

# エンジニアリングプラスチックに対応した熱溶解積層方式3Dプリンタヘッドの開発

横山雄哉\*<sup>1</sup> 飯塚真也\*<sup>2</sup> 山川翔平\*<sup>3</sup> 山田夏輝\*<sup>4</sup>

## Development of FDM 3Dprinter Head Adaptable to Engineering Plastics

YOKOYAMA Yuya\*<sup>1</sup>, IIZUKA Shinya\*<sup>2</sup>, YAMAKAWA Shohei\*<sup>3</sup>, YAMADA Natsuki\*<sup>4</sup>

### 抄録

3Dプリンタの普及に伴って、エンジニアリングプラスチック(エンプラ)での3D造形に興味がある県内中小企業が近年増えてきている。エンプラ造形を実際に行くと造形中に樹脂が吐出できなくなる場合がある。これは様々な要因によってプリンタヘッド冷却部における冷却能力が不足して、フィラメント軟化により吐出不良が起きているためと考えられる。今回の研究ではペルチェ素子を用いて冷却能力の安定性を改善した3Dプリンタヘッドを開発した。

キーワード：3Dプリンタ，熱溶解積層方式，エンジニアリングプラスチック，ペルチェ素子

## 1 はじめに

当センターは、県内中小企業に対して、強度や耐薬品性のある樹脂で造形が行える熱溶解積層式の3Dプリンタで、形状試作支援を行っている。熱溶解積層式3Dプリンタのヘッドの構造を図1に示す。



図1 ヘッドの構造

従来の熱溶解積層式3Dプリンタで、エンプラを造形しようとする時、材料が冷却部内で融点に達して詰まることがある。これは冷却温度を制御していない冷却構造が原因である。本研究では冷却部に温度センサとペルチェ素子を取り付け、冷却の電子制御を行い、冷却能力の安定性が向上した3Dプリンタヘッドの開発を目的とした。

\*<sup>1</sup> 材料・機械技術担当

\*<sup>2</sup> 食品プロジェクト担当

\*<sup>3</sup> 総務・事業化・製品開発担当

\*<sup>4</sup> 現 企画担当

## 2 実験方法

### 2.1 既存の3Dプリンタでの吐出実験

一般的に3Dプリンタのヘッドはワイヤー状の材料であるフィラメントが冷却部→加熱部→ノズルの順番で通過する構造になっている。そして、熱が加熱部より上に伝わり、冷却部でフィラメントが融点に達することを防ぐために冷却部が設計されていることが多い。しかし、冷却部に温度センサが搭載されているモデルは非常に稀なため想定以上にノズルが高温になると、温度を感知できないため冷却が追い付かなくなる。この現象を確かめるために、一般的な3Dプリンタ(Tronxy社X5SA)で、エンプラであるPC(ポリカーボネート)のテスト造形を行った。吐出温度などの設定は表1のとおりである。

表1 PC造形の温度設定(X5SA)

	温度[°C]
ノズル(0.4mm 口径)	260
造形テーブル	100
チャンバー	-

なお、X5SAはチャンバーを温める機能を持たないため、チャンバーの温度制御は行えなかった。

## 2.2 ヘッドの開発

### 2.2.1 ヘッドの設計及び試作

3Dプリンタでエンプラを材料として造形を行うには、冷却部に温度センサを搭載したヘッドを設計する必要がある。冷却方法には空冷、水冷、ペルチェ素子などがある。空冷式では高温環境下でファンの寿命が極端に短くなる懸念があり、庫内温度以下に制御することが難しい。また、水冷式では室温に冷却された冷却水がチャンバーの熱で温められてしまうため、動的な温度制御が難しい。よって本研究ではペルチェ素子を採用した。ペルチェ素子を搭載したヘッドのイメージを図2に示す。

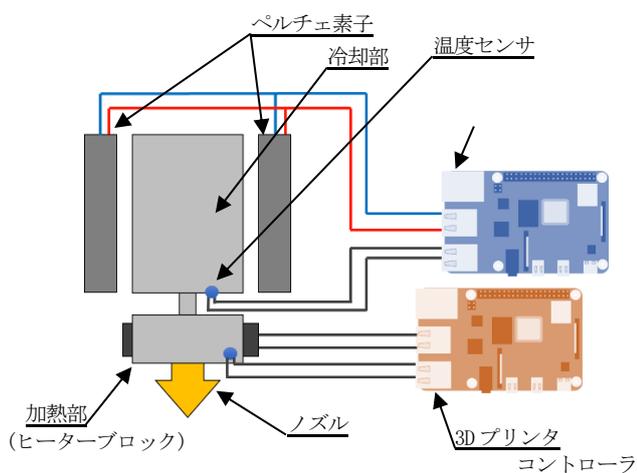


図2 ペルチェ素子を搭載したヘッドのイメージ

ペルチェ素子のコントローラには Arduino nano every とドライバ回路(Hブリッジ回路)を組み合わせさせてPI制御を行った。温度センサにはK型熱電対プローブを用いた。ペルチェ素子を張り付ける治具は加工性のよさからアルミブロックを立フライス盤で切削して試作することにした。

