

2021 年度 卒 業 論 文

氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発と改良

指導教員：羽田久一 教授

メディア学部 メディア学部 A.E.D. lab

学籍番号 M0118050

大谷真太郎

2022 年 1 月

2021 年度 卒 業 論 文 概 要				
論文題目				
氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発と改良				
メディア学部 学籍番号 : M0118050	氏名	大谷真太郎	指導教員	羽田久一 教授
キーワード	氷、3 D プリンター			
<p>氷の造形物は彫刻で作るのが一般的だが、スキルや材料の調達などの問題で誰もが簡単に製作できる訳ではない。本稿では、先行研究である「氷をマテリアルとした 3 D プリンターの開発 著者：東京工科大学大学院 藤田大樹」の液体窒素を使い FDM 方式で氷の造形を行うプリンタを中心に問題点の改良を行う。特に問題として抱えていた、造形速度と造形精度の向上とオーバーハングの実現を目指す。その手法として、氷の粘度を変える方法と造形物のサポートの充填率のパラメーターを変えながら印刷し関係性を調査し、その結果から、氷の造形物を印刷するのに適したパラメータを発見する。これにより、ユーザーは特別な知識がなくても氷プリンター用の GCode を作ることができる。氷の造形物は、時間の経過で溶けて完全に消失する性質を持っており、これは 3D プリンターに新しい表現を与える。</p>				

目 次

1

2 第1章 はじめに	1
3 1.1 はじめに	1
4 1.2 現在の3Dプリンター	1
5 1.3 氷をマテリアルとした3Dプリンター	3
6 1.4 氷造形の提案	4
7 第2章 関連研究	5
8 2.1 関連研究	5
9 2.2 ゲルを用いて印刷する3Dプリンター[1]	5
10 2.3 Suntory-3D on the Rocks[2]	6
11 2.4 A Layered Fabric 3D Printer for Soft Inter-active Objects[3]	7
12 2.5 Additive manufacturing of optically trans-parent glass[4]	7
13 2.6 静電インクジェット式3Dプリンタによる高粘度食品材料の高精度プリント[5]	9
14 2.7 フルカラー3Dプリンター—2D印刷から3D印刷へ—[6]	11
15 2.8 3Dプリンタのセラミックスへの適用[7]	12
16 2.9 3D食用ゲルジェットプリンタによる食品創製[8]	14
17 2.10 積彩[9]	16
18 2.11 放電現象を利用したインクジェット型金属3Dプリンター開発に関する基礎研究[10]	17
19 2.12 高速・高精細金属3Dプリンターの開発[11]	17
20 2.13 Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Structures[12]	19
21 2.14 Elsa:氷を素材とした3dプリンターの開発[9]	20
22 第3章 仮説と提案	23
23 3.1 氷をマテリアルとした3Dプリンター	23
24 第4章 機構の実装	25
25 4.1 予備実験	25
26 4.2 造形の仕組み	27
27 4.3 液体窒素を用いた造形の実装	29
28 4.4 プリンターの本体	29

14.5	プリンターの制御	29
24.6	シリンジの機構	30
34.7	ノズルの機構	30
44.8	ベッドの機構	31
54.9	マテリアルの検討	33
6	第 5 章 開発したプリンターの精度調査実験	34
75.1	プリンターの動作検証	34
85.2	プリンター動作の確認	34
95.3	氷造形の初期実験	35
105.4	氷の積層実験と結果	35
11	第 6 章 今後の展望	38
126.1	今後の課題と予定	38
13	謝辞	39
14	参考文献	40

図 目 次

1

2	1.1 3D プリンターの造形方法一覧	2
3	2.1 3D ゲルプリンターで作製した造形物	5
4	2.2 実際に掘削して作製した高精度の彫刻の例	6
5	2.3 実際に印刷された布の造形物	7
6	2.4 ガラス造形の仕組み	8
7	2.5 造形されたガラスの造形物	8
8	2.6 制作中の様子	9
9	2.7 静電インクジェット式プリンターによるチョコレートプリントの仕組み	10
10	2.8 実際に吐出されたチョコレートを顕微鏡を用いて観察した様子	10
11	2.9 フルカラー 3D プリンターの概略図	11
12	2.10 2D プリンターとフルカラー 3D プリンターの違い	12
13	2.11 SLM 法を用いてセラミックスを印刷する際の様子の模式図	13
14	2.12 SLM 法を用いた印刷で完成した造形物	14
15	2.13 3D 食用ゲルジェットプリンタの模式図	15
16	2.14 寒天とゼラチンの溶液をそれぞれアルミの皿に垂らしたときの様子	16
17	2.15 積彩によって印刷した造形物	16
18	2.16 インクジェット型金属 3D プリンターの概略図	17
19	2.17 DED の模式図	18
20	2.18 DED を用いて作製した造形物	19
21	2.19 塩水を使ったラフト	20
22	2.20 フロンガスを用いて作製した造形物	21
23	2.21 液体窒素を用いて印刷した造形物	22
24	4.1 設計図と造形した形	25
25	4.2 制作した実際の装置	26
26	4.3 造形過程と完成物	27
27	4.4 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（前）	28
28	4.5 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（後）	28
29	4.6 シリンジの機構	31

1	4.7 ノズル	32
2	4.8 液体窒素造形用ベッド	32
3	4.9 砂糖を添加した割合ごとの水	33
4	5.1 押し出し量が多すぎた氷の造形物	36
5	5.2 押し出し量を調整して作られた造形物	37
6	5.3 砂糖を混ぜず水のみでの印刷	37

1

第 1 章

2

はじめに

1.1 はじめに

3D プリンターは 2010 年代に低価格のものが登場するようになってから特に注目をされ続けて
いる。低価格化が進んだことで一般にも普及が進み 2020 年には 3D プリンター市場は世界で 210 億ドルになると予測されている。3D プリンターを活用することで製造業では、生産過程において開発期間やコストを削減することや素材の選択や高性能化ができる。特に、これまで大量生産により、均一化された商品が一般的な社会が形成されてきたが、3D プリンターの登場と普及により多種多様の者を少量生産ずつ、一般家庭で生産することができる。これまで、生産者と消費者は別の者であったが、3D プリンターの登場により生産者と消費者が同一の存在となるなりつつあるのだ。消費者の生産者化により、これまでにない発想の商品が数多く登場し、より便利なこれまでにない発想の商品はデジタル社会により、世界中に拡散され、人類社会の発展に貢献されると考える。3D プリンターは人類の可能性を最大化させるためのツールでもある。その 3D プリンターは印刷できる素材が限られているのが現状である。新たな 3D プリンターの素材を開発することは、多くの人が 3D プリンターを使い新しいものを作り出し、人類の想像力を最大化させるうえで重要なことだと考える。

1.2 現在の 3D プリンター

3D プリンターにはいくつかの種類がある。主に材料押出法、液槽光重合法、シート積層法、結合剤噴射法、材料噴射法、粉末床溶融結合法、指向性エネルギー堆積法などである。

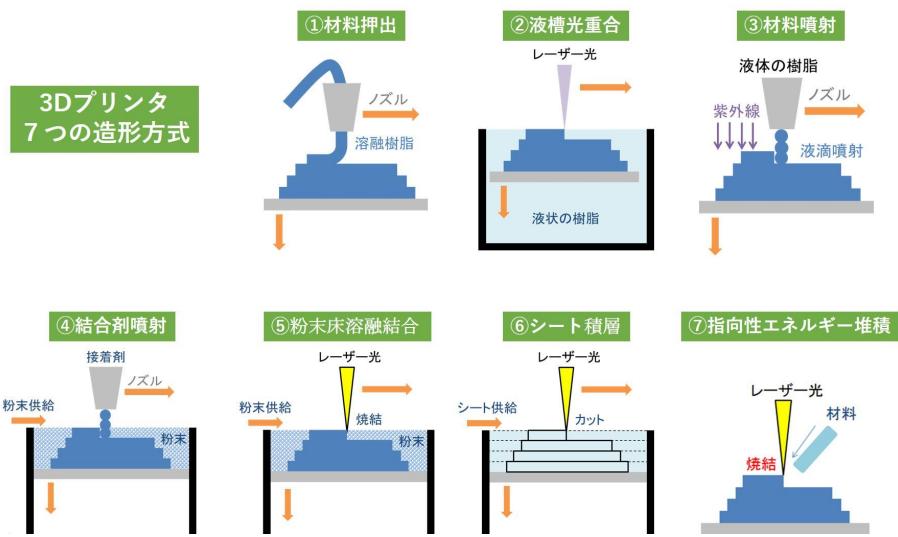
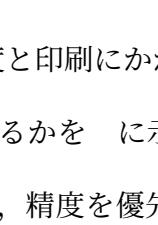


図 1.1 3D プリンターの造形方法一覧

<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2007/28/news007.html>

- 1 特に一般に普及している 3D プリンターは 3 種類ある。
- 2 材料押出法中でも熱溶解積層方式 (FDM) は、ある程度の精度 ($\pm 0.1\text{--}0.2\text{ mm}$ 程度) と速度を有し、近年では 3 万円以下と低価格で一般にもっとも普及している。機構は、プラスチックのマテリアルを加熱し細いノズルから押し出して層を積み上げ造形物を作る。
- 3 液槽光重合法 (光造形法 (SLA)) は、最も古い 3D プリンターの積層方式で、紫外線で硬化する樹脂を使用し積層していく方法である。一層作るごとに樹脂が固まるまで紫外線を当てるため、造形に時間がかかる、その代わりに精度の高い造形 (0.05 mm程度) ができるのが特徴である。しかし、液槽光重合法 (光造形法 (SLA)) は、マテリアルの樹脂が高価であるとともに、造形後の掃除に手間がかかり、完成後も造形物が完全に硬化するまで紫外線を当て続ける必要がある。
- 4 粉末床溶融結合法、なかでも一ーザー焼結 (SLS) は、金属粉末にレーザーを当て熱で溶かすことにより積層を行う。レーザーで熱を加えるため時間がかかるが、高い精度でオブジェクトの印刷ができる。印刷には、金属を溶かすほどの出力の強いレーザーが必要になるためサイズやコスト、安全面を考えても一般家庭では使用が難しいのが現状である。しかし、鋳造では再現できない、液体を通すことのできる構造を作り出せるため、新しい活用方法も模索されている。

