

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、3Dプリンター			
<p>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。その中でも、私は氷をマテリアルとした3Dプリンターの開発を行おうと考えた。</p> <p>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、多くの人々に親しまれて様々な作品が作られている。しかし、氷の作品は作るのに時間がかかり、彫刻の技術や設備が必要となるため、誰でも簡単に触れ合えるものではない。そのため、一般の人でも扱いが可能かつ、一般的な3Dプリンターと同程度の速度とある程度の精度を両立した氷をマテリアルとした3Dプリンターの提案する。</p> <p>水の粘度を上げることで造形精度を向上させ、世界中で使用されている3Dプリンターやスライサー・ソフトウェアであるUltimaker Curaで操作が可能な氷をマテリアルとした3Dプリンターの開発を行った。</p> <p>実験では、純粋な水を使用した場合と水と砂糖を1:3で混ぜた液体での場合で比較を行った。氷をマテリアルとした3Dプリンターでの造形を行う際、水と砂糖を混ぜた液体の方が、適しているということが分かった。また、一般で広く使われているスライサー・ソフトUltimaker Curaを利用して造形できるため、3Dプリンターを扱えるものなら、少ない学習コストで使用することができる。よって、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プリンターの開発ができたと考える。</p> <p>しかし、今回開発した氷をマテリアルとした3Dプリンターにもいくつか課題が残る。1つ目が予備実験において、手で試した際の精度を自動かさせた際に再現できていないこと。2つ目一度に造形できる量に制限があること。この二つを解決できたと考える。</p> <p>一般の人が気軽に氷の造形を楽しみ、様々な氷の造形物を創造するには、ノズルサイズの調整や水の温度の調整、粘度の調整などの検証を行い、さらなる精度と速度の向上が必要となる。</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	6
8 2.1 関連研究	6
9 2.2 ゲルを用いて印刷する3Dプリンター[1]	6
10 2.3 Suntory-3D on the Rocks[2]	7
11 2.4 A Layered Fabric 3D Printer for Soft Inter active Objects[3]	8
12 2.5 Additive manufacturing of optically trans-parent glass[4]	9
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]	11
14 2.7 フルカラー3Dプリンター—2D印刷から3D印刷へ—[6]	12
15 2.8 3Dプリンタのセラミックスへの適用[7]	14
16 2.9 3D食用ゲルジェットプリンタによる食品創製[8]	15
17 2.10 積彩[9]	17
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]	18
19 2.12 高速・高精細金属3Dプリンターの開発[11]	18
20 2.13 Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Structures[12]	20
21 2.14 Elsa:氷を素材とした3dプリンターの開発[13]	21
22 2.15 関連研究のまとめ	23
23 第3章 仮説と提案	25
24 3.1 氷をマテリアルとした3Dプリンター	25
25 第4章 機構の実装	27
26 4.1 マテリアルの検討	27
27 4.2 予備実験	28
28 4.3 造形の仕組み	31

14.4	液体窒素を用いた造形の実装	32
24.5	プリンターの本体	32
34.6	プリンターの制御	33
44.7	シリンジの機構	33
54.8	ノズルの機構	34
64.9	ベッドの機構	36
7	第 5 章 開発したプリンターの精度調査実験	38
85.1	プリンターの動作検証	38
95.2	プリンター動作の確認	38
105.3	氷造形の初期実験	39
115.4	氷の積層実験と結果	39
12	第 6 章 結果と考察	42
13	第 7 章 まとめ	44
14	謝辞	47
15	参考文献	48

図 目 次

1

2	1.1 3D プリンターの造形方法一覧	2
3	1.2 印刷速度と精度の関係	3
4	2.1 3D ゲルプリンターで作製した造形物	6
5	2.2 実際に掘削して作製した高精度の彫刻の例	7
6	2.3 実際に印刷された布の造形物	8
7	2.4 ガラス造形の仕組み	9
8	2.5 制作中の様子	10
9	2.6 造形されたガラスの造形物	10
10	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	11
11	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	12
12	2.9 フルカラー 3D プリンターの概略図	13
13	2.10 2D プリンターとフルカラー 3D プリンターの違い	13
14	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	14
15	2.12 SLM 法を用いた印刷で完成した造形物	15
16	2.13 3D 食用ゲルジェットプリンタの模式図	16
17	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	17
18	2.15 積彩によって印刷した造形物	17
19	2.16 インクジェット型金属 3D プリンターの概略図	18
20	2.17 DED の模式図	19
21	2.18 DED を用いて作製した造形物	20
22	2.19 塩水を使ったラフト	21
23	2.20 フロンガスを用いて作製した造形物	22
24	2.21 液体窒素を用いて印刷した造形物	23
25	4.1 砂糖を添加した割合ごとの水	28
26	4.2 設計図と造形した形	29
27	4.3 制作した実際の装置	29
28	4.4 造形過程と完成物	30
29	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（前）	31

1	4.6 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（後）	32
2	4.7 シリンジの機構	35
3	4.8 ノズル	36
4	4.9 液体窒素造形用ベッド	37
5	5.1 押し出し量が多すぎた氷の造形物	40
6	5.2 押し出し量を調整して作られた造形物	41
7	5.3 砂糖を混ぜず水のみでの印刷	41

1

第 1 章

2

はじめに

3 1.1 はじめに

4 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
5 いる。低価格化が進んだことで一般にも普及が進んでいる。3D プリンターを活用することで製
6 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。
7 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
8 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
9 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
10 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
11 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
12 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
13 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
14 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
15 の想像力を最大化させるうえで重要なことだと考える。

16 1.2 現在の 3D プリンター

17 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、
18 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。プリンター
19 に置ける主な機構は図 1.1 に示す。

