止させてから移動させることで、フィラメントが十分に変形することを確認した。(図9)。

3Dプリンタでの封蝋を作成する最後の手順としては、封蝋と型の取り外しである。封筒に封蝋を行う場合、封筒をプラットフォームに強固に固定すると破れやすいため、型の取り外しを安定して自動化することは困難であった。よって、図10に示すように、専用の治具を制作して、安定して型を取り外せるように工夫した。具体的には、封蝋の周辺部と型の隙間に治具を差し入れて、この原理を利用

して型を取り外している。なお、取り外しを急ぐと、余熱により封蝋が歪んでしまうことがあるため、型押し完了後、約1分程待ってから取り外しを行っている。造形後の冷却時間を短くするために、(1) ベッドの温度を最低値として作成する、(2) 型を押し込む瞬間にファンを最大で回す、という方法を検証した。(1)の方法だと、封筒との接着力が著しく低下してしまっていたが、(2)の方法では造形上の問題は確認されなかったため、実装方式として採用した。

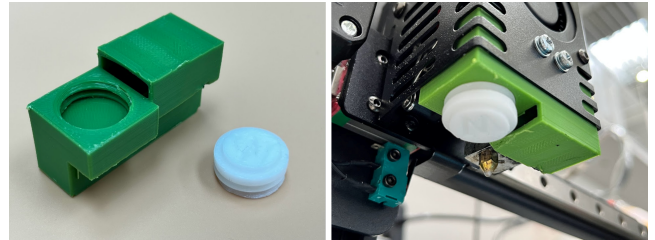


図8 型の3Dプリンタへの取り付け機構

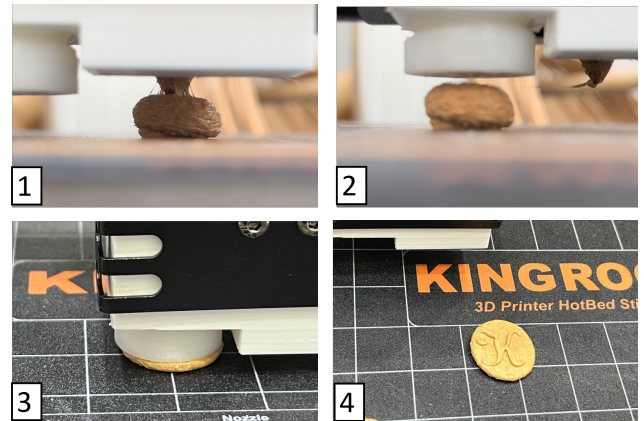


図9 自動型押しの手順

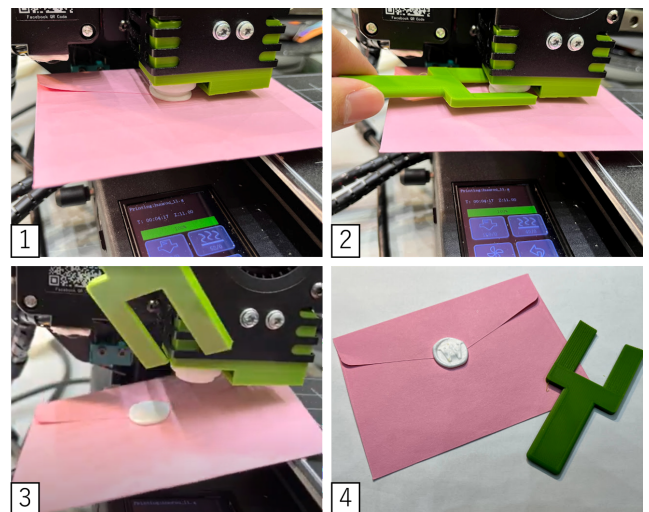


図10 封筒への自動型押しの様子。型の取り外しを容易にする治具を作成した。



## 4.5 G-code の構成

本システムで利用している G-code について、各制御毎に紹介する。

ソースコード 2 に、ノズルの温度調整を行うためのコードを示す。ノズル温度を引き上げると樹脂がノズルから溢れる可能性があるため、封蝋位置から離れた場所でノズル内の樹脂を一度押し出し、更にフィラメントを引き戻すことで、樹脂溢れを防いでいる。