1 3D プリンターに重要とされる要素は印刷精度と印刷にかかる時間があると考える。それぞれの
2 プリンターがどの程度 2 つの要素を満たしているかを  に示す。縦の軸が精度を示し、横の軸が
3 印刷にかかる時間を表す。表を見てわかる通り、精度を優先すると速度が落ち、速度を優先する
4 と精度が落ちてしまう。このように、3D プリンターの印刷は時間と精度が反比例する。氷の造形
5 物を印刷するプリンターは、速度を犠牲にして正確な造形物を印刷する業務用タイプと造形を直
6 感的に行うためのハンディータイプのみで、中間の部分が欠落している。そこで、私は精度と速
7 度を両立させた氷の 3D プリンターを作成した。現在広く普及しているプリンターの一部を改修
8 することで氷造形を可能にする。

9 1.3 氷をマテリアルとした 3D プリンター

10 氷の彫刻は、世界中で様々なイベントやアート作品に用いられている。氷は透明なその美しさ
11 と時間とともに変化し、最後には溶けてなくなる儂さから人々に親しまれており、様々な作品が
12 作られている。しかし、誰でも簡単に触れ合えるものではなく、氷の作品を楽しめる場所は限ら
13 れているのが現状である。その原因として氷の作品は作るのに時間がかかり、彫刻の技術や設備
14 が必要となる。私は誰でも簡単に思い通りの形状の氷の作品を作れるようするために、3D プリン
15 ターを使い氷の造形物をプリントする新しい手法を提案する。現在の 3D プリンターによる高精
16 度な氷造形は、20mm/h のスピードで高さ 0.1mm の積層をしていく。この速度で氷の造形物を
17 作るには 0 度以下の部屋を用意し、造形中は常に造形物の周りを低温に保っておかなければなら
18 ない。また、Suntory-3D on the Rocks では CNC を使った切削のため特殊な機材と知識が必要
19 になるため、だれもが扱えるものではない。3D プリンターとして開発されるだけでなく、一般
20 の多くの人に普及させるためには精度を保ちつつ素早く造形できるプリンターである必要がある。
21 私は、3D プリンターを使う知識がある人ならば、スキルに依存せずに氷の造形物を作ることがで
22 き、現状の氷をマテリアルとした 3D プリンターよりも高速で造形のできる 3D プリンターを提
23 案する。

1.4 氷造形の提案

氷の造形物をつくる試みは過去に様々の方法で試されてきた。氷をマテリアルとした自動造形には現状 2 パターンがある。1 つ目が氷の塊を CNC で掘削する方式である。CNC 方式では、精度の高い氷をマテリアルとした造形を行おうことができるのだが、特殊な設備と技術が必要になる。2 つ目が 3D プリンターと同じ仕組みで精度の高い造形物を印刷することができるが、造形速度が 20mm/h のスピードで高さ 0.1mm の積層とかなり速度がかなり遅い。これらの氷をマテリアルとした造形方法では造形速度が遅く、冷凍庫のような特殊な環境が必要になるため、一般の人気が気軽に氷をマテリアルとした造形を利用することが難しいのが現状である。氷をマテリアルとした造形物の使用用途は、現実に氷をマテリアルとした工業製品が無いのを考えると、強度的な問題や常温で溶け出す問題などにより、観賞用に用いられることがほとんどと考えられる。使用用途が観賞用であると考えた場合、工業用製品に必要な要素が正確性（精度）などに対して、観賞用では、氷の条件を満たしたうえで一般の人でも扱いが可能かつ、一般のユーザーが設計したデータにできるだけ近い形に印刷されれば問題ないと考えられる。また、氷を再定義する。氷をまたリアルとした 3D プリンターの主な使用用途は観賞と考える。観賞とは、氷特有の常温で液体へと徐々に変化し、最後にはなくなるこの過程が、ほかのマテリアルにはない大きな特徴であるこの部分を指すと考える。そのため、氷の定義として下記の 2 つを定義する。

1. 固体であるとき常温より低温であること。

2. 常温で溶けること。

氷の定義を以上のようにしたうえで、一般の人でも扱いが可能かつ、一般のユーザーが設計したデータにできるだけ近い形に印刷できる氷をマテリアルとした 3D プリンターの提案する。

1

第 2 章

2

関連研究

3 2.1 関連研究

4 新しいマテリアルを使い、今までにない 3D プリンターでは表現できなかったモノを作ること
5 を可能にしている研究を中心最新の 3D プリンターに関する研究を調査した。

6 2.2 ゲルを用いて印刷する 3D プリンター [1]

7 この研究は、ゲルをマテリアルとして用いた造形物を 3D プリンティングするものである。図
8 2.1 のように、ゲル溶液を使用しながら強度や感触を部位によって変化させて造形物を作成するこ
9 とができる。

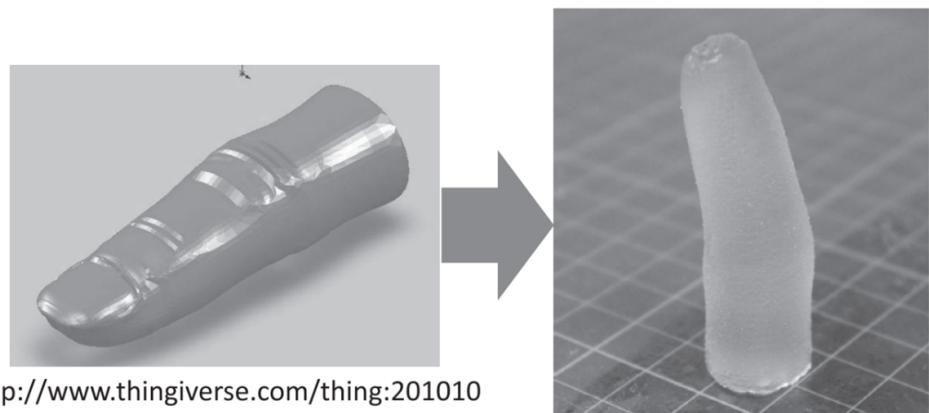


図 2.1 3D ゲルプリンターで作製した造形物

10 これは、ゲル化を誘起する UV レーザーを光ファイバーを通して局所的にゲル溶液に照射する
11 ことで、ゲルの 3 次元造形を可能にしている。3D プリンターは現在、臓器の立体イメージを作り

1 出すのに医療分野で活用されているが、手術の計画や事前検証のための立体の臓器モデルを作製
2 するには、数千万もする工学な 3D プリンターを使用してプラスチックやゴムなどの、実際の臓
3 器よりもはるかに硬い樹脂を用いて造形をする方法しか存在しなかった。このゲルを用いて印刷
4 する 3D プリンターは、低コストで感触がより患者のものと似ている臓器モデルを作成できる可
5 能性を秘めている。

6 この 3D プリンターは材料として微粒子調整ダブルネットワークゲル(略称:P-DN ゲル)を使用
7 している。このゲルは強電解質性を示すモノマー由来の堅く脆い高分子ネットワーク(1st ネット
8 ワーク)と、中性を示すモノマー由来の柔軟な高分子ネットワーク(2nd ネットワーク)が相互侵
9 入網目構造をとっている複合材料である。この P-DN ゲル溶液に UV レーザーを照射することで
10 ラジカル反応が生じ、ゲルの 3 次元構造をつくることができる。

11 2.3 Suntory-3D on the Rocks[2]

12 氷を掘削し様々な彫刻を作りお酒に入れて楽しむ試みがある。多軸の CNC を使い掘削するこ
13 とで高精度の彫刻を作ることができるが、一般に普及させるのはコストならびに加工中の冷却の
14 面から考えると難しい。

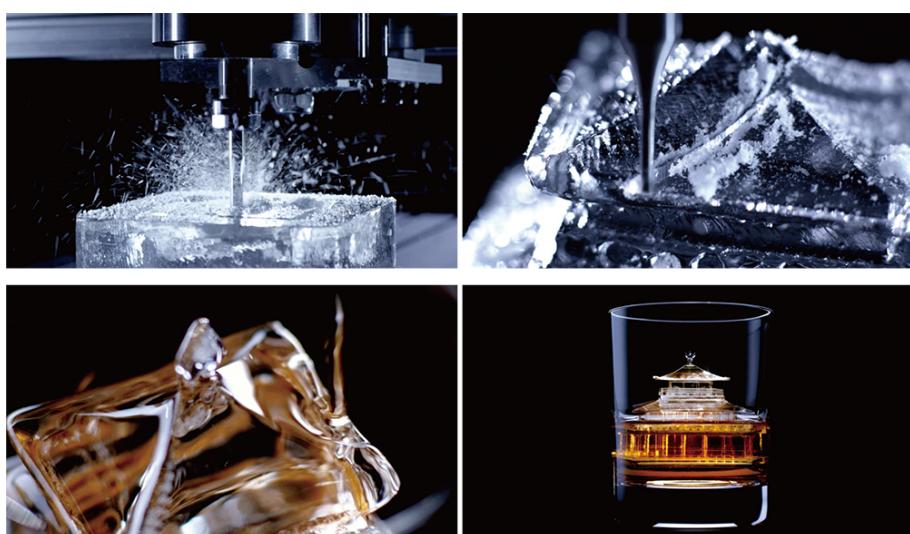


図 2.2 実際に掘削して作製した高精度の彫刻の例

<https://mag.sendenkaigi.com/brain/201406/up-to-works/002420.php>

2.4 A Layered Fabric 3D Printer for Soft Inter-active Objects[3]

この研究では布の造形物を印刷するためのプリンターを紹介している。また、布の中に導電繊維の層を入れたり、コイル状の布を入れることで、タッチセンサーとしての利用法や NFC を使い LED を光らせるアプリケーションが紹介されている。このプリンターの仕組みは、布のロールを引き出し天板に吸着させ固定し、レーザーでモデルの輪郭を切断し布のロールから切り出す。この工程を繰り返し、アイロンの熱で接着していくことで造形物が完成する。