当センター所有の機器だけでは機械加工に限界があるため、ヘッド本体の試作はE3D社が製造しているV6ヘッドをベースに製作することにした。V6ヘッドは非常に入手しやすく、設計図もメーカーが公開しているため扱いやすいことが採用の理由である。

### 2.2.2 フィラメント吐出実験

ヘッドを加熱してフィラメントを供給した際、

通常は、図3(a)のように一定の太さで樹脂が吐出される。しかし、冷却不足等によりフィラメントが熱で変形した場合、図3(b)のように吐出量が減る、または図3(c)のように全く吐出されなくなる。このように吐出量が減ってもフィラメントの供給量は変わらないため、フィラメント供給機(エクストルーダー)の送りギアが滑るかモータが脱調する。

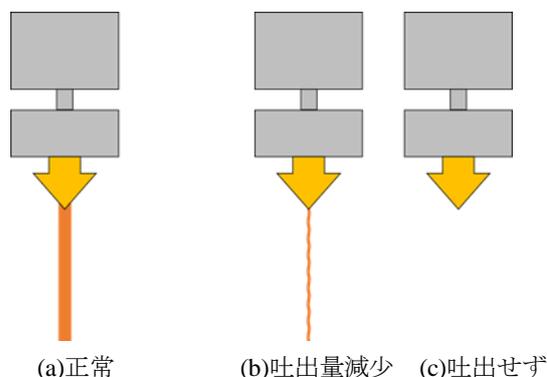


図3 フィラメント吐出

開発したヘッドで図3(a)のように吐出されるか確かめるために2つの材料で吐出実験を行った。1つ目が県内中小企業からの相談が多いPCを選定した。吐出温度などの設定は表2のとおりである。

表2 PC造形の温度設定(開発ヘッド)

	温度 [°C]
ノズル(0.4mm口径)	260
造形テーブル	100
チャンバー	50
冷却部	40

造形テーブルからの熱による影響を再現するために造形テーブルも加熱した。また、冷却部の温度はチャンバー以下の温度で安定して温度制御できるか確認するため40°Cに設定した。

当センターでは製造業のみならず、医療や食品関連の利用者も多い。高温に耐えられる特性を生かした滅菌を行える点や耐油性といった油汚れに強いという特性から、2つ目の材料としてスーパーエンプラのPEI(ポリエーテルイミド)を選定した。吐出温度などの設定は表3のとおりである。

表 3 PEI 造形の温度設定 (開発ヘッド)

	温度[°C]
ノズル(0.4mm 口径)	360
造形テーブル	120
チャンバー	70
冷却部	60

本来、PEI の出力には造形テーブルの設定温度を約 160°C に設定する必要がある。しかし研究開始時点で 160°C に対応した造形テーブルを入手できなかったため、今回は市販の 3D プリンタ用造形テーブルで昇温できる最大の温度である 120°C に設定した。

### 2.2.3 造形実験

テスト造形用のモデルは 3D データ配布サイト Thingiverse にて公開されている raphael schAAF 氏が作成した Filament Test Cube<sup>1)</sup>を用いた。Filament Test Cube を図 4 に示す。

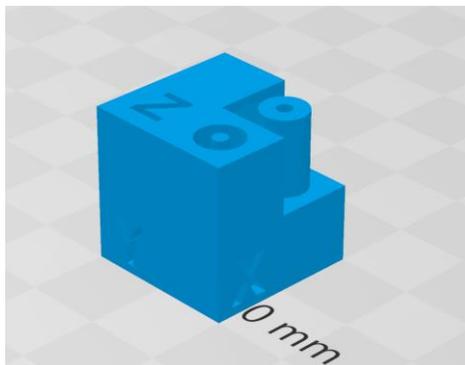
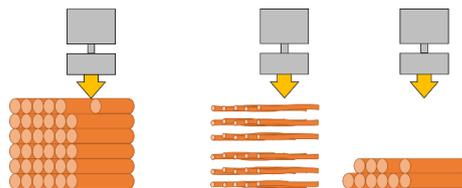