ソースコード 3 に、封蝋位置にヘッドを動かすコードを示す。ノズルの温度上昇処理の後、封蝋位置のやや奥側(封筒の上部)にヘッドを移動する。その後、ヘッドを手前側に動かして封蝋位置に到達させる。このような手順で封筒の蓋を閉じることで、安定した出力を行うことができる。

ソースコード 4 に、フィラメントを射出するコードを示す。まず、ファンを停止してノズルを再度高温に設定する。次に、ノズル位置を少しずつ上げながら、樹脂を出力する。同じ位置で大量の樹脂を射出すると、中央部が窪んでうまく型押しができないため、ノズル位置を調整する必要がある。射出の完了後、樹脂溢れを防ぐためにフィラメントを引き戻す。

ソースコード 5 に、自動型押しのコードを示す。まず、型を封蝋位置の上部まで移動させ、真下に押し込む。次に、型を 20 秒程静止させるが、今回利用した 3D プリンタ(KINGROON 製の KP3S) は停止命令を受け付けないため、2.5 秒毎にノズルの高さを細かく上下させる処理を 8 回繰り返すことで、疑似的に停止させている。また、型押し完了後に樹脂を冷却するため、ファンを最大にしている。

### ソースコード 2 ノズルの温度上昇

```
1 M109 S260 ; ノズル温度を 260度 に設定.  
2 G1 F1500 X100 Y10 E20 ; 座標X100/  
   Y10 に移動し、フィラメントを 20mm 押し出す。  
3 G1 F1000 E5 ; フィラメント 5mm を引き戻す。
```

### ソースコード 3 封蝋位置への移動

```
1 G0 F2700 X75 Y90 ; 封蝋座標の上方X75/Y90 に移動。  
2 G1 F300 Z2.5 ; 座標Z2.5に移動。  
3 G0 F2700 X75 Y68.5 ; 封蝋座標X75/Y68.5に移動。  
4 G0 F2700 Z1 ; 座標Z1 に移動。
```

## 5. 作成事例

3D プリンタで作成した封蝋の例について紹介する。現在は Polymaker 製の 6 種類の PLA 樹脂(白/黒 PLA, 白/黒 TPU, Support, Wood) の他、特殊な PLA フィラメント(温度変化, 蓄光, 磁性)で検証した。また、封筒の色は封蝋と被らないよう色を変えて作成している。

### ソースコード 4 フィラメントの射出

```
1 M106 S0 ; ファンの停止。  
2 M109 S260 ; ノズル温度を 260°C に設定。  
3 G1 F1000 E70 ; 50mm 押し出し (0.274平方cm : 直  
   径 1.75×フィラメント 50mm)  
4 G0 F2700 Z1.5 ; 座標Z1.5に移動。  
5 G1 F1000 E120 ; 50mm 押し出し。  
6 G0 F2700 Z2 ; 座標Z2 に移動。  
7 ... (省略)  
8 G1 F1000 E470 ; 50mm 押し出し。  
9 G1 F1000 Z4 E520 ; 最後に穴を埋めるため座標  
   Z4 に移動しながら、50mm 押し出し。  
10 G1 E510 ; フィラメントを 10mm 引き戻し。  
11 G0 F300 Z10 ; 樹脂に干渉しないよう座標Z10 に移動。
```