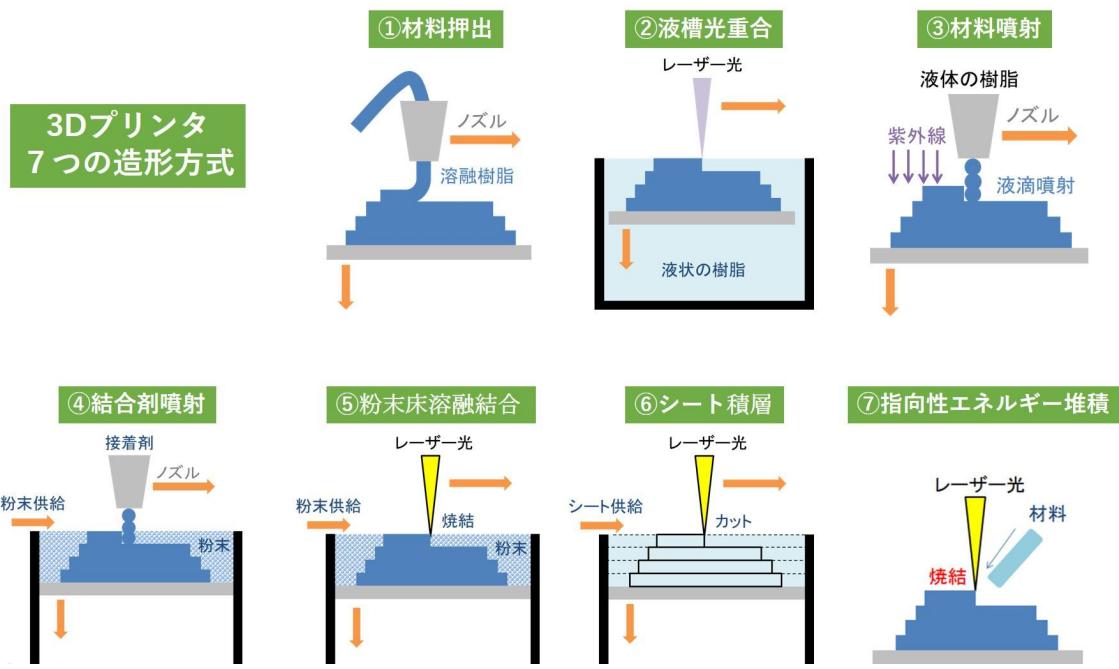


図 1.1 3D プリンターの造形方法一覧

<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、なかでもレーザー焼結 (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、

- 1 安全面を考へても一般家庭では使用が難しいのが現状である。しかし、铸造では再現できない、液
 2 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。
- 3 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
 4 のプリンターがどの程度 2 つの要素を満たしているかを図 1.2 に示す。縦の軸が精度を示し、横
 5 の軸が印刷にかかる時間を表す。表を見てわかる通り、ある程度普及している 3D プリンターは
 6 ある程度の造形速度と精度を兼ね備えている。氷の造形物を印刷するプリンターは、速度を犠牲
 7 にして正確な造形物を印刷する業務用タイプのみである程度印刷速度を持ったプリンターが無い。
- 8 そこで、私は精度と速度を両立させた氷の 3D プリンターを開発した。現在広く普及しているプ
 9 リンターの一部を改修することで氷造形を可能にする。

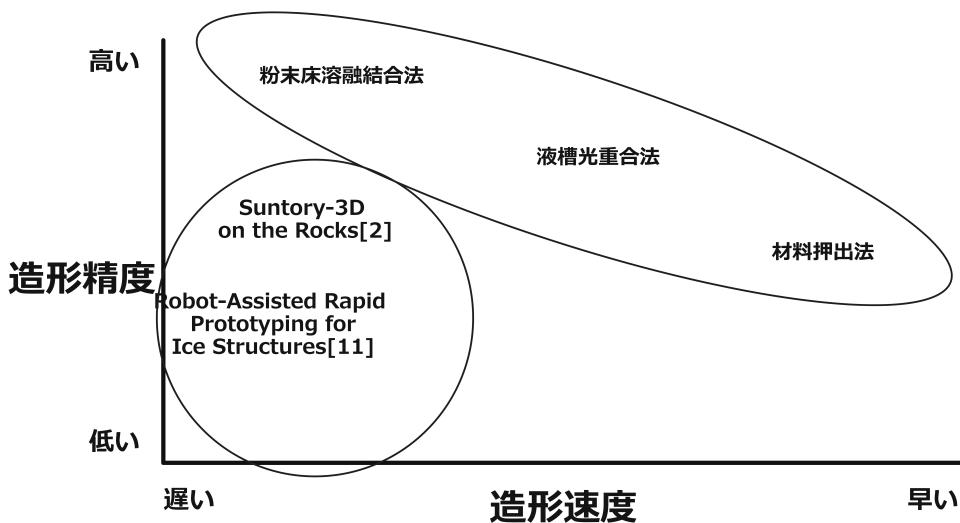


図 1.2 印刷速度と精度の関係

10 1.3 氷をマテリアルとした 3D プリンター

- 11 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
 12 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
 13 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

1 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
2 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にするため、3D プリン
3 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
4 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
5 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
6 ない。また、Suntory-3D on the Rocks [2] では CNC を使った切削のため特殊な機材と知識が必
7 要になるため、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
8 の多くの人に普及させるためには精度を保つつゝ素早く造形でいるプリンターである必要がある。
9 私は、一般の人でも扱いが可能かつ、一般の 3D プリンターと同程度の速度とある程度の精度を
10 両立した氷をマテリアルとした 3D プリンターの提案する。

11 1.4 氷造形の提案

12 氷の造形物をつくる試みは過去に様々な方法で試されてきた。氷をマテリアルとした自動造形
13 には現状 3 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
14 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
15 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
16 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。3 つ目が方に水を流
17 し込み、硬化させる方法である。氷を造形する際に一度型をつくる手間や氷になるまでに数時間
18 と時間が掛かる。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
19 特殊な環境が必要になるため、一般の人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
20 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
21 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
22 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
23 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

1 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
2 られる。また、氷を再定義する。氷をマテリアルとした3Dプリンターの主な使用用途は観賞と
3 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
4 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
5 記の2つを定義する。

- 6 1. 固体であるとき常温より低温であること。
7 2. 常温で溶けること。

8 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3Dプリンターと同
9 程度の速度とある程度の精度を両立した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。

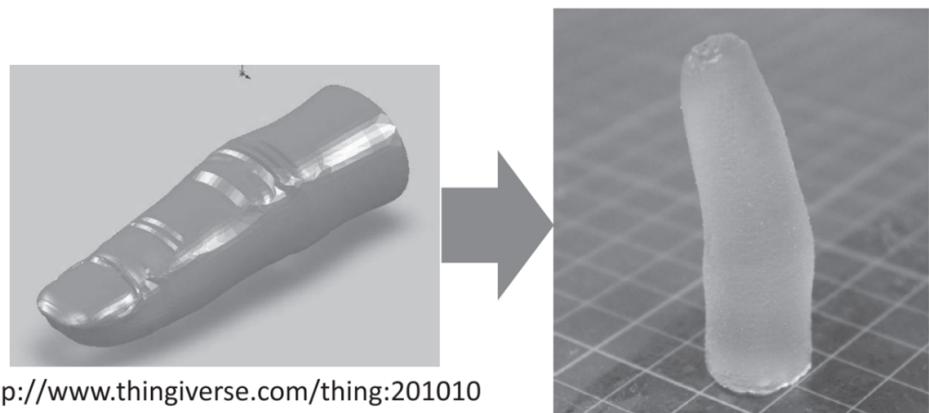


図 2.1 3D ゲルプリンターで作製した造形物

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。制作の過程と実際に制作されたものを図 2.2 に示す。