図 4 Filament Test Cube

本研究では積層造形の品質を、吐出量の違いによって大きく 3 種類に分けた。吐出量の違いによる積層のイメージを図 5 に示す。



(a) 正常な積層 (b) 積層不良 (c) 途中から積層せず

図 5 吐出量の違いによる積層のイメージ

もし、図 3(a) のように吐出できれば図 5(a) のように規則的な積層が行われるはずである。しかし図 3(b) のように吐出量が不足する場合は図 5(b) のように層同士が密着せず、側面から観察すると空気層が確認でき、手に取ると容易に破損してしまう。

または図 3(c) のように吐出が全く行われない場合図 5(c) のように、ある層以降は積層が行われないままヘッドのみが稼働し続けると考えられる。PEI の実験では造形テーブルの温度が推奨値に届かないため造形物底面部に反りが発生する可能性がある。よって今回は造形物上端部の積層の様子を側面から観察し、開発したヘッドでの積層が図 5 のいずれにあてはまるかを確かめた。

## 3 結果及び考察

### 3.1 既存の 3D プリンタでの吐出実験の結果

X5SA で造形した結果、造形開始から 10 分ほどで樹脂の吐出が確認できなくなり、ヘッドだけが動いていた。その様子を図 6 に示す。



図 6 ポリカーボネート造形結果

造形テーブルを下限に下げて、吐出を確認しようとするエクストルーダーからフィラメントが滑る音が確認できた。図 5(c) と同様の事象が発生したと考えられる。吐出が確認できなくなったヘッドのカットモデルを図 7 に示す。

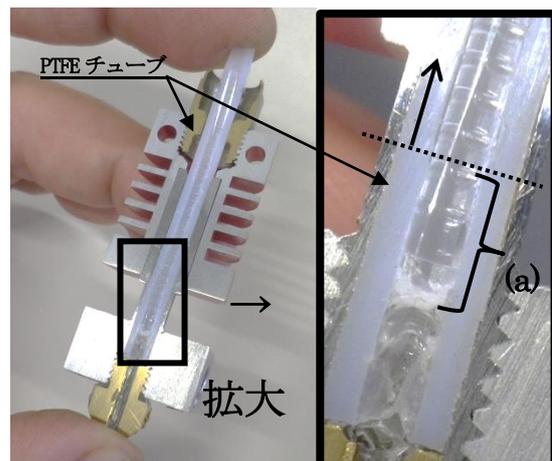


図 7 カットモデル

図7(a)部にフィラメントの膨らみが確認できた。冷却温度を制御する機構を持たないため、図7(a)部の温度がポリカーボネートのガラス転移温度以上に上昇し、破線上部から押し込まれるフィラメントによって変形したと考えられる。

冷却が追い付かなかったのは、メーカーが想定している温度以上になったことが原因であると推定される。また、冷却部内蔵の PTFE(テフロンフッ素樹脂)チューブが原因で、フィラメントと冷却フィンとの熱交換効率が悪いことも考えられる。PTFE チューブはフィラメント通過時の摩擦を減らす目的で使用されることが多いが、冷却部(アルミ)に比べてプラスチックの PTFE チューブは熱伝導率が低く、冷却ファンによる冷却効果が得られにくい。また、融点が約 327°C、耐熱温度 260°C<sup>2)</sup>なので、エンプラの造形においてはヒーターの熱によって変形する可能性が高い。そのため、冷却部の下部まで PTFE チューブを設けている X5SA では PC などのエンプラ造形には不適と思われる。

### 3.2 ヘッドの開発

#### 3.2.1 ヘッドの設計及び試作

図2のイメージ図をもとに設計したヘッドを図8に示す。

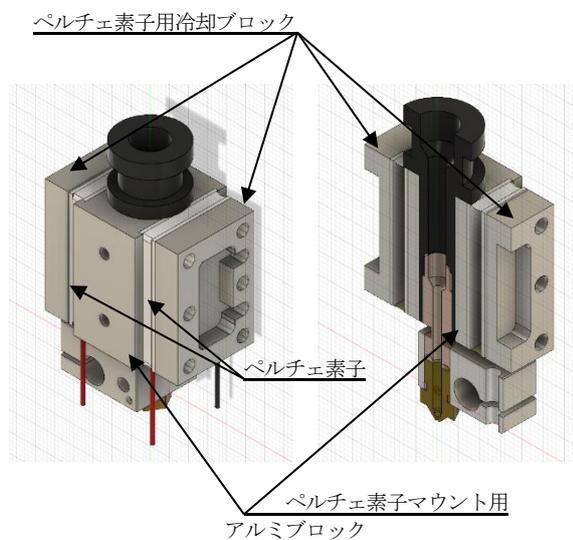


図8 設計したヘッド(左:全体、右:カット)