### ソースコード 5 型の押し込み

```
1 G1 F2700 X98 Y87 ; 型押し込みのため座標X98/  
   Y87 に移動。  
2 G1 F1000 Z0 ; 座標Z0 に移動し、封蝋を行う。  
3 G1 F1 Z0.4 ; 座標Z0.4に移動。  
4 G1 F1 Z0 ; 座標Z0 に移動。上下運動を分速 1mm で 0  
   .4mm の移動(≒ 2.4秒間の停止)。  
5 ... (省略)  
6 M106 S255 ; ファン最大で稼働。型押し込みを行ってから  
   ファンを稼働。  
7 ... (省略)  
8 G1 F1 Z0.4 ; 座標Z0.4に移動。  
9 G1 F1 Z0 ; 座標Z0 に移動。  
10 M104 S0 ; ノズル温度を 0°C に設定  
11 G0 F300 Z10 ; プラットフォームに干渉しないよう座標  
   Z10 に移動。
```

一般的なフィラメントとして、PLA, TPU, Wood で作成した封蝋を図 11 に示す。試作した印象では、白 PLA と Wood 素材が仕上がりの綺麗さや型の剥がしやすさの観点から適していると感じられた。

特殊なフィラメントとして、温度変化によって色が変わる PLA, 発光する PLA, 磁性を持った PLA で作成した封蝋を図 12 に示す。

### 5.1 2 種類の封蝋表現

3D プリンタで多くの封蝋を作成する過程で、大別して 2 種類の封蝋表現を行えることを発見した。図 13 の左側は一般的な封蝋であり、封筒の蓋の上に樹脂を射出して作成する。この際、蓋の淵に樹脂を射出しないと封蝋の粘着力が弱くなるため、射出位置や移動経路のパラメータを調整した。その過程で、封筒の蓋が閉じていない状態で樹脂を射出すると、蓋の内側に樹脂が入り込み、図 13 右側のようなめり込む封蝋が作成された。封蝋が半分蓋の裏に回り込んでおり、粘着力等の機能も保たれるため、興味深い表現であると考えた。