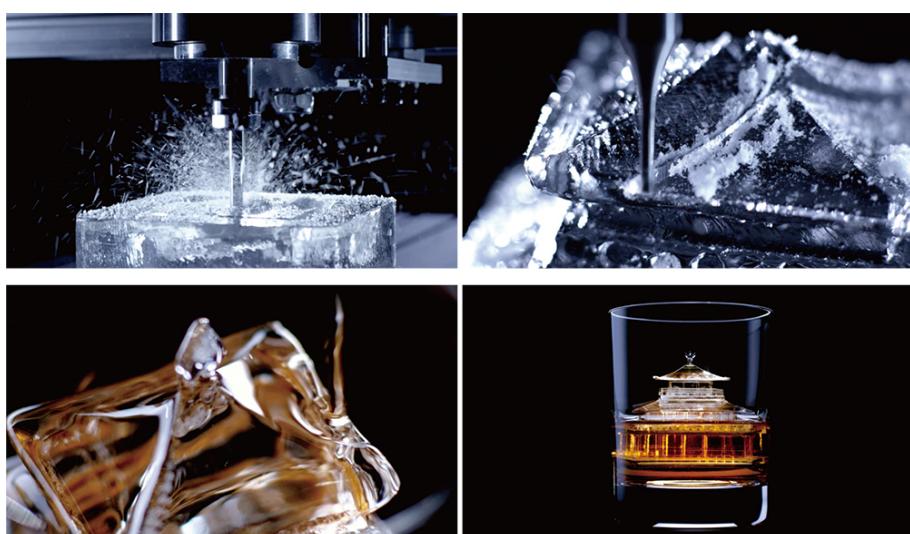


図 2.2 実際に掘削して作製した高精度の彫刻の例

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

2.4 A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive 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。完成した造形物を図 2.3 に示す。

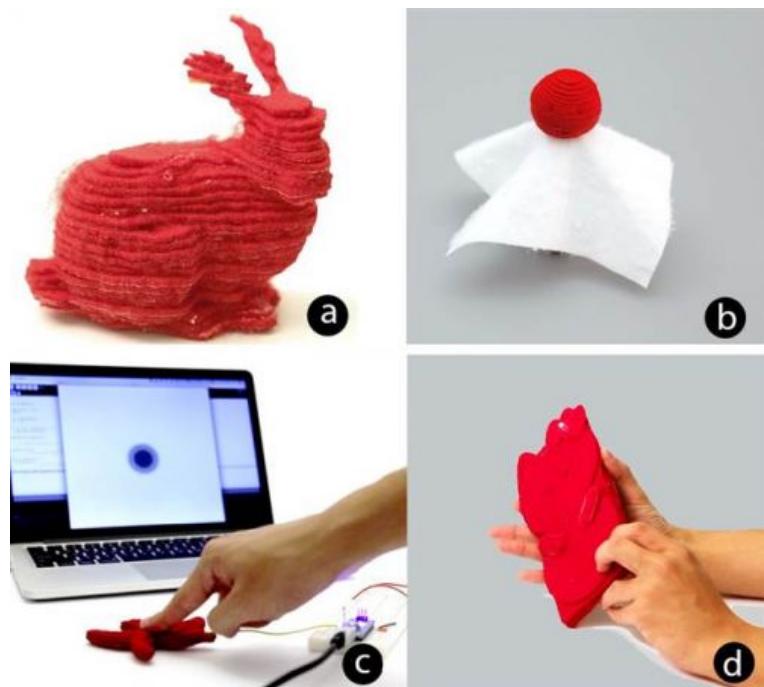


図 2.3 実際に印刷された布の造形物

[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]

制作されてガラスを図 2.6 に提示す。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 1 回の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。造形する仕組みを図 2.4、造形の過程を図 2.6 に示す。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ものになっている。

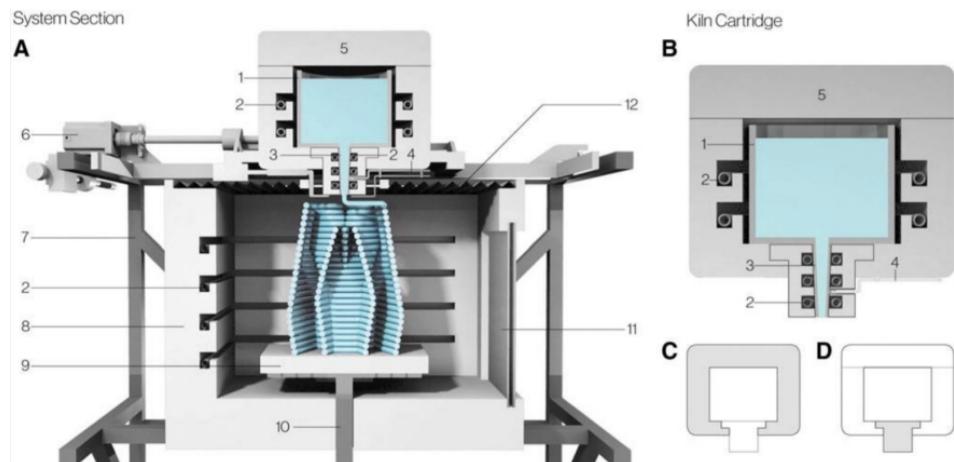


図 2.4 ガラス造形の仕組み



図 2.5 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/)