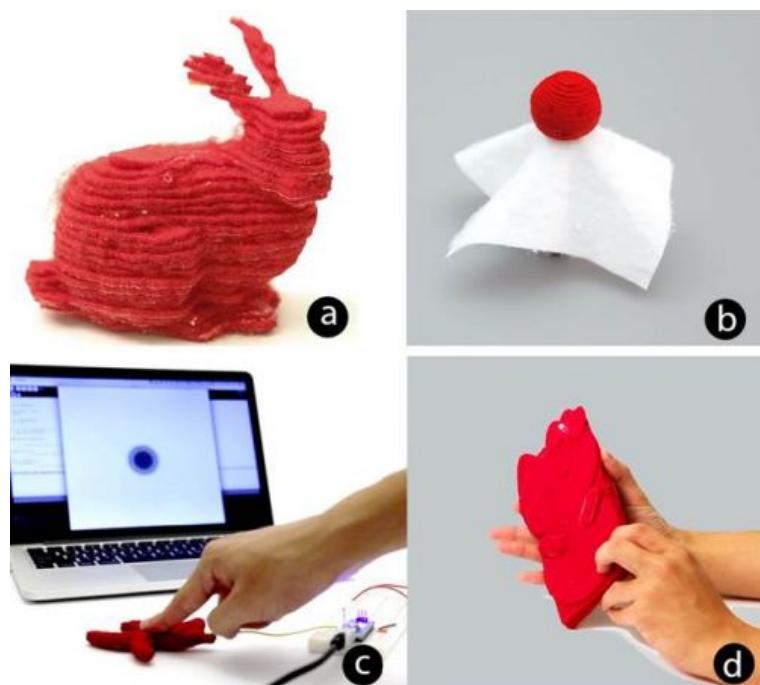


図 2.3 実際に印刷された布の造形物

[https://thelastnewspaper.com/
a-layered-fabric-3d-printer-for-soft-interactive-objects/](https://thelastnewspaper.com/a-layered-fabric-3d-printer-for-soft-interactive-objects/)

2.5 Additive manufacturing of optically trans-parent glass[4]

ガラスをマテリアルに使ったこの研究では、高温で流動性の高い状態に保持されたガラスを貯めておき、そのガラスを垂らすことで造形していく。実際に造形されたガラスの造形物は一回の

- 1 ストロークで出せるラインは太く分厚いものであり、細かい造形はできないがサイズの大きい花瓶のようなものを造形することができる。この手法で造形された花瓶は光を乱反射させる特性があり、上からライトを当て光の波紋を楽しむアプリケーションが提示されていた。

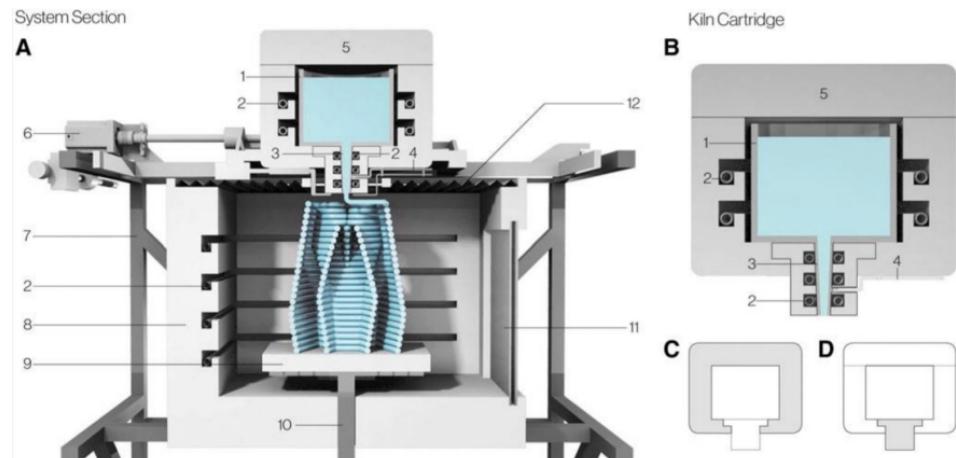


図 2.4 ガラス造形の仕組み



図 2.5 造形されたガラスの造形物

<https://www.behance.net/gallery/65276297/GLASS-I>



図 2.6 制作中の様子

[https://www.solidsmack.com/fabrication/
mits-mediated-matter-group-unveils-transparent-glass-3d-printer/](https://www.solidsmack.com/fabrication/mits-mediated-matter-group-unveils-transparent-glass-3d-printer/)

2.6 静電インクジェット式 3D プリンタによる高粘度食品材料の高精度プリント [5]

この研究では静電インクジェット法を用いることで、高い印刷精度で高粘度材料を用いた、視覚的、味覚的に優れた食品の印刷を可能にする 3D プリンターの開発をしている。

従来の食品の 3D プリンターには熱溶解式 (FDM) 式 3D プリントを用いたチョコレートの印刷がある。しかし、熱溶解式では積層ピッチが約 0.5[mm] 以上と非常に粗く、また高粘度材料をプリントする際には添加物を加える必要がある。この添加物には、食品の味に影響が出てくる問題点がある。静電インクジェット法を用いると、この問題を解決すると同時に高精度な印刷が可能となる。下の図 2.7 の様なチョコレートプリンターを作製し、実験を行った。

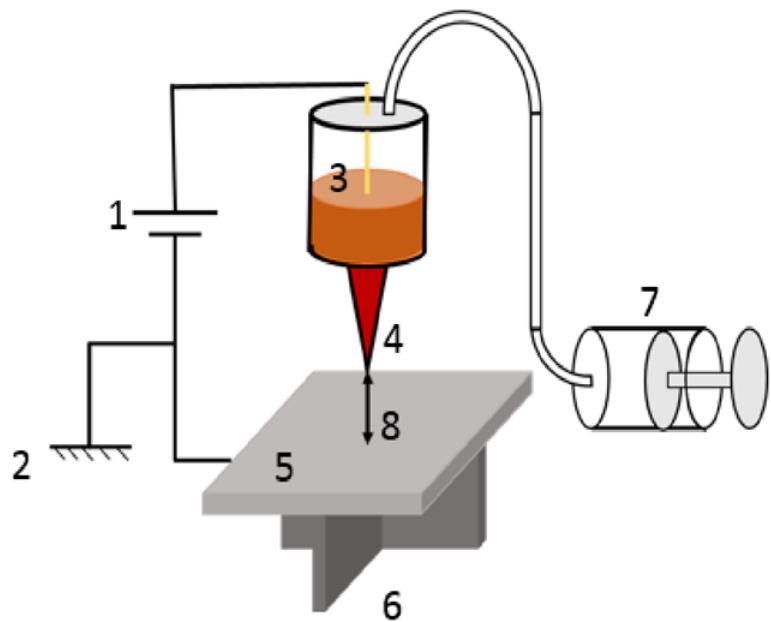


図 2.7 静電インクジェット式プリンターによるチョコレートプリントの仕組み

- ¹ この 3D プリンターは高粘度食品材料であるミルクチョコレートに高電圧を加え微小液滴を吐
- ² 出し、下図 2.8 のような超微細なラインを印刷することを可能にする。また電圧のコントロール
- ³ によって、吐出するラインの径を制御することもできる。

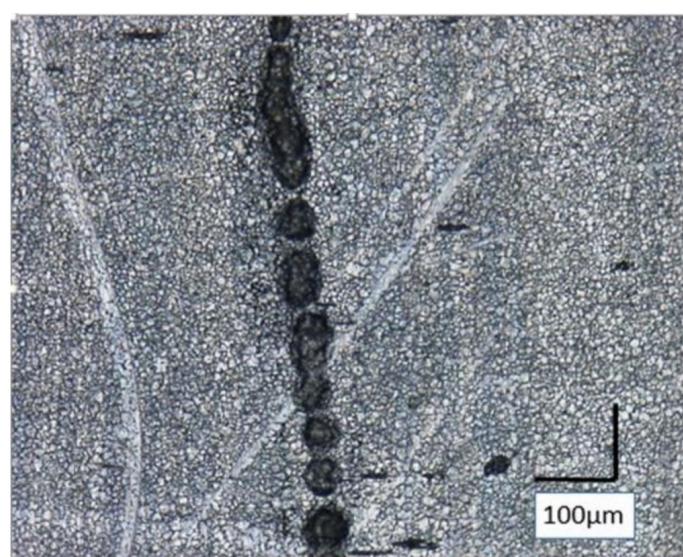


図 2.8 実際に吐出されたチョコレートを顕微鏡を用いて観察した様子

2.7 フルカラー 3D プリンター—2D 印刷から 3D 印刷へ—[6]

フルカラー 3D プリンターについて紹介する。このプリンターは UV(紫外線) 硬化インクジェット方式を採用したことで任意の 3D 形状の造形を可能にすると同時に、その表面にフルカラーで印刷することができる。このフルカラー 3D プリンターにより、クリエイターの創造物が画面の中だけではなく、今までより容易に手に取れるようになっている。新しい市場も徐々に出現し始めていて、最近では 3D 撮影による人文やペットのリアルなコピー造形物が話題になっている。