よって、一般的な封蝋とめり込む封蝋を安定して造形するための手法を調査した。



図 11 一般的なフィラメントで作成した封蝋の例

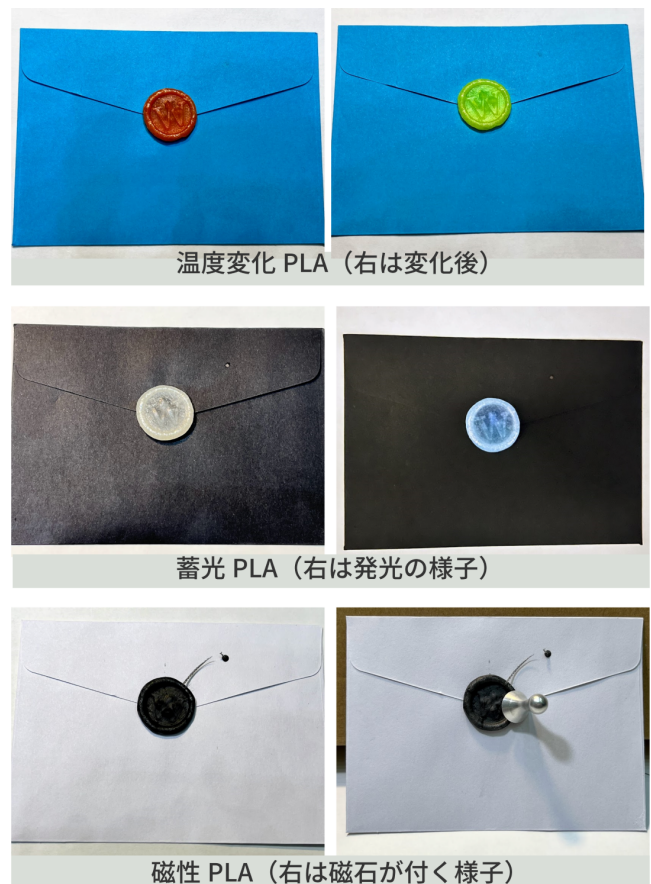


図 12 特殊なフィラメントで作成した封蝋の例

一般的な封蝋を造形する際には、蓋の上方にノズルを降ろしてから封蝋位置（蓋の端）に移動させる（図 14）。封筒の蓋をノズルで押さえることができ、蓋の上への封蝋の成功確率を高めることができる。めり込む封蝋を造形する際は、同じように蓋の上方からノズルを移動させ、蓋を少し通り過ぎた箇所まで樹脂を射出すると、高確率でめり込む封蝋を作成できる（図 15）。別の方法として、ノズルを封筒の下方から移動させる方法も試したが、封筒の蓋がノズル周囲に引っ掛かり押しあがってしまい、正常に封蝋を行えなかった（図 16）。

## 6. 性能評価

### 6.1 目的

性能評価の目的は、3D プリンタでの封蝋が正確に造形されたかに加えて、封蝋本来の機能である「封筒等の封をする機能」と「開封したことを確認できる機能」を備えているか確認することである。

### 6.2 手法

性能評価では、自動型押しを前提とし、前述した 2 種類の射出条件（表面封蝋／めり込み封蝋）と、安定した造形が可能な 2 種類のフィラメント（PLA / WOOD）を利用する（図 17）。封筒としては薄紙の幅 11.3cm、高さ 8cm

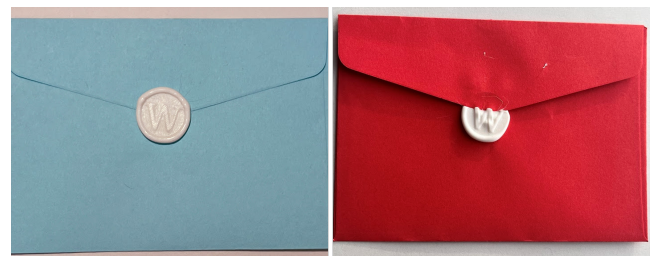


図 13 蓋の上の封蝋と蓋の下にめり込む封蝋

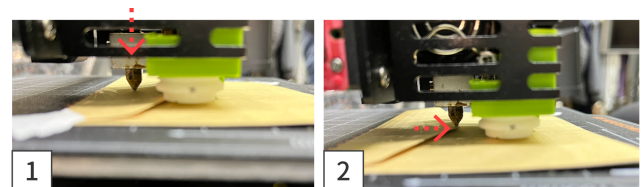


図 14 一般的な封蝋の正常動作。封筒の蓋を押さえるようにノズルを移動し、蓋の淵で樹脂を射出する。

の封筒を利用する。

まず、各条件／フィラメント毎に 5 回（合計 20 回）の封蝋を行い、設定条件通りの出力が行われたか、封筒の固定具合や封蝋の外観等から調査する。

次に、図 18 のように封蝋された全ての封筒を手動で開封することで、開封痕が確認できたかを目視で調査する。



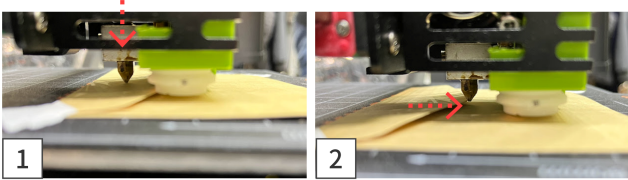


図 15 めりこむ封蝋の正常動作. 封筒の蓋を押さえるようにノズルを移動し、蓋の淵を少し超えた位置で樹脂を射出する

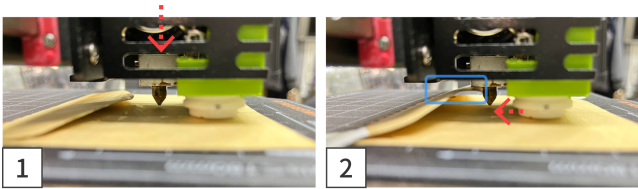


図 16 めり込む封蝋の失敗動作. ノズルを封筒の下方から移動すると、蓋がノズル周囲に引っ掛かり押しあがってしまう。



図 17 封蝋の成功例，射出条件 1 (左) と射出条件 2 (右)