図 2.6 造形されたガラスの造形物

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

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。

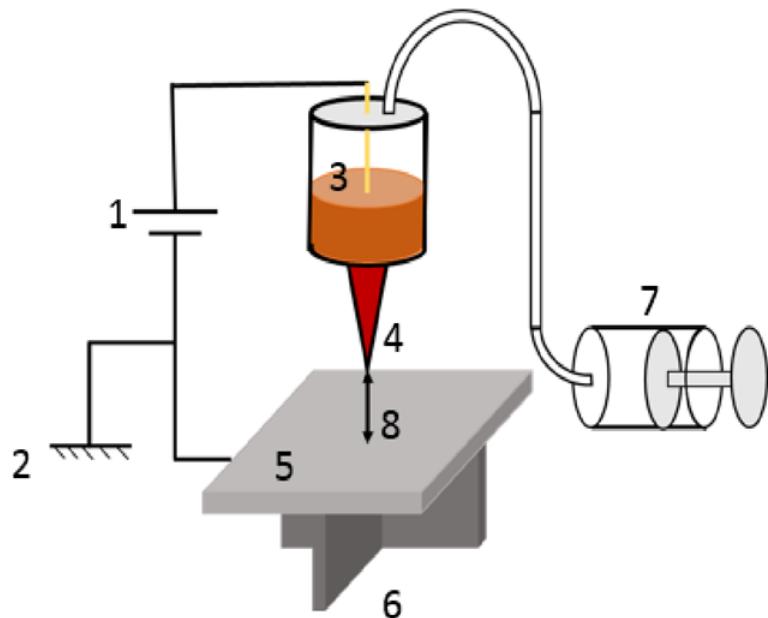


図 2.7 静電インクジェット式プリンターによるチョコレートプリントの仕組み

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。

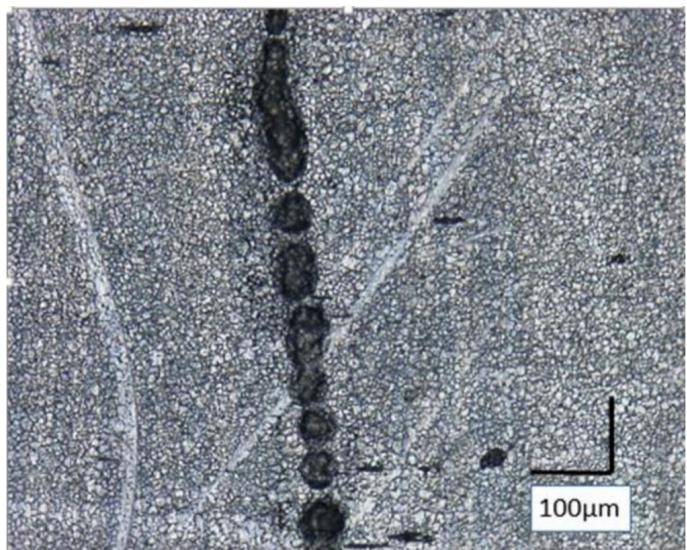


図 2.8 実際に吐出されたチョコレートを顕微鏡を用いて観察した様子

1 2.7 フルカラー 3D プリンター—2D 印刷から 3D 印刷へ—[6]

2 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
3 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
4 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
5 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
6 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。
7 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
8 行う。

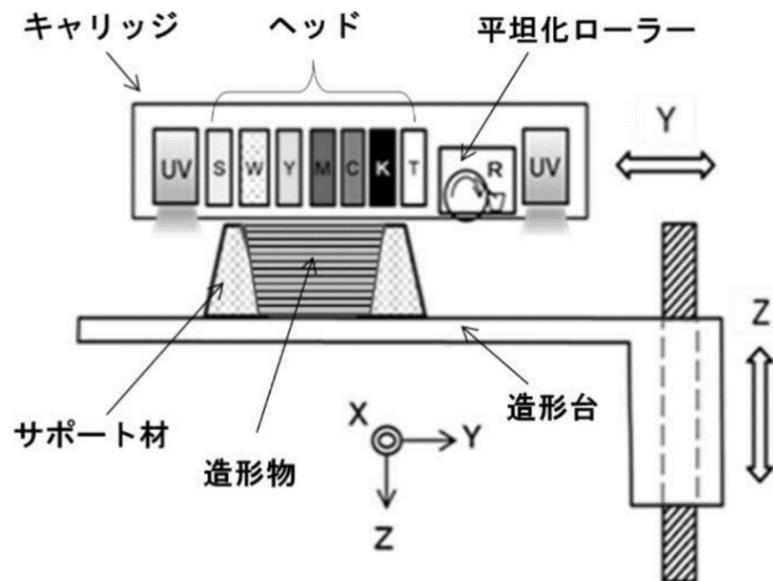


図 2.9 フルカラー 3D プリンターの概略図

1 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
2 いる。

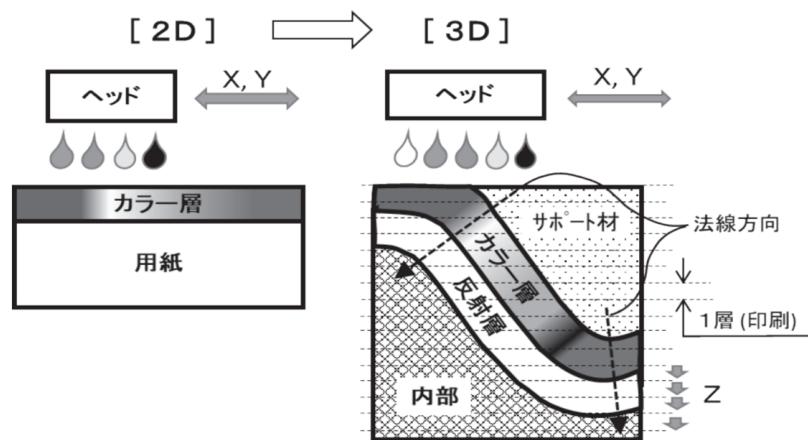


図 2.10 2D プリンターとフルカラー 3D プリンターの違い

3 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
4 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
5 して外形を保つ工夫をしている。

2.8 3D プリンタのセラミックスへの適用 [7]

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。主にセラミックス緻密体を作製する基礎検討に関する研究である。

今回このプリンタには、SLM方式を採用する。この方式では図2.11のように、薄く敷き詰めた粉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。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ているが、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。

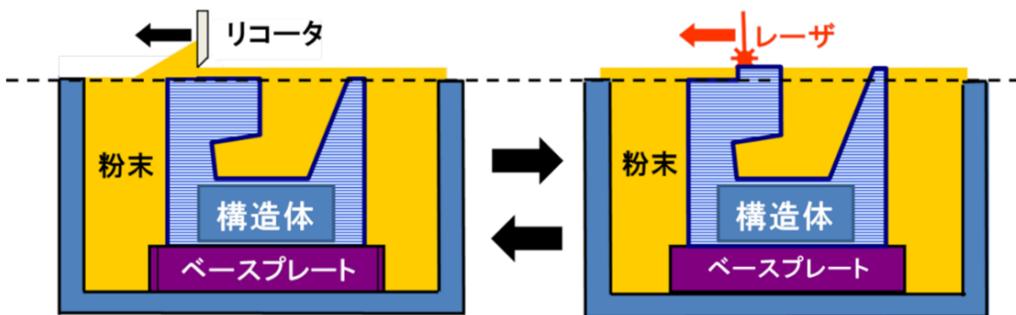


図2.11 SLM法を用いてセラミックスを印刷する際の様子の模式図

熱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。

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行った。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のそれぞれの特性に着目した