この 3D プリンターは、下図 2.9 のようにインクを UV 光源で硬化させながら積層法で造形を行う。

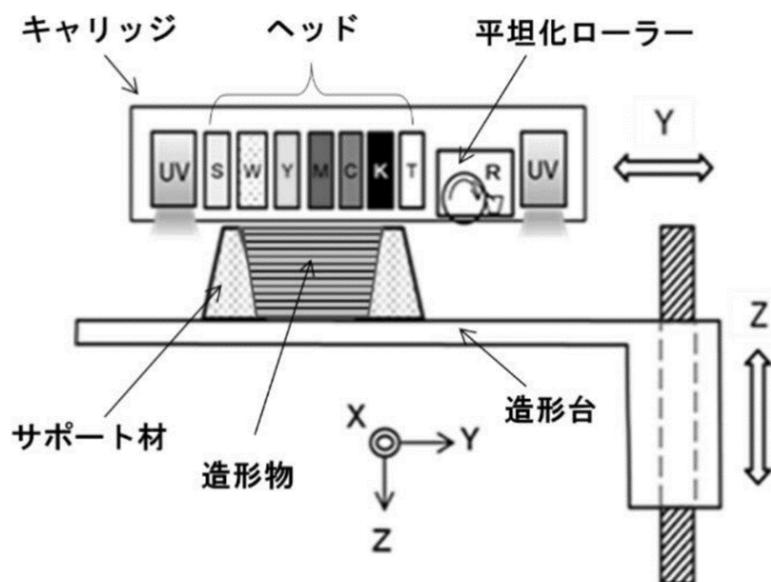


図 2.9 フルカラー 3D プリンターの概略図

2D と 3D を比較した時、フルカラー 3D プリンターでは下図 2.10 のような印刷が行われている。

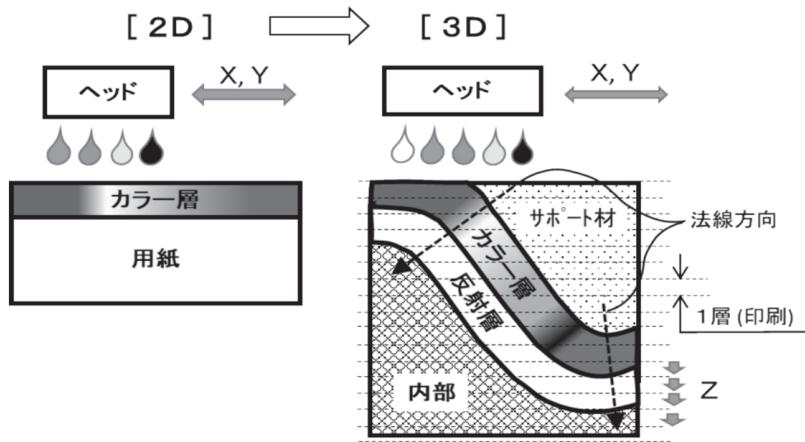


図 2.10 2D プリンターとフルカラー 3D プリンターの違い

- 1 2D の印刷では画像データの濃度によりカラーインクの量が変化するが、これを 3D に適用する
- 2 とカラー創の外形が崩れてしまうため、カラーインクのない空きスペースには透明インクを補填
- 3 して外形を保つ工夫をしている。

4 2.8 3D プリンタのセラミックスへの適用 [7]

- 5 この研究では、セラミックス材料を用いた 3D プリンター開発を行っている。主にセラミック
- 6 織密体を作製する基礎検討に関する研究である。
- 7 今回このプリンタには、SLM 方式を採用する。この方式では下図のように、薄く敷き詰めた粉
- 8 末床にレーザや電子ビームを走査して粉末を溶解し、順次積層することで 3 次元の造形物を得る。
- 9 昨今では、レーザや電子ビームの出力向上に伴い、新規な材料の適用が可能となってきたが、
- 10 セラミックスに関しては、急熱急冷を伴うプロセスの特性上衝撃熱が発生するため構造体の密度
- 11 向上が難しく、工業的な部材の製造は実現していない。この高密度焼結体の迅速な 3 次元造形が
- 12 実現すれば、小ロットの射出成形やテープ整形の代替、複雑形状を生かした高性能セラミックス
- 13 フィルターや半導体作製用の露光ステージへの利用が期待できる。

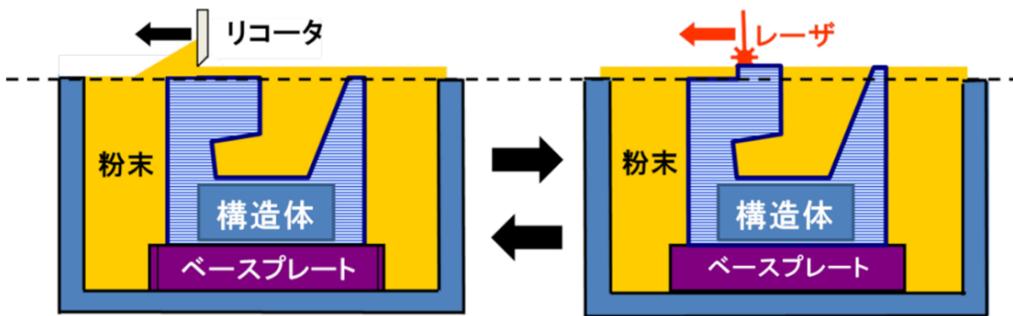


図 2.11 SLM 法を用いてセラミックスを印刷する際の様子の模式図

- 1 热衝撃を回避したセラミックスの SLM 法として、直接セラミックスを焼結せずに、レーザに
 2 よる形状の作製と焼結による密度向上を分離した間接法が考案されている。この間接法では、セ
 3 ラミックスと低融点の樹脂成分と複合化した粉末を用い、樹脂部分のみをレーザ溶解することで
 4 シート成形、グリーン体を作製し、その後、脱脂・焼結することによりセラミックス単体の焼結
 5 体を得るものである。間接法を用いた様々な試みがなされてきたが、造形に時間がかかる、密度
 6 が低いなどの理由で工業的な利用には未だ至っていない。
- 7 この研究では、高強度アルミナ焼結体の作製を目的とした間接法プロセス構築のための検討を
 8 行い、アルミナの相対密度が 94 % の焼結体の作製に成功している。検討のため、①～③のそれぞ
 9 れの特性に着目した
- 10 ①原料セラミックスの選定・粒子径・粒子径分布
 11 ②原料樹脂の選定・脱脂性・樹脂の融点またはガラス移転点
 12 ③造粒粉の作製・流動性・粒子径・かさ密度・1 個粒子の密度
- 13 その他にも、SLM 条件の最適化、3D プリンタ内の粉体挙動のシミュレーションを行った結果、
 14 以下の図 2.12 のような、アルミナの相対密度が 94 % セラミック緻密体を作製することに成功
 15 した。

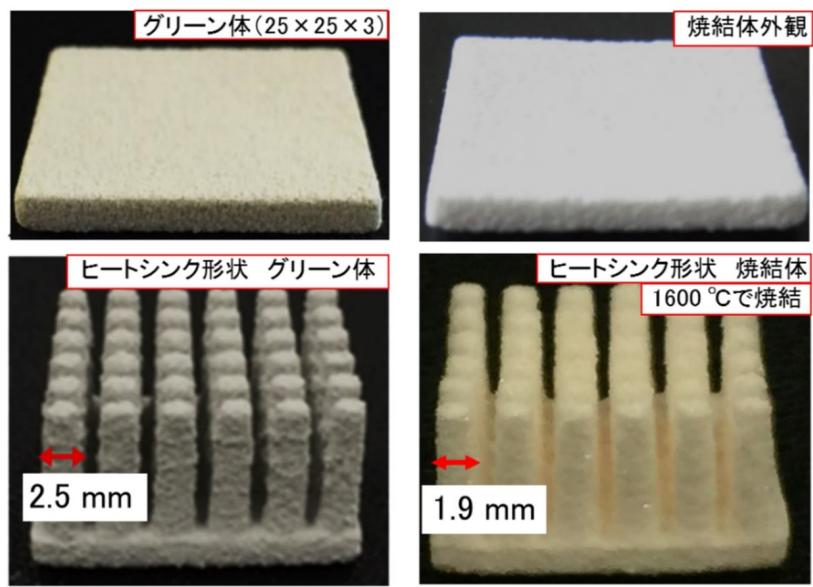


図 2.12 SLM 法を用いた印刷で完成した造形物

2.9 3D 食用ゲルジェットプリンタによる食品創製 [8]

この研究では、現代の高齢者が食事をより食べやすく、見た目も楽しめるような食品が造形できる、食用のゲルプリンタの開発をしている。

この研究で使用するゲルプリンタは下の概略図のように、①搬送系、②液送系、③冷却系の、三つの機構から成り立っている。

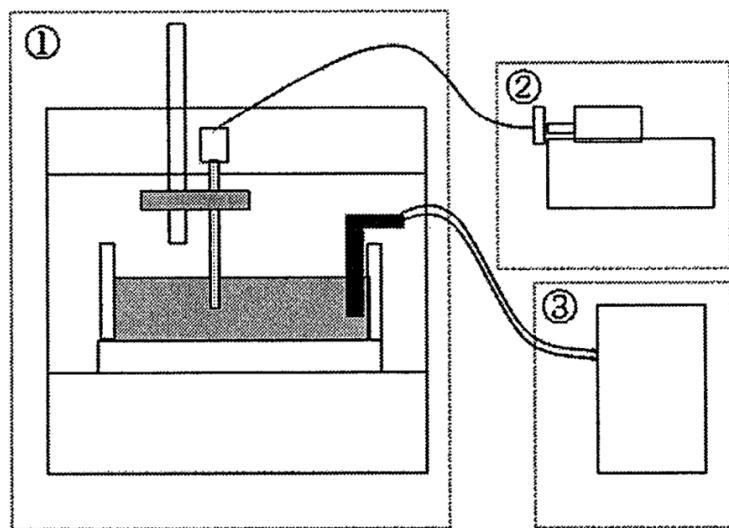


図 2.13 3D 食用ゲルジェットプリンタの模式図

①は、②のシリンジポンプによって送り出された溶液をコンピュータ制御により、任意の形状に造形することが可能な機構である。②は、ゲルの溶液をシリンジで①の方へ押し出す機構となっている。③は、溶液を滴下する水槽を冷却する機構である。この装置を用いることで、アルギニン酸ゲル(人工イクラ)の造形が可能となる。