図 18 開封痕の調査

### 6.3 結果と考察

3D プリンタで作成する封蝋の調査について、封蝋が正確に造形され「封筒に封をする機能」が達成されたかの結果を表 1、「開封したことを確認できる機能」を表 2 に示す。

表 1 の結果から、射出条件 1 の一般的な封蝋では約 8 割、射出条件 2 の封筒にめり込む封蝋では約 9 割の確率で意図通りの封蝋が行われた。失敗した場合も、異なる射出条件

と同じ封蝋が行われており（例：射出条件 1 / PLA 樹脂の 2 回目はめり込む封蝋となった）、封蝋自体に失敗する（＝封がされない）ことは一度もなかった。また、どちらの射出条件でも、軽く引っ張る程度の力では封が解かれないことを確認した。

次に、表 2 の結果から、射出条件 1 と射出条件 2 のどちらにも開封の痕がすべての封筒に残っていることを確認した。このことから、封蝋として必要な「開封したことを確認できる機能」を保有していることが分かった。

表 1 封蝋の自動作成を 5 回ずつ検証した結果。

○：蓋の上への封蝋，●：蓋の下へめり込む封蝋，×：封がされず

射出条件 1	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
PLA	○	●	○	○	○
WOOD	○	○	○	●	○
射出条件 2	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
PLA	●	○	●	●	●
WOOD	●	●	●	●	●

表 2 封筒開封の際に痕が残るか 5 回ずつ検証した結果

○：開封の痕あり，×：開封の痕なし

射出条件 1	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
PLA	○	○	○	○	○
WOOD	○	○	○	○	○
射出条件 2	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
PLA	○	○	○	○	○
WOOD	○	○	○	○	○

## 7. ユーザ評価実験

### 7.1 目的

市販の封蝋キットと 3D プリンタで封蝋を作成し、ユーザが感じたことを調査した。

### 7.2 手法

被験者は男性 5 人、女性 1 人の 20 代の学生 6 名を対象とした。その中で 1 名のみ封蝋経験があり、3 名は 3D プリンタを頻繁に使用していた。被験者には、市販の封蝋キットと 3D プリンタでの封蝋の両方を体験してもらい、その後アンケートを通して主観的な印象を調査した。順序効果に配慮して、半数の被験者が市販の封蝋キットを先に体験し、残りの被験者は 3D プリンタでの封蝋を先に体験した。なお、実際の利用場面を想定して、封筒選びや（封蝋キットでの）蝋の選択等は、被験者に行わせた。

次に、各手法での製作手順を説明する。

- 市販の封蝋キット
  - － 封筒と複数の蝋を選択する。
  - － 選択した複数の蝋を溶かし金属の棒で混ぜ合わせる

(図 19).

- 溶けた蠟を封筒に垂らし型を押し込む.
- 3D プリンタの封蝋
  - 3D プリンタを起動し、事前に用意されたファイルを選択する.
  - 選んだ封筒をプラットフォーム上の目印に合わせて設置する.
  - 一定時間待機し、自動で作成された封蝋を型から取り外す.

両方の製作手順を体験後、Google Form を通してアンケートに回答させた。アンケートの項目としては、市販の封蝋キット / 3D プリンタ封蝋のそれぞれで「出来栄えに満足したか」、「封蝋で封がされたか」、「簡単に作成できたか」、「楽しく作成できたか」、の 4 つを用意した。