①原料セラミックスの選定・粒子径・粒子径分布
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
③造粒粉の作製・流動性・粒子径・かさ密度・1個粒子の密度

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、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。

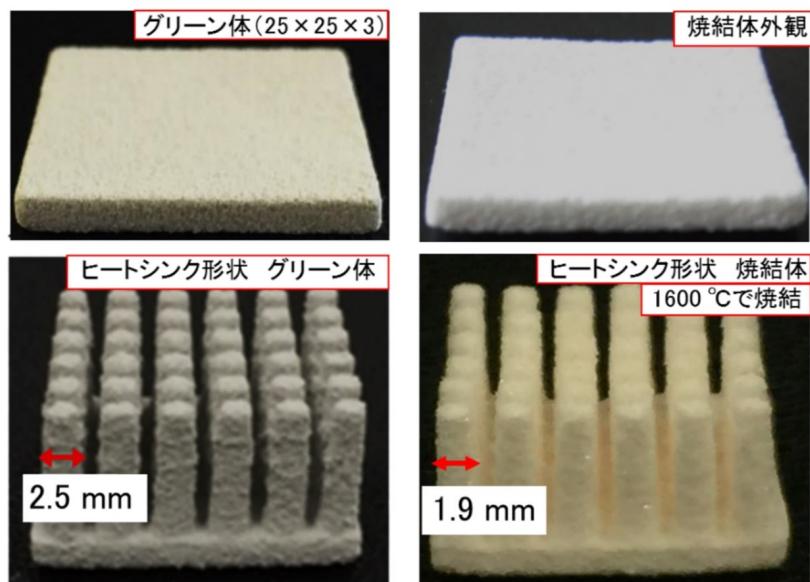


図2.12 SLM法を用いた印刷で完成した造形物

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図2.13のように、①搬送系、②液送系、③冷却系の、三つ

1 の機構から成り立っている。

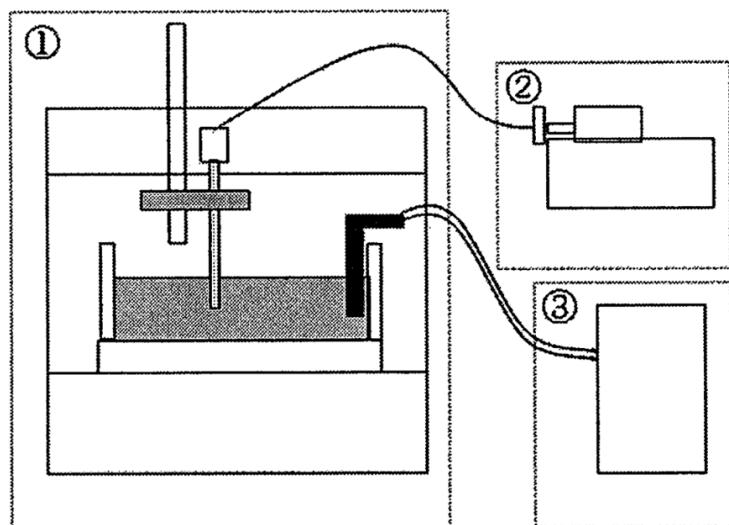


図 2.13 3D 食用ゲルジェットプリンタの模式図

2 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
3 造形することができる機械である。②は、ゲルの溶液をシリンジで①の方へ押し出す機械となっ
4 ている。③は、溶液を滴下する水槽を冷却する機械である。この装置を用いることで、アルギニ
5 ン酸ゲル(人工イクラ)の造形が可能となる。

6 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
7 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
8 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
9 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
10 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。

11 図 2.14 が寒天とゼラチンが固まった様子である。

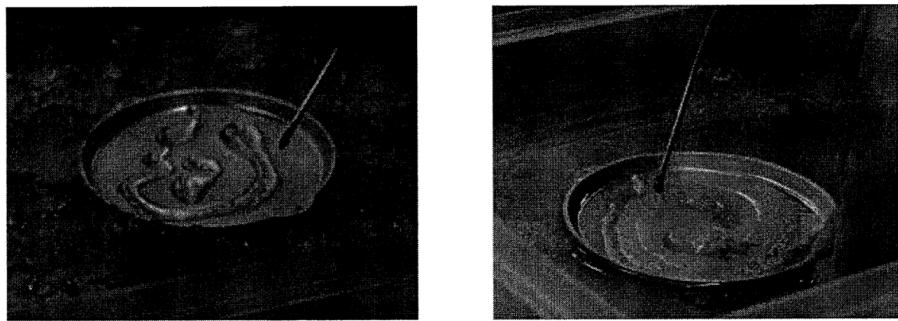


図 2.14 寒天とゼラチンの溶液をそれぞれアルミの皿に垂らしたときの様子

1 2.10 積彩 [9]

2 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 プリンティングの製
3 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」と呼び、また、繊細な織
4 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彩効果）を可能にし、こ
5 の技法を応用して「色瓶」というプロダクト製作している。実際に制作したものが図 2.15 である。



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 プリンターの図 2.16 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。

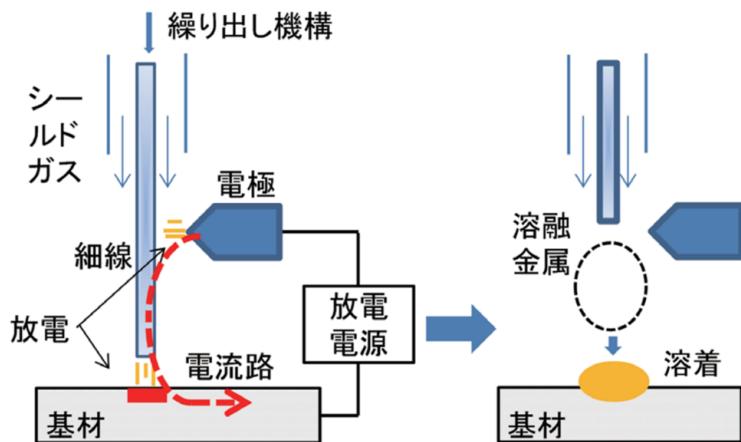


図 2.16 インクジェット型金属 3D プリンターの概略図

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図 2.17 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。