またこの研究では、プリンタに使用するゲルの冷却方法の検討も行った。寒天とゼラチンの溶液をシリンジを使用しアルミの皿に垂らしていった。1分経過後、寒天、ゼラチン共に固まったが、寒天に比べゼラチンは少し皿にくっついて剥がそうとするとボロボロになった。二つに共通し濃度が高くなると固まりやすくなる傾向があるが、その場合でもゼラチンは強く付着する傾向がある。これは、寒天とゼラチンが植物性と動物性という違いに起因するものだと考えられる。

下図が寒天とゼラチンが固まった様子である。

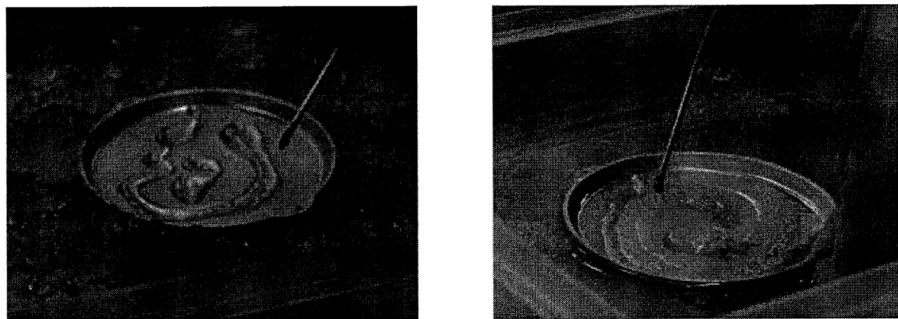


図 2.14 寒天とゼラチンの溶液をそれぞれアルミの皿に垂らしたときの様子

1 2.10 積彩 [9]

2 通常の 3D プリンター特にカラー 3D プリンターでも複数の色をせきそうすることでカラー 3D
3 プリンターとしている。この積彩では、コンピューティングによって調色しながら色糸を積む 3D
4 プリンティングの製造によって造形・着彩をひとつの工程として扱っている。これを「積彩」と
5 呼び、また、繊細な織物のように糸を積んでいく積彩は新たな表現技法（虹のように変化する色
6 彩効果）を可能にし、この技法を応用して「色瓶」というプロダクト製作している。



図 2.15 積彩によって印刷した造形物

<https://idarts.co.jp/3dp/toyamadesign-gp-color-fab/>

2.11 放電現象を利用したインクジェット型金属 3D プリンター開発に関する基礎研究 [10]

この研究では、熱可塑性樹脂を用いた材料押出型の 3D プリンターの機構をベースとした金属 3D プリンターの開発をしている。従来の金属材料を扱うことのできる 3D プリンターの例として、積層造形、粉末床溶接接合、結合剤噴射、溶接肉盛などを利用したものがあるが、これらの方 法は装置も大型で価格も非常に高い。また、金属粉末の結合力が十分ではない指摘もされている。 材料押出型で金属を扱える 3D プリンターが開発されれば、低価格な金属 3D プリンターが実現でき る。

下に 3D プリンターの概略図を示す。この 3D プリンターには①細線繰り出し電極、②薄肉パイ プ回転電極の二つの特徴がある。

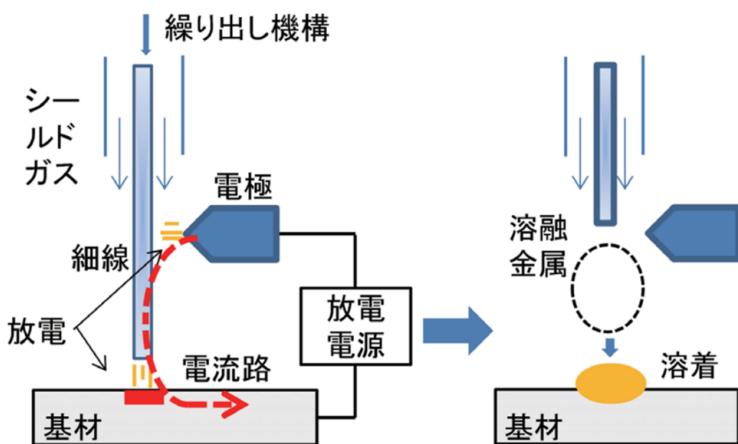


図 2.16 インクジェット型金属 3D プリンターの概略図

2.12 高速・高精細金属 3D プリンターの開発 [11]

この研究では、レーザーメタルでポジションという方法を採用した 3D プリンターの開発を行っている。この方法は DED とも呼ばれていて、レーザー粉末を同時に構造物へ照射し、粉末を溶かしながら造形を進める手法である。以下に印刷している様子の模式図を示す。レーザーを

- 1 ベースプレートに照射すると融解プールが形成される。金属粉末は、ノズルからキャリアガスとともに噴射され、形成された融解収束される。供給された粉末は、プールで溶融し、これを冷却することで凝固する。

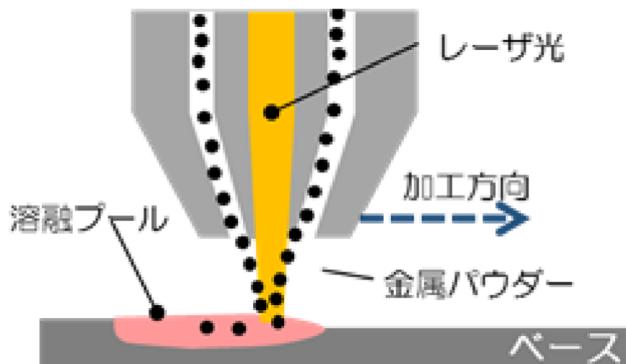


図 2.17 DED の模式図

- 4 従来の金属 3D プリンターの多くは、パウダー・ベッド・フェュージョン (PB) 方式を採用している。この方式では、パウダーベッドを作製し、造形部のみにレーザーを照射し溶融・凝固サイクルとレーザー照射を繰り返して造形を進める。しかし、高速造形のために高出力レーザーを用いると、パウダーのスパッタが多く発生してしまうという課題がある。これにたいし DED は、1. 高出力レーザーが使用できるため造形速度が速い、2. 局所ページを使用することで筐体レス化が可能となり、大型造形にも対応可能、3. 複層造形が可能、などの利点がある。
- 10 また、いかに DED を用いて作製した造形物を示す。レーザー出力と粉末供給量を増加させることで造形速度が向上し、レーザー出力 4kw のときに、最大で 359cc/h の造形速度を実現した。

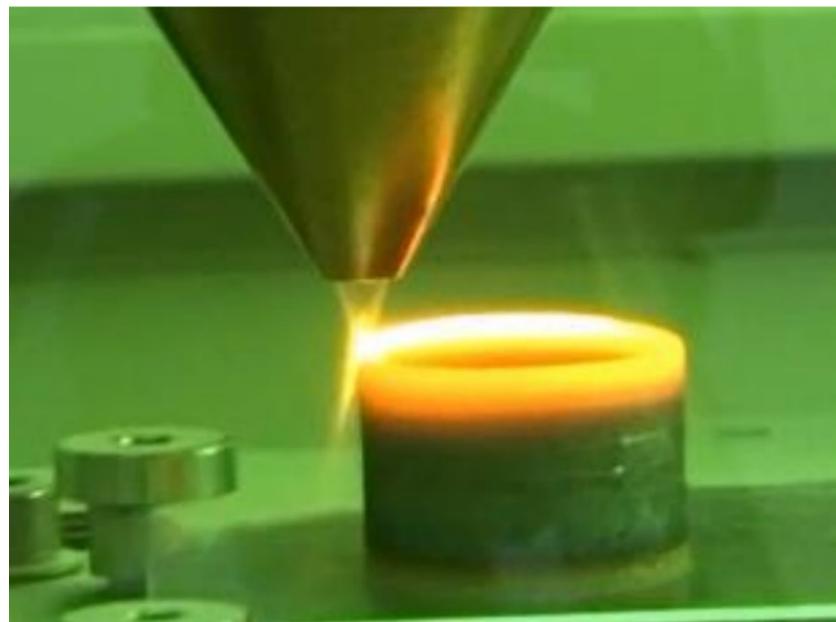


図 2.18 DED を用いて作製した造形物

1 2.13 Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Structures[12]

2 この研究では、冷やした水を一滴ずつ垂らしながら氷を FDM の様に積み上げて造形する。造
3 形のスピードはかなり遅く 20mm/h で造形するが、精密な造形が可能で塩水をサポート剤として
4 使用し、オーバーハングのある造形も可能になっている。塩水でできた氷は水でできた氷よりも
5 低い温度で溶け始めるため、0 度の部屋で放置すれば塩水のラフトが溶け氷の造形物だけが残る
6 仕組みになっている。過去にも水を垂らしながら造形する研究があり、-20° C の水を液体の状態
7 を保つために急速冷凍を防止する研究を参考にしている。この研究は精度を出すためにスピード
8 を犠牲にしており普通のマグカップのサイズでも印刷に 50 時間近くかかる。そのため、造形中に
9 溶けないように冷凍庫の中のような環境の部屋で造形する必要がある。



図 2.19 塩水を使ったラフト

1 2.14 Elsa:氷を素材とした 3d プリンターの開発 [9]

2 この研究は造形速度と造形精度を両立させ、一般に普及している 3D プリンターと同じ学習コ
3 ストで使える氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発を行っている。1 つ目の手法として液
4 化した代替フロン (HFC134a) を使用する方法を提案している。フロンが断熱膨張する際に周囲
5 の熱を奪うのを利用して水を冷やし、瞬時に氷を作る。エアーブラシを使い水とフロンガスを噴
6 射し氷を作る機構を実装した。しかし、3 つの問題点がある。1 つ目は、コストが高いことであ
7 る。3 つ目は、造形物がフロンガスを含み純粋な氷ではないこと。3 つ目は、環境に対して悪影響
8 があることである。



図 2.20 フロンガスを用いて作製した造形物

- 1 2つ目の手法として液化した代替フロン (HFC134a) を使用する方法の問題を解決できる氷を
- 2 マテリアルとした 3D プリンターとして、液体窒素を使用する手法を提案している。