図 19 市販の封蝋キットでの作成風景

### 7.3 結果

評価実験の結果を述べる。各質問項目に対する 5 段階評価 (1: あてはまらない~5: あてはまる) の結果を表 3 に、自由記述の結果を表 4 に示す。

表 3 各質問における 5 段階評価の結果

5 段階評価, 1: あてはまらない~5: あてはまる		
質問項目	使用機器	平均 (標準偏差)
出来栄えに満足した	封蝋キット	4.33(0.74)
	3D プリンタ	4.66(0.47)
封蝋で封がされていた	封蝋キット	4.83(0.37)
	3D プリンタ	4.83(0.37)
簡単に作成できた	封蝋キット	3.66(1.24)
	3D プリンタ	4.66(0.47)
楽しく作成できた	封蝋キット	4.5(1.11)
	3D プリンタ	3.5(1.5)

### 7.4 考察

封蝋の機能に着目して、「出来栄えに満足した」と「封蝋で封がされていた」という項目の結果から考察する。表 3 では、封蝋キット (出来栄え: 4.33, 封印: 4.83) と 3D プリンタ (出来栄え: 4.66, 封印: 4.83) での差がほとんどなく評価も高いことから、封蝋としての機能はどちらも保持していると考えられる。また、表 4 の自由記述からも、「どちらもキレイに模様が出ていて出来栄えは良かった」「ど

表 4 自由記述で得られた意見

質問項目	回答
出来栄えに満足した	(3D プリンタでの封蝋は) 市販のものとはほぼ遜色のない出来栄えだった。ただ、ろうの量を増やすともっと封蝋感が出てよいと思った
	どちらもキレイに模様が出ていて出来栄えは良かったと思う。肝心の手紙の封もされていて機能面でもよかった
	市販の封蝋では中央部に絵柄が来るようにしたかったが、少しずれてしまった
	3D プリンタで作るほうが失敗はしないのかなと感じた
封蝋で封がされている	(どちらも) 封蝋の役割を果たせていたと思う
	(どちらも) しっかりと封がされていて、問題なかったと思う。カバンとか持ち運んでみても開かないかは、少し気になる
	どちらもともに触れた感じ簡単に取れる気配がなかった
	どちらで作った場合でも、しっかり閉じてあった
簡単に作成できた	市販のものだと感覚で溶かしたろうを混ぜたりで結構アバウトで難しかったが、3D プリンタだと自動で完成度が人に寄らないので簡単だった
	市販は火が必要だったり、少し手間がかかるが、手順自体は簡単だった
	自分は 3D プリンタになれているから簡単だと感じたが、初見の人は調整が必要だったり、手間に感じる人もいるかもと感じた
	楽しく作成できた
楽しく作成できた	(3D プリンタでの封蝋は) 自動なので楽しくはなかった
	どちらも楽しかった。またやりたい
	市販の封蝋では、ろうそくを使って蝋が解けていく様子を見るだけでなく、完成した色味をドキドキしながら待つのが楽しかった。プリンタでは、すべて自動でやるため、作るまでの過程がボタンを押すのみだったため、楽しさは市販に比べると低く評価した
	3D プリンタでの封蝋作成に比べると市販の封蝋のほうが、自分でやっている感じがして楽しかった

ちらで作った場合でもしっかりと閉じてあった」といった意見があり、両手法共に出来栄えや封印としての役割に問題がなかったことが分かる。また、「市販の封蝋では中央部に絵柄が来るようにしたかったが少し、ずれてしまった」「3D プリンタで作るほうが失敗はしないのかなと感じた」といった意見もあり、3D プリンタで作成した封蝋は失敗が少なく、想定通りに作成できたことが伺える。

封蝋作成の手軽さに着目して、「簡単に作成できた」という項目の結果から考察する。表 3 から、3D プリンタ (4.66) の方が封蝋キット (3.66) より簡単だと感じていることが分かった。封蝋キットは作業工程が多いことや蝋を溶かす間は火を見ている必要があることが影響したと考える。また表 4 の自由記述では、初めて作成する場合は勝手がわからないなどの意見もあった。これに対して、3D プリンタでは、作業工程も少なく動作中に監視している必要もないため、好意的に評価されたと考える。