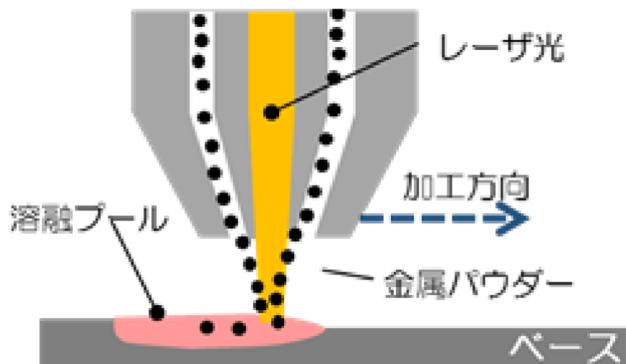


図 2.17 DED の模式図

- 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図 2.18 に示す。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。

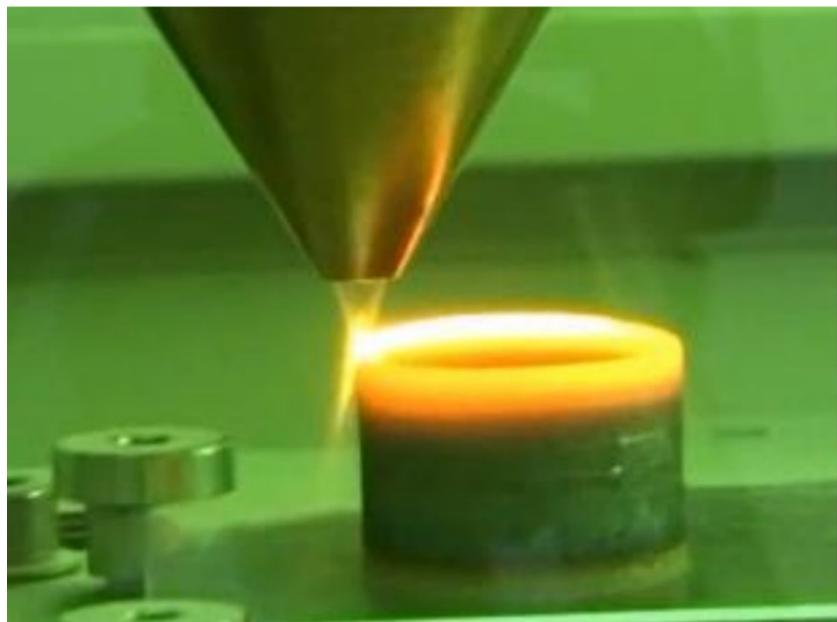


図 2.18 DED を用いて作製した造形物

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 °C の部屋で放置すれば塩水のラフトが溶け水の造形物だけが残る
6 仕組みになっている。この研究は精度を出すためにスピードを犠牲にしており普通のマグカップ
7 のサイズでも印刷に 50 時間近くかかる。そのため、造形中に溶けないように冷凍庫の中のような
8 環境の部屋で造形する必要がある。実際に造形したものを見ると図 2.19 に示す。



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 [13]

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。実際に制作したものを図 2.20 に
5 示す。フロンが断熱膨張する際に周囲の熱を奪うのを利用して水を冷やし、瞬時に氷を作る。エ
6 アーブラシを使い水とフロンガスを噴射し氷を作る機構を実装した。しかし、3 つの問題点があ
7 る。1 つ目は、コストが高いことである。3 つ目は、造形物がフロンガスを含み純粋な氷ではない
8 こと。3 つ目は、環境に対して悪影響があることである。



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。液体窒素を
- 3 使い造形したものを図 2.21 に示す。



図 2.21 液体窒素を用いて印刷した造形物

1 2.15 関連研究のまとめ

2 本研究では従来ではない、新たなマテリアルを使った造形をするため、プラスチックではない
3 マテリアルを使い造形物を印刷している研究を多く調べた。関連研究の多くは、常温で安定して
4 いる物質であり、加工が容易なものや温度変化によって性質が変わるもののがマテリアルとして最
5 適なものであることが分かった。また、3D プリンターに関して、近年新たなマテリアルの研究が
6 数多く行われているのと同時に、新しい造形方法の研究が進められていることが分かった。静電
7 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] などでは、静電気を使
8 い、超微細な造形を行おうことが出来る。水も僅かに電荷を帯びているため、この方法を利用
9 して超微細な氷の造形などもできるのではないかと考えた。このように、新しい造形方法が開発
10 されると、これまで造形に適していないと思われていたマテリアルも造形への可能性が生まれるた
11 め、新た造形方法を調査の必要性がある。

12 マテリアルが、プラスチックであるが積彩 [13] の美しさと造形方法は氷をマテリアルとした造
13 形と通じるものがある。美しさでは、氷をマテリアルとした造形では、溶け出することで、一度とし
14 て同じ瞬間が無く、その変化を楽しむという特徴がある。積彩、でも造形物の見る角度を変える
15 と色が変化し、七色のように見える。このように同じ瞬間が無く、変化し続けて見えるもに美し

1 さを感じる部分があるので考える。造形方法についても、複数の色のフィラメントをノズル内で
2 混ぜ、押し出し造形強いる。この技術を発展させれば、Robot-Assisted Rapid Prototyping for
3 Ice Structures [12] のような塩水と水の使い分けが 1 つのノズルできるのではと考える。このよ
4 うな既存の技術の発展についても新たなマテリアルでの造形を行う際の参考になった。

5 本研究は、一般の人でも扱いが可能かつ、一般の 3D プリンターと同程度の速度とある程度の
6 精度を両立した氷をマテリアルとした 3 D プリンターとして、造形精度としては Elsa:氷を素材
7 とした 3d プリンターの開発 [13] と Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Structures [12]
8 の中間のプリンターを目指し、一般の人でも扱いが可能なプリンターを開発した。

第 3 章

仮説と提案

2

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と水を少しづつたらし長時間かけて、
6 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しまうのが問題
7 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。しかし、過冷
8 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まうため、制
9 御が難しい。一般の人でも扱いが可能かつ、一般的な 3D プリンターと同程度の速度とある程度の
10 精度を両立した氷をマテリアルとした 3D プリンターの提案する。必要な要素としては以下のよ
11 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形
7 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り、
8 上記の問題の解決や精度を向上させることができるのでと考える。また、粘度を上げる手段と
9 して、いくつかの方法が考えられる。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
10 ものをマテリアルとして使用する方法だ。シャーベット状のものを使用する場合は、温度管理が
11 必要になるため、今回の機構では、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

3 4.1 マテリアルの検討

4 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
5 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
6 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
7 間に違いをもたらしているのではと考える。

8 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
9 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
10 用した、水と砂糖の割合は 1:3 のものを用意した。水との粘度の比較を図 4.1 に示す。