ペルチェ素子は電圧を加えると一方が冷却、もう一方が発熱する。ペルチェ素子の発熱側の熱を外部へ移動させる必要があるためペルチェ素子用

冷却ブロックを追加した。このブロック内の溝に圧縮空気を流して熱を筐体の外へ移動させた。

図8の設計をもとに立フライス盤で「ペルチェ素子マウント用アルミブロック」及び「ペルチェ素子用冷却ブロック」の切削加工を行った。実際に組み立てたヘッドの様子を図9に示す。

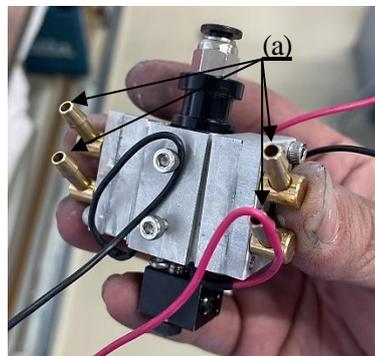


図9 完成したヘッド

完成したヘッドは今回の研究のために製作した実験用の3Dプリンタに取り付けて吐出、造形の実験を行った。実験用3Dプリンタを図10に示す。



図10 実験用3Dプリンタ

図9(a)のニップルを通じて排気される熱気は、温度制御コントローラ付きの PTC ヒーターを経由してチャンバー内に放出される設計にした。

ペルチェ素子を駆動する回路を図11に示す。

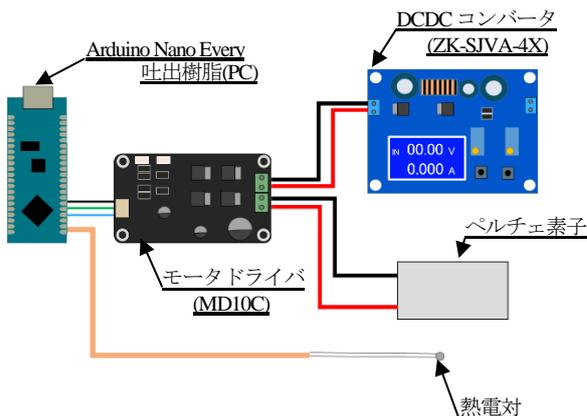


図11 ペルチェ素子駆動回路

ペルチェ素子は熱電対からの温度値を読み取って、モータドライバ(Hブリッジ回路)をPWM制御する仕組みにした。ヘッドにはペルチェ素子を2つ1組で取り付けるため、図11の回路を2系統用いた。

### 3.2.2 吐出実験の結果

吐出実験は表2及び表3の温度設定を行い、5時間経過した後に吐出を試みた。これは実際の造形を想定して、冷却部と加熱部の温度を平衡状態にするためである。5時間経過した後の各部の温度は表2及び表3の値を維持していた。特にペルチェ素子の冷却温度は±0.5℃の範囲内に収まっていた。フィラメントの送り量を50mmに設定し、吐出回数は間隔をあけて3回実施した。吐出した様子を図12に示す。

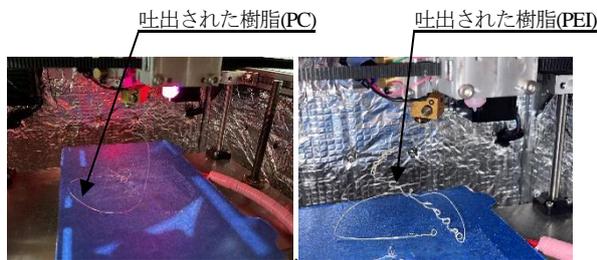


図12 吐出実験(左:PC 右:PEI)

PC、PEI共にエクストルーダーから異音は発生せず、均一に吐出できているように見えた。

吐出樹脂材料を20cmだけ切り出し、任意の3か所をNikon製の画像測定機(VMR-H3030)で観察した様子を図13に示す。ただし、(a)(b)(c)はPC、(d)(e)(f)はPEIであり、PCは透明素材のためハロゲンライトを照射した。