また、封蝋作成の楽しさという面では、「楽しく作成できた」という項目の結果から考察する。表 3 では、封蝋キット (4.5) の方が 3D プリンタ (3.5) より楽しいと感じて



いることが分かった。これは、表4の自由記述にも多く記されているが、3Dプリンタで作成する場合は多くの作業が自動で行われるため、作成している実感に乏しいことが原因だと考える。そのため3Dプリンタでの作成の際は、フィラメントの交換による封蝋の色変更や型の入れ替えなど、自ら選択できる作業を増やす等の対応を検討していく。

## 8. 結論と展望

本章では、本研究のまとめと展望について示す。本研究では、熱溶解積層方式3DプリンタをG-codeで直接制御することで、封蝋表現を行う手法を提案・試作した。まず、封蝋を行う位置に高温/多量のフィラメントを出力し、溶けた蝋のような状態で封筒等に配置する。次に、3Dプリンタが自動で（またはユーザが手動で）型を押し込んで、フィラメントの形を整えつつ、封筒等に溶着させる。さらに、性能評価を通して、封蝋の特性である「封筒等の封をする機能」と「開封したことを確認できる機能」を再現できているかを調査した。現在は一機種の3Dプリンタのみで造形を確認しているため、今後はG-code制御に対応した複数の機種で動作確認を進める。また、封筒のサイズを変えると現在は手動でG-codeを編集する必要があるため、簡単な出力支援ツールの開発も検討している。さらに、多様な型やフィラメント、印刷対象を用いた表現例を探索していきたい。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費20H04231の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] Wikipedia 封蝋. <https://ja.wikipedia.org/wiki/封蝋>
- [2] 高橋治輝, 宮下芳明. オーバーエクストルージョンを用いた熱溶解積層方式3Dプリンタのための造形手法, 芸術科学会論文誌 Vol. 15, No. 5, pp. 194 - 207 (2016)
- [3] 菊地 勇斗, 塚田 浩二. 3Dプリンタを用いた封蝋表現手法の提案. WISS2022 予稿集 (2022)
- [4] 高橋治輝, 宮下芳明. Road 単位の造形に着目した熱溶解積層方式3Dプリンタでの質感表現, 情報処理学会論文誌 Vol.59, Issue.2, pp.644 - 656, 2018.
- [5] Takahashi, H. and Miyashita, H. Thickness control technique for printing tactile sheets with fused deposition modeling, In Adjunct Proc. of UIST ' 16 , pp.51-53(2016).
- [6] Laput, G., Chen, X. and Harrison, C. 3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers and Bristles. In Proc. of UIST' 15, pp. 593-597, 2015.
- [7] Reiner, T., Carr, N., Mech, R., Stava, O., Dachs-bacher, C. and Miller, G. Dual-color mixing for fused deposition modeling printers. Computer Graphics Forum, Vol. 33, No. 2, pp. 479-486, 2014.
- [8] 片倉 翔平, 渡邊 恵太. PrintMotion: 3Dプリンタに搭載されたアクチュエータを使用してプリントしたオブジェクトを動かす手法の提案, WISS2018 論文集 (2018)
- [9] Teibrich, A., Mueller, S., Guimbretière, F., Kovacs, R., Neubert, S. and Baudisch, P. Patching Physical Objects. In Proc. of UIST' 15, pp. 83 - 91, 2015.
- [10] Eickhoff, D., Mueller, S. and Baudisch, P. 2016. Destructive Games: Creating Value by Destroying Valuable Physical Objects. In Proc. of CHI ' 16, 3970-3974.
- [11] Olivier van Herpt. Solid Vibrations. available from <http://oliviervanherpt.com/solid-vibrations/> (accessed 2023-6-30).
- [12] Kanada, Y. 3D printing of generative art using the assembly and deformation of direction-specified parts, Rapid Prototyping Journal, Vol.22, No.4, pp.636-644 (2016).