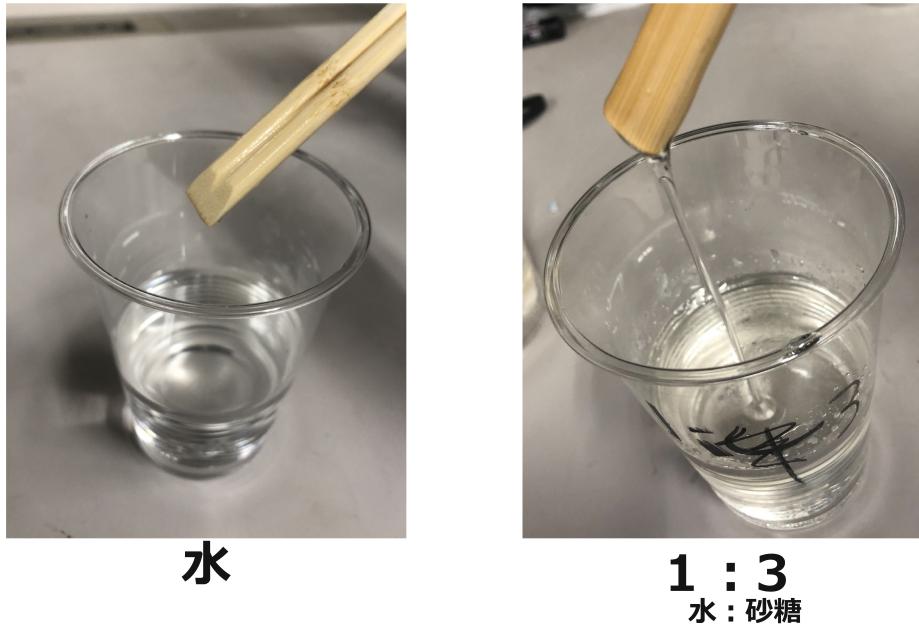


図 4.1 砂糖を添加した割合ごとの水

4.2 予備実験

- 2 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.
- 3 初めに, 3D プリンター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,
- 4 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 4.2 のようになって
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 とで, 冷やされた水が氷に変わる. 冷やされた水の温度は 0 度よりも低く, その上に水をたらす
- 9 と氷柱ができるように氷が積層される.

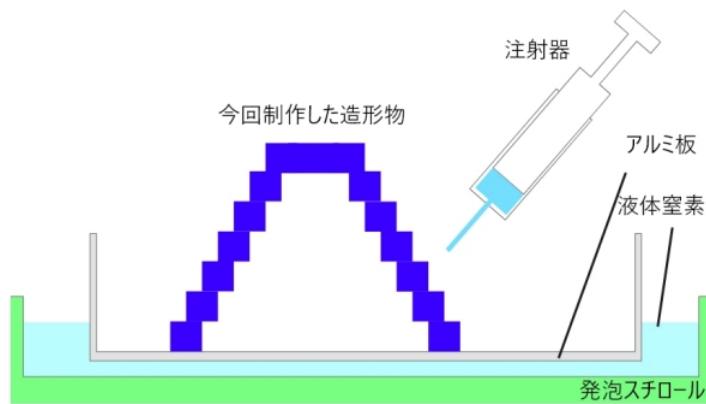


図 4.2 設計図と造形した形



図 4.3 制作した実際の装置

¹ 制作した装置は図 4.3 である。この装置を使い、水の粘度がどの程度が造形速度と造形精度に

1 影響するのか、水を使っての造形と粘度を上げた水で比較を行った。
2 造形物はオーバーハングの調査を行うため図 4.2 のように中を空洞になるように造形を行った。
3 水で造形を行った造形では、高さが 2.0mm 程のしづくがぼつぼつとある状態のものが出来上
4 がり、想定していた形とはほど遠いものになった。また、氷の造形物の上に積層しようと思って
5 も、氷が水をはじいてしまい、積層ができなかった。
6 水の粘度を上げて造形を行ったものが図 4.4 である。造形時間は約 5 分ほどで完成した。造形
7 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た。大きさは横幅約 3 セ
8 ンチ、高さ約 1.5 センチほどである。使用した水の量は、約 100ml ほどである。



図 4.4 造形過程と完成物

9 予備実験では、水の粘度がどの程度が造形速度と造形精度に影響するのか、調査を行った。結
10 果は、関連性があると考えられる。粘度を上げた水の方が、水のみに比べ造形精度が大きく上回っ
11 ていた。また、速度については、水のみの造形では積層ができず比べることができなかったが、粘
12 度のある水では、積層が可能でありオーバーハングも制作できることが確認できた。

4.3 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、プリンターが氷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。また、実際に制作した装置を図 4.5 図 4.6 に示す。

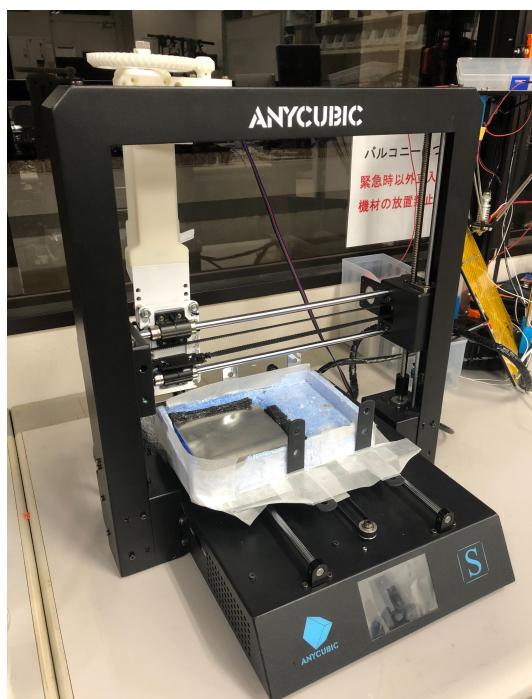


図 4.5 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（前）

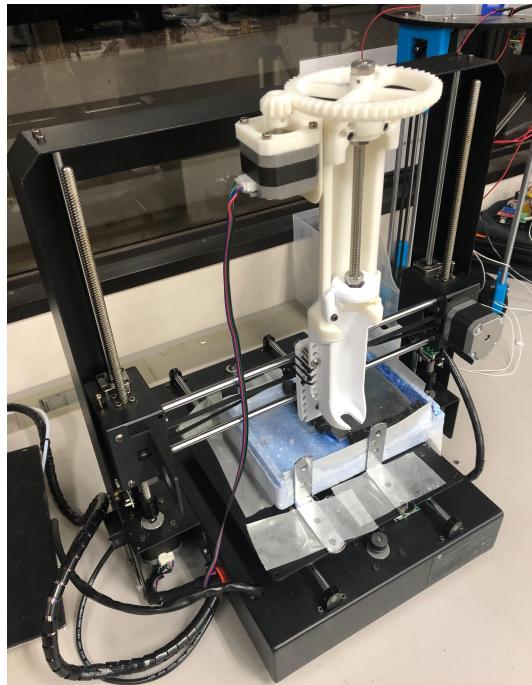


図 4.6 開発した氷をマテリアルとしたプリンターの全体図（後）

4.4 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。

4.5 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
た造形ができれば、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。