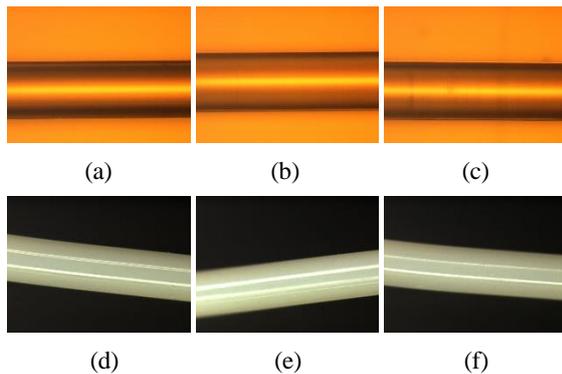


図13 観察した吐出樹脂材料

図12及び図13から、吐出の様子はいずれも図

3(a)に相当すると判断した。また、図13(a)~(f)で測定した吐出樹脂材料の直径を表4にまとめた。

表4 直径データ

	直径[mm]
(a)	0.385
(b)	0.389
(c)	0.376
(d)	0.593
(e)	0.580
(f)	0.603

PCは約0.4mm、PEIは約0.6mmの寸法を維持しながら吐出できていたことが確認できた。PCとPEIで吐出材料の直径が異なるのは、材質、温度設定の違いにより、粘度が異なるためであると思われる。今回の実験では、同一材料で寸法変化が起きていないので、安定して吐出できていると判断した。

### 3.2.4 造形実験の結果

造形テストを行った結果を図14に示す。

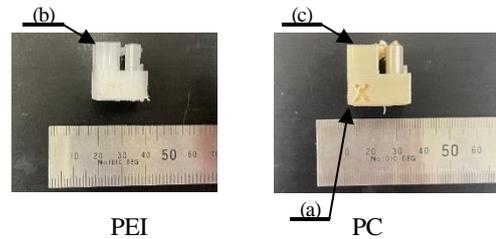


図14 造形結果

PEIにおける造形実験では、2.2.3で述べたように造形テーブルの温度が推奨値より低かったため、図14(a)部に反りが認められたが、上端部の造形は最後まで積層されていた。電子顕微鏡(JSM-IT300LA, 日本電子(株)製)を用いた図14(b)の観察を図15、図14(c)の観察を図16に示した。

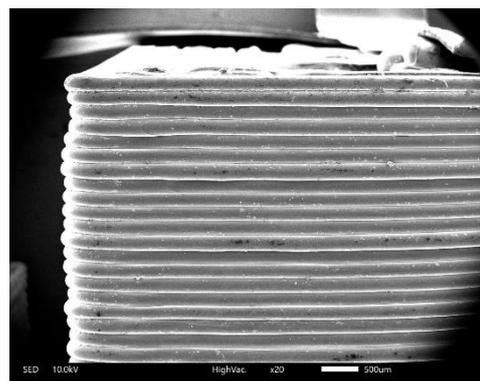


図15 積層の拡大写真(PC)

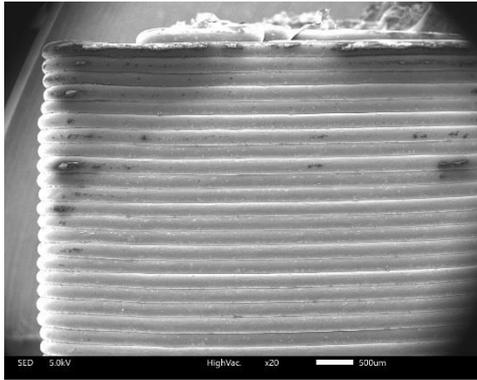


図 16 積層の拡大写真(PEI)

図 15 及び図 16 いずれも側面が規則的に積層できており、空気層も認められないため図 5(a)に相当する品質で造形できたと思われる。

#### 4 まとめ

- (1) ペルチェ素子を搭載したヘッドで冷却部をチャンバー以下の温度に保つことができた。
- (2) エンプラ(PC)とスーパーエンプラ(PEI)の正常な吐出及び造形が確認できた。
- (3) テーブル温度の設定が推奨値に設定できなかったため、3D プリンタとして機能させるためには電源ユニットと造形テーブルユニットの見直しを行う必要がある。
- (4) 冷却部の冷却温度が最適な温度設定になるように、センサの位置と冷却部品の配置を最適化する必要がある。

#### 参考文献

- 1) Thingiverse, “Filament Test Cube” ,  
<https://www.thingiverse.com/thing:2166102> (accessed 2023.4.20).
- 2) 株式会社吉田 SKT コーティングマガジン, “コーティングマガジン” ,  
<http://e-words.jp/> (accessed 2023.5.17).