図 2.21 液体窒素を用いて印刷した造形物

1

第 3 章

2

仮説と提案

3.1 氷をマテリアルとした 3D プリンター

4 3D プリンターに実装した、氷を作るための機構について述べる。これまでの氷の造形方法は大
5 きく分けて 2 つある。大きな氷から切削して造形するもの。もう一つが、氷を少しづつたらし長
6 時間をかけて、造形するものがある。どちらも取り扱いが難しく、造形するのに長時間をして
7 しまうのが問題だ。また、短時間できる氷の造形として、過冷却水を使っての造形が有名である。
8 しかし、過冷却水の場合準備に時間がかかる上、温度変化に敏感で少しの衝撃でも凍り始めてし
9 まうため、制御が難しい。一般の人でも扱いが可能かつ、一般的なユーザーが設計したデータにて
10 きるだけ近い形に印刷できる氷をマテリアルとした 3D プリンターの提案する。必要な要素とし
11 ては以下のようである。

- 12 1. ある程度の精度で造形ができること。
- 13 2. 通常の 3D プリンターと同程度の速度で印刷ができること。
- 14 3. 氷の定義を満たしていること。
- 15 4. 3D プリンターが扱える人であれば、短時間で扱えるようになること。

16 それぞれの要素について実装にするにあたり、以上のことが有効ではないかと考える。「ある程
17 度の精度で造形ができること。」「通常の 3D プリンターと同程度の速度で印刷ができるこ。」を
18 満たすために液体窒素を使った造形方法が有効ではないかと考える。また、他の研究では、特殊
19 な機材を使用し、装置が高価になりがちである。液体窒素は、日本各地で手に入る上、価格も 1

1 リットルあたり 300 円と安価であるため、今回の研究で使用することにした。「3D プリンターが
2 扱える人であれば、短時間で扱えるようになること。」を満たすためには、既存の 3D プリンター
3 と同様の使用方法で使える必要があるため、世界中で使用されている 3D プリントおよびスライ
4 サーソフトウェアである Ultimaker Cura で操作が可能である必要があると考える。氷の定義を
5 したことで、純粋な水以外でも氷の造形ができる。純粋な水を積層する場合、水の粘度が低いた
6 め、固まる前に広がってしまう。そのため造形精度が悪く、造形物のからはみ出した部分には造
7 形ができず、オーバーハングなども造形することが難しい。よって、水の粘度を上げることによ
8 り、上記の問題を解決できるのではと考える。また、粘度を上げる手段として、いくつかの方法
9 が考えられる。水に砂糖などを加え粘度を上げる方法とシャーベット状のものをマテリアルとし
10 て使用する方法だ。シャーベット状のものを使用する場合は、温度管理が必要になるため、今回
11 の機構では、砂糖を加え粘度を高めたものをマテリアルとして使用する。

1

第 4 章

2

機構の実装

4.1 予備実験

水に砂糖等の粘度を上げられる物質を添加し造形を行う方式の実証を行った。初めに、3D プリントとして自動化させる前に、水の粘度が造形物の造形速度、造形精度、オーバーハングの造形に影響を与えるのか調査を行った。造形の仕組みは図のようになっている。実験の装置は、保温のため一番下に発泡スチロールの容器を用意した。その上に-196 度の液体窒素を十分に注ぎ、さらにその上からアルミトレーを沈める。それにより、アルミトレーも液体窒素に近い温度まで冷やされ、そこに注射器を使い水あめと水の中間の粘度の水をたらすことで、冷やされた水が氷に変わる。冷やされた氷の温度は 0 度よりも低く、その上に水をたらすと氷柱ができるように氷が積層される。

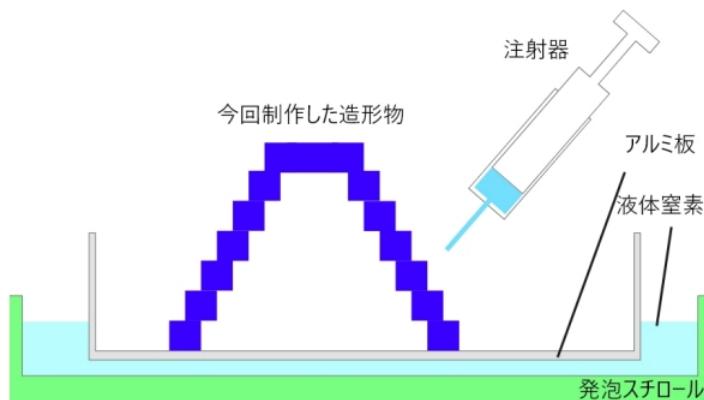


図 4.1 設計図と造形した形



図 4.2 制作した実際の装置

1 制作した装置は図 4.1 である。この装置を使い、水の粘度がどの程度、造形速度と造形精度に影
2 韻するのか調査を行った。造形物はオーバーハングの調査を行うため図のように中を空洞になる
3 ように造形を行った。実際に制作した装置を使い造形を行ったものが図である。造形時間は約 5
4 分ほどで完成した。造形精度の問題もあるが通常の 3D プリンターよりもかなり早い結果になっ
5 た。大きさは横幅約 3 センチ、高さ約 1.5 センチほどである。使用した水の量は、約 200ml ほど
6 である。初めに想定した形通りに造形ができ、オーバーハングの造形も成功した。また、発見し
7 た特徴として、透明度の高い氷を制作することができた。

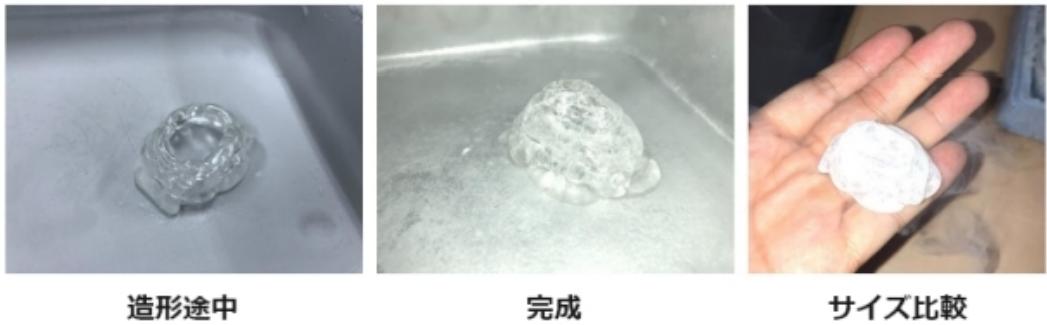


図 4.3 造形過程と完成物

結果は予想通り、造形速度の改善と、オーバーハングができない問題の解消、これら二つを改善しつつ、さらに造形精度の向上ができた。通常のプラスチックをプリントする 3D プリンターと比較して、押し出される水の粘度が関係していることが分かった。また、造形する際に使用した水が砂糖を溶かすために加熱していた。この余熱があったため、注射器から押し出すときの温度が 50 度くらいになっていた。そのため、液体窒素の注射器内部の水が冷え固まらず、すでに造形されている造形部分の表面を溶かすため、造形物が水をはじくことなく接着できているのではないかという仮説が仮説を立てることができた。

4.2 造形の仕組み

予備実験では、液体窒素と水に砂糖を混ぜ粘度を上げることにより、ある程度の精度と速度を持つ事が分かった。ここでは、予備実験を自動化させ、プリンターが水を積層造形していく仕組みについて解説する。造形用のペットに熱伝導率の高い金属製のアルミプレートを使用し、液体窒素の保温性を高める為発泡スチロールでできた容器に沈めた。液体窒素は-196 °Cであり、アルミプレートもそれに近い温度まで冷やされる。そこに水をたらすことで、水が冷やされ氷が作られる。氷は、アルミプレートを通して、液体窒素により冷やされ続けるため、氷の温度も 0 °C 以

1 下になる、その上に水をたらすとその水も氷へと状態が変化し氷が積層される。

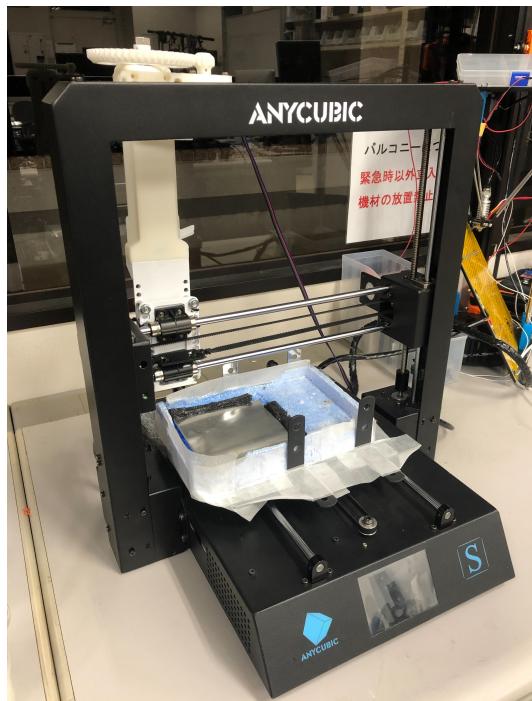


図 4.4 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（前）

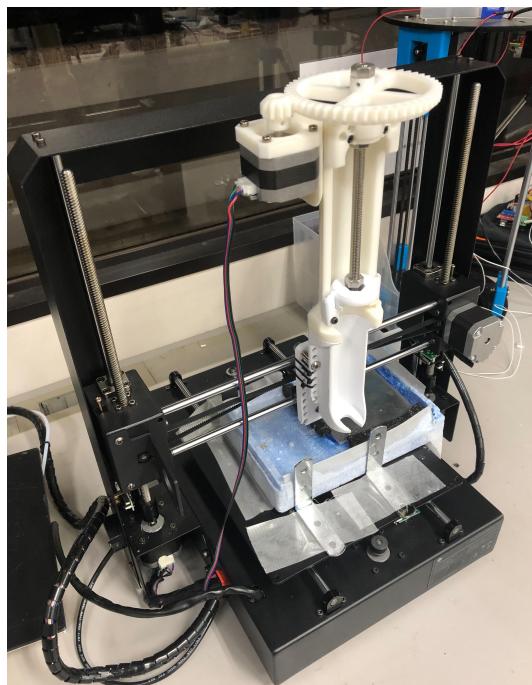


図 4.5 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（後）

4.3 液体窒素を用いた造形の実装

ここでは、液体窒素を使用した造形機構について述べる。機構の全体像は図のようになってい
る。ノズルから水を供給するためのシリンジを押し出す機構を実装した。また、今回の水は粘度
を持たせているため、長いチューブを用いてしまうと、抵抗で押し出すのが難しくなる。そのため
シリンジからノズルまでの距離ができるだけ短くなる機構を実装した。

4.4 プリンターの本体

3D プリンターも一般に販売されているものを改造して使用した。使用した 3D プリンターは、
「Anycubic i3 Mega S」である一般に売れている 3D プリンターの改造で氷をマテリアルとして
造形ができれば、3D プリンターが使える一般の人が短期間に学習が可能だと考える為である。
また、大半が既存の部品であるため、一般への普及もしやすいと考えるためである。

4.5 プリンターの制御

氷の 3D プリンターの制御は、Marlin-Ai3M という 3D プリンターの制御用アプリケーション
と Marlin というファームウェアを一部改造し使用している。改造内容は、モーターの駆動方向の
変更、モータードライバーへの対応、3D プリンターは安全装置として、一定の温度以下で作動
しないようになっている。この安全装置が 0 °C 以下で稼働する氷の 3D プリンターでは必要が無
いため、無効にさせた。

今回制作したプログラムは、Ultimaker Cura を通して「Anycubic i3 Mega S」にアップロー
ドさせた。この作業を行ったことにより、基本的に一般に販売されている 3D プリンターと同じ
ように制御することができる。

4.6 シリンジの機構

シリンジを押し出して水を供給するために、既存のエクストルーダー用のモーターを利用して
シリンジを押し出すためにモーターの回転を上下の運動へ置き換えるために、全ねじ棒を
使用した。また、そのままモーターを直結してしまうと、力不足になることが想定されてため、ギ
アで回転数を調整している。既存の3Dプリンターでは、フィラメントを押し出すモーターを利
用しているため、PCを使い水の押し出し量を自由に調整することが可能であり、安定して造形が
できる設定を模索することができる。

シリンジは3Dプリンターを使い制作したが、サイズが研究室にあるプリンターに収まりきら
なかつたため、上下に分割して印刷し、印刷後接着剤により合体させている。

4.7 ノズルの機構

水に砂糖を加え、粘性を持たせた液体を流すため、シリンジからノズルまでの距離が長いとそ
の間で抵抗が発生しシリンダーやシリンダー制御用のモーターに負担をかける。そのため、でき
るだけ、シリンジからノズルの距離が近い方がいいと考える。そこで、シリンジを直接ノズルと
して使用し、素材を押し出せる機構を制作した。また、ノズルサイズは今回の実験では1mmであ
る。市販されているシリンダーの先をヒートガンで溶かし、先を塞いだ後にドリルによって穴を
空けた。

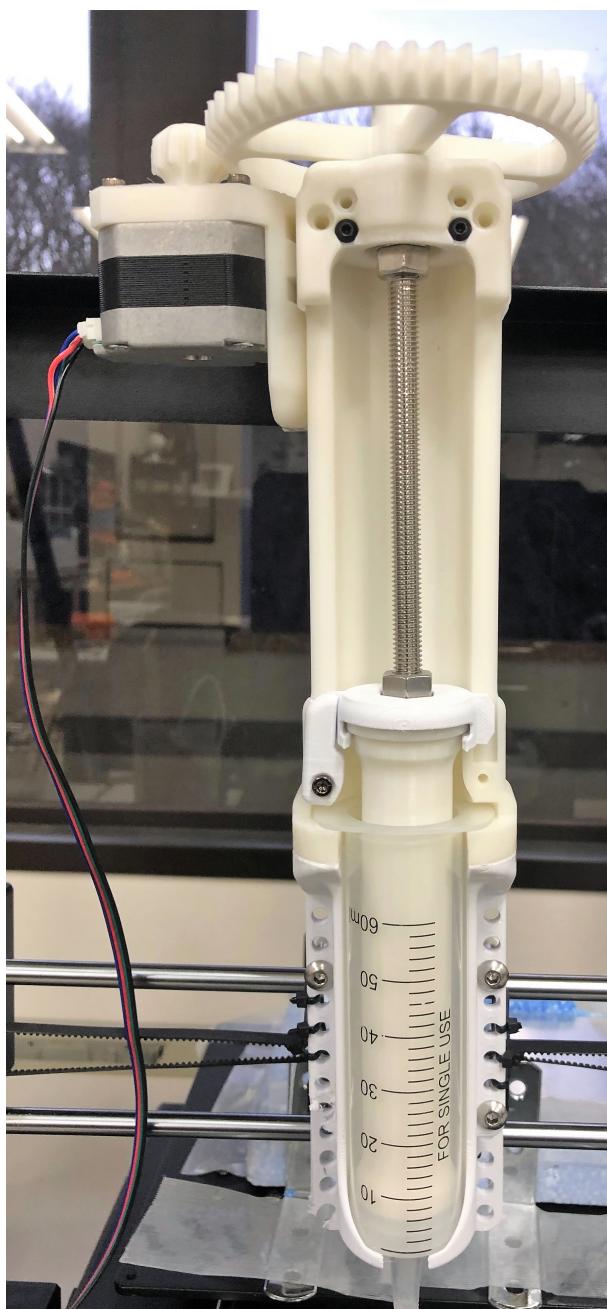


図 4.6 シリンジの機構

1 4.8 ベッドの機構

- 2 液体窒素で氷を造形するベッドとして、大きく 2 つに分けられる。1 つ目が液体窒素用のトレー
3 だ。液体窒素用のトレーでは、下に保温性を高め、液体窒素の持ち時間を長くするために、発泡

₁ スチロールを使用した。また、アルミプレートの下に液体窒素がたまるようにくぼみをつけてい
₂ る。2つ目が造形用のトレーだ。熱伝導率の高い金属のプレートを使用する。今回はアルミ製の
₃ プレートを使用した。また、造形したものを取り出しやすくするために、取り外しが容易な設計
₄ を行った。完成したハードは図4.8のようになっている。

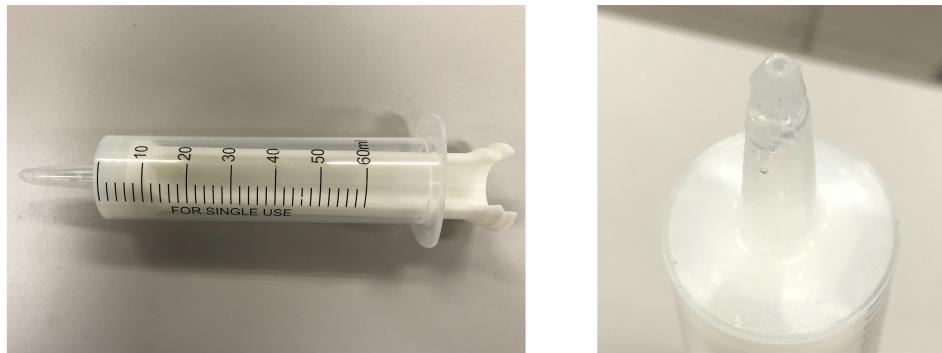


図4.7 ノズル

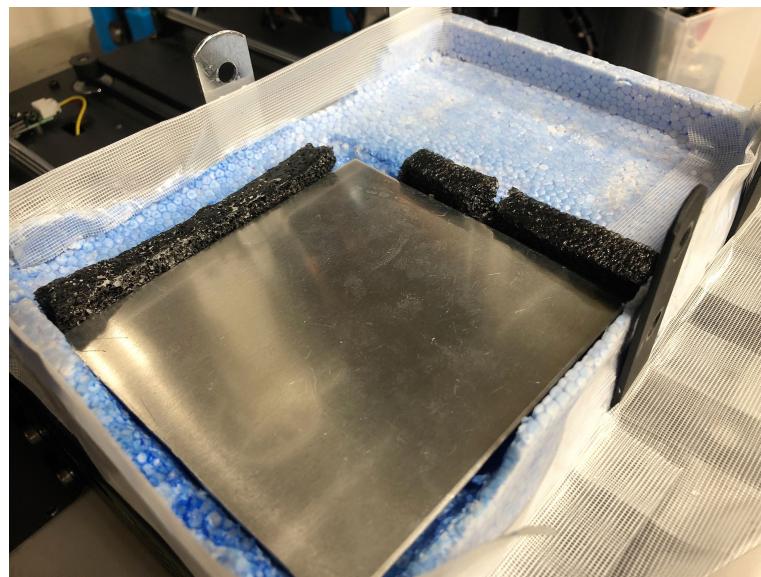


図4.8 液体窒素造形用ベッド

4.9 マテリアルの検討

今回開発する 3D プリンター FDM 方式の改良である。FDM 方式では、常温で固体の物質を加熱し柔らかくしてから押し出している。水のプリントの場合、既に液体を押し出し、冷やして固体にしてプリントする。違いとして、押し出されるときのマテリアルの粘度が印刷精度や印刷時間に違いをもたらしているのではと考える。

今回開発した氷をマテリアルとして 3D プリンターの材料として水に砂糖を混ぜて粘度を上げたものを用意した。砂糖はどこでも手に入りかつ安価で扱いも簡単であるため、今回の実験に採用した、水と砂糖の割合は 1:3 のものを用意した。また、1:3 の液体を作るにあたり、鍋で一度加熱する必要がある。



水



1 : 3
水 : 砂糖

図 4.9 砂糖を添加した割合ごとの水

1

第 5 章

開発したプリンターの精度調査実験

5.1 プリンターの動作検証

4 始めに、開発した氷をマテリアルとした 3D プリンターの動作テストを 2 つに分けて行った。1
5 つ目が、プリンターの動作テストだ。2 つ目が、氷を積層できるかの調査を行った。この二つの検
6 証をこなうことにより、プリンターの挙動や造形の特徴を知ることができる。

5.2 プリンター動作の確認

8 開発した氷をマテリアルとした 3D プリンターの動作テストを行った。一般に販売されている
9 FDM 方式の 3D プリンター「 Anycubic i3 Mega S 」を改造して使用している。ノズルを通常
10 の取り付け位置に設置してしまうと、ノズルの上部が 3D プリンターの上部と接触してしまうた
11 め、今回はノズルを左右を繋ぐポールの後ろ側に設置し、そのうえで、ポールから 1.5 cm 離してい
12 る。そのため、Ultimaker Cura で表示されている、印刷が可能な位置と比べ 5cm 後ろにずれて
13 いる。また、開発した氷をマテリアルとした 3D プリンターの設計上アルミプレートの上でしか
14 造形ができない。そのため、実際に造形できる範囲は 100mm × 80mm × 250mm であることが
15 分かった。

16 シリンダーの押し出し機構については、基本的には問題なく作動した。しかし、3D プリンター
17 が作動していないタイミングでも、ノズルの先から水が漏れ出してしまったのが問題として浮上し
18 た。また、おそらく水が漏れ出したことに起因して、シリンダー内部の圧力が低下した。この影
19 響により印刷を始めた際にしばらくノズルから水が出ない問題が発生することが分かった。しか

- ¹ し、現状 Ultimaker Cura の設定により、始めにシリンダーを少し押し出す設定になっている。
- ² これにより印刷には影響していないが、対処的な解決策であり、根本的な解決が必要だ。

³ 5.3 氷造形の初期実験

⁴ 水が綺麗な線が引けて凍るか、積層されるか、開発した氷をマテリアルとした3Dプリンターが
⁵ 実際に氷の造形ができるかをテストした。線を引く実験では、水と砂糖の割合が1:3のものを使
⁶ い、印刷速度、押し出し量、ライン幅、の調整を行った。純粋な水に比べ、砂糖を混ぜた水は凍
⁷ るまでの速度が遅く、速度を上げすぎると、凍る前に次の層の造形が始まってしまう一方、遅す
⁸ ぎると、ノズルと造形物が凍ってしまい造形ができなくなることが分かった。押し出し量、ライ
⁹ ン幅、については、ノズルの太さ(1mm)を踏まえたうえで、調整しないと、スカスカの造形ま
¹⁰ たは、水が飛び出したような造形になってしまった事が分かった。この時の最適なパラメーターは、
¹¹ ライン幅:3.0mm、印刷速度:50.0mm、押し出し量:300ということが分かった。また、アルミ
¹² プレートの上に直接水を印刷しようとすると途中でプレートから造形物が剥がれてしまい、印刷
¹³ ができなくなってしまった。その解決として、アルミプレートの上に濡らしたキッチンペーパー¹⁴ を引くことで解決させた。キッチンペーパーを造形物とアルミプレートの間に敷くことで、接着
¹⁵ 面積の増加とキッチンペーパーの纖維に造形物が絡みつくため、外れにくくなつた。また、キッ
¹⁶ チンペーパーも液体窒素により氷ついているため、造形物をキッチンペーパーから剥がす作業も
¹⁷ 容易で、キッチンペーパーは複数回使用することが可能だった。以上の結果とパラメータを基に
¹⁸ 積層の実験を行つた。

¹⁹ 5.4 氷の積層実験と結果

²⁰ 氷造形の初期実験で得られた、パラメーターを基に積層に関する実験を行つた。始めに、ライ
²¹ ン幅:3.0mm、印刷速度:50.0mm、押し出し量:300、レイヤー高さ:1.0mmのパラメータで実
²² 験を行つた。この高さでは、押し出し量に対して、高さが足りず、余分な水が外に飛び出し図5.1

1 のような結果が得られた.



図 5.1 押し出し量が多すぎた氷の造形物

2 上記の失敗を基に、パラメーターの調整を行った. レイヤーの高さを, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm,
3 押し出し量のパラメーターを 200, 300, に調整して行ったところ, レイヤー高さを 2.0 mmに変更
4 し, 押し出し量を 200 に変更したものが一番綺麗に造形ができるものが図 5.2 である. また, 水
5 の押し出し量は, フィラメントの押し出し量を調整することで変更できる, 押し出し量の調整は,
6 Arduino IDE を使い, 3D プリンターにアクセスできる. Extrusion multiplier のパラメータで
7 押し出し量を調整することができる. 造形物の大きさは 20mm × 20mm × 9mm の造形物を印
8 刷できた.



図 5.2 押し出し量を調整して作られた造形物

1 また、水のみで印刷した際の造形が図 5.3 である。水のみの印刷では、水は直ぐに固まってしまう。
2 また、水が一か所に集まろうとして粒が出来上がる。この粒にさらに水が集まり、しづく状
3 の印刷ムラが多くできてしまう。このしづく状の印刷ムラがノズルが造形物に干渉し、積層させ
4 て印刷をすることができなかった。



図 5.3 砂糖を混ぜず水のみでの印刷

1

第 6 章

2

今後の展望

6.1 今後の課題と予定

問題として、私の現状の研究ではオーバーハングのある造形物は作ることができない。上部の構造物が土台の氷よりも大きい場合、ガス式では上から吹き付けて造形する仕組みの都合で、造形することができない。空冷式は、水を垂らすため地面のない場所には氷を作ることができない。同様に中身が埋まっていない形状では氷を積むことができないため、造形が不可能になってしまふ。オーバーハングの造形をする際は氷同士が接着する性質を生かし、平面のオブジェクトはある程度度の精度を持って造形することが可能なため、GCode を分割し造形したパーツを接着させることで、造形の幅が大きく広がる。これには、GCode を読み込んだ際にオーバーハングしている部分を分割し、別の GCode にするシステムが必要になる。あるいは、ラフトを使い氷のサポートを作りながら造形する必要がある。ラフトを使う場合は、塩水を使うか色つきの氷で剥がすべき部分の氷をわかるようにしておく必要がある。フロンガスを利用した 3D プリンタは、HFC という代替フロンを利用している。モントリオール議定書で、特にオゾン層破壊に影響が強いとされる特定フロンとは違い、オゾンを破壊しにくいやフロンになっている。造形時に独特な風味が残るが、フロン自体は人体に影響はないため食しても問題はない。しかし、味が悪いことと環境のことを考えると二酸化炭素を使うべきであると考える。二酸化炭素は自然界にありふれた物質で、フロンよりもオゾンを破壊しづらく人体に影響もない。炭酸水などに用いられており氷に使用しても問題ないと考える。今後は、オーバーハングの問題を解決するための手法を試す必要がある。

謝辞

2 本論文の制作にあたり、指導教員である羽田久一教授には多大な助言、指導を受け賜りました。

3 深く感謝を申し上げます。AED.lab の皆さんも様々な助言やサポートをして頂いたこに感謝の意

4 を表します。皆さんのご支援やご意見は、本研究において、ひいては、自分の大きな糧となり、完

5 成に欠かせないものであったことをここで述べさせていただきます。重ねて心からの感謝の意を

6 込めて、筆を置かせて頂きます。ご清覧いただきありがとうございました。

参考文献

1

- 2 [1] 岡田耕治, 渡邊洋輔, 齊藤梓, 川上勝, 古川英光. 3d ゲルプリンティング. ネットワークポリ
3 マー論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 81–87, 2016.
- 4 [2] Suntory-3D on the Rocks. 2017-10-16.
- 5 [3] Huaishu Peng, Jennifer Mankoff, Scott E. Hudson, and James McCann. A layered fabric
6 3d printer for soft interactive objects. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference*
7 on *Human Factors in Computing Systems*, Vol. 2, pp. 1789–1798, 2015.
- 8 [4] Michael Stern, Giorgia Franchin, Markus Kayser, John Klein, Chikara Inamura, Shreya-
9 Dave, James C Weaver, Peter Houk, Paolo Colombo, Maria Yang, and Neri Oxman.
10 Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manu*
11 *facturing*, Vol. 2, No. 3, pp. 92–105, 2015.
- 12 [5] 鈴木祐哉, 高岸賢輔, 梅津信二郎. 静電インクジェット方式 3d プリンタによる後年度食品材
13 料の高精度プリント. ライフサポート学会, 2016.
- 14 [6] 八角邦夫. 静電インクジェット方式 3d プリンタによる後年度食品材料の高精度プリント. 科
15 学と教育, Vol. 68, No. 2, pp. 66–67, 2020.
- 16 [7] 陶山剛. 3d プリンタのセラミックスへの適用. ニューセラミックス懇話会, Vol. 65, pp. 3–8,
17 2018.
- 18 [8] 藤田大樹, 中野亜希人, 羽田久一. Elsa:氷を素材とした 3d プリンターの開発. 研究報告デジ
19 タルコンテンツクリエーション (DCC) , Vol. 2017, No. DCC-17, pp. 1–7, 2017.
- 20 [9] 藤田大樹, 中野亜希人, 羽田久一. Elsa:氷を素材とした 3d プリンターの開発. 研究報告デジ
21 タルコンテンツクリエーション (DCC) , Vol. 2017, No. DCC-17, pp. 1–7, 2017.
- 22 [10] 谷貴幸, 後藤啓光. 放電現象を利用したインクジェット型金属 3d プリンター開発に関する基

- ¹ 硏研究. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 25, No. 2, pp. 77–79, 2018.
- ² [11] 塩見康友, 大野博司, 藤巻晋平, 岡田直忠. 高速・高精細金属 3d プリンタの開発. マイクロエ
³ レクトロニクスシンポジウム論文集, Vol. 25, pp. 271–274, 2018.
- ⁴ [12] 塩見康友, 大野博司, 藤巻晋平, 岡田直忠. 高速・高精細金属 3d プリンタの開発. マイクロエ
⁵ レクトロニクスシンポジウム論文集, Vol. 25, pp. 271–274, 2018.