1 4.6 プリンターの制御

2 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
3 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
4 変更、モータードライバーへの対応、3 D プリンターは安全装置として、一定の温度以下で作動
5 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 3 D プリンターでは必要が無
6 いため、無効にさせた。

7 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
8 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
9 ように制御することができる。

10 4.7 シリンジの機構

11 実際に制作したシリンジを図 4.7 に示す。「60ml Syringe Extruder for Liquid Deposition
12 Modeling - LDM」の機構を一部改造して制作した [14]。シリンジを押し出して水を供給するため
13 に、既存のエクストルーダー用のモーターを利用している。シリンジを押し出すためにモーター
14 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
15 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
16 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
17 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。
18 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
19 なかったため、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。

4.8 ノズルの機構

実際に制作したノズルを図 4.8 に示す。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開けた。

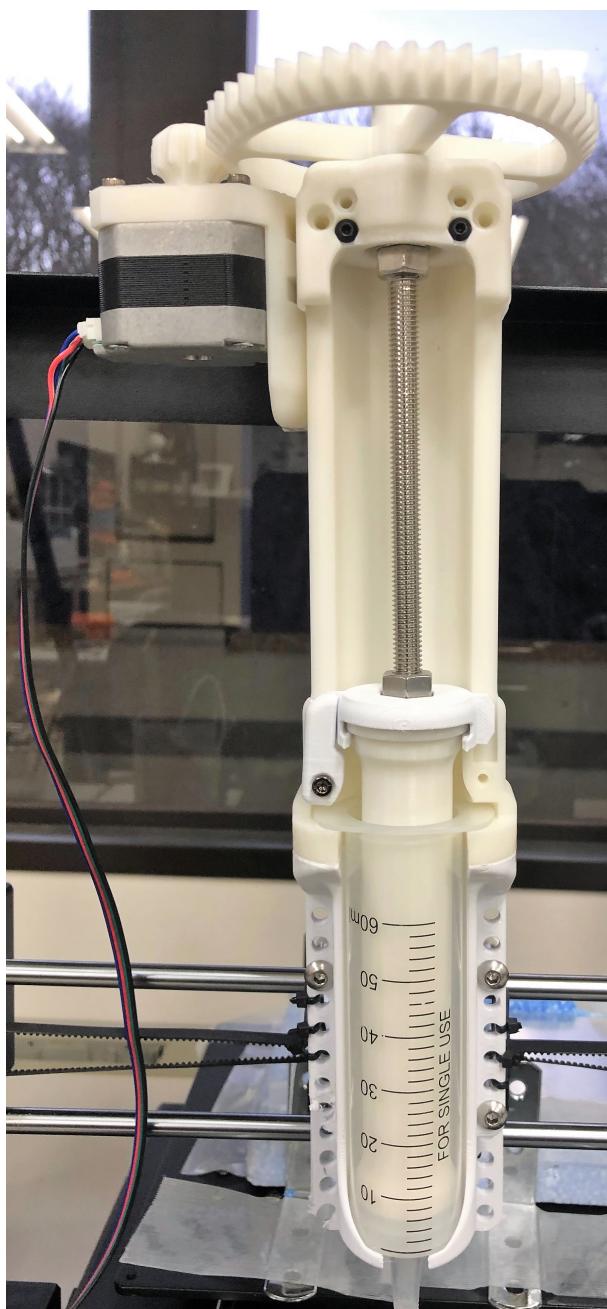


図 4.7 シリンジの機構

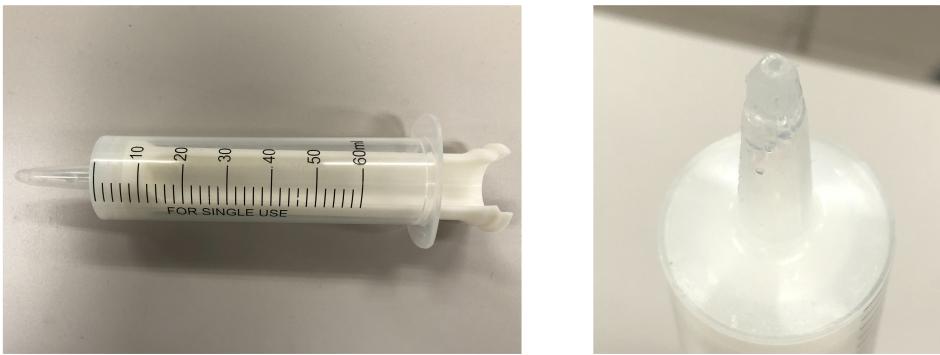


図 4.8 ノズル

1 4.9 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
4 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
5 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
6 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
7 を行った。完成したハードは図 4.9 のようになっている。

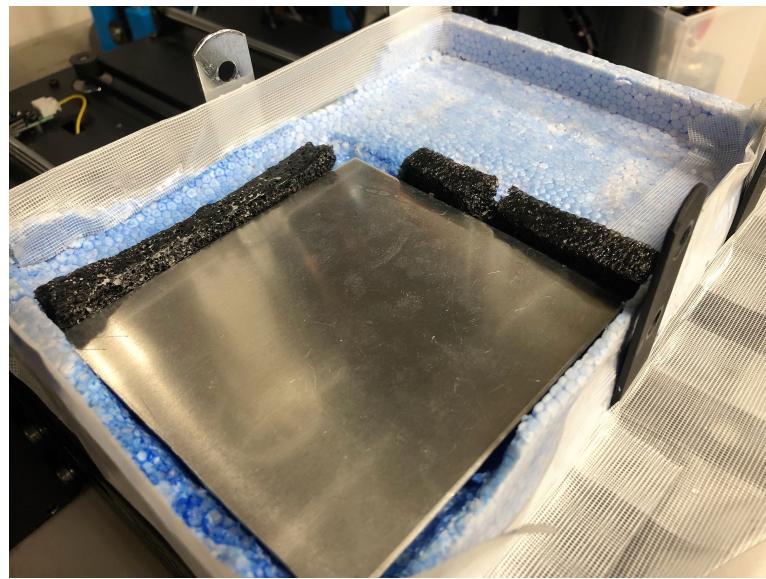


図 4.9 液体窒素造形用ベッド

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になる。

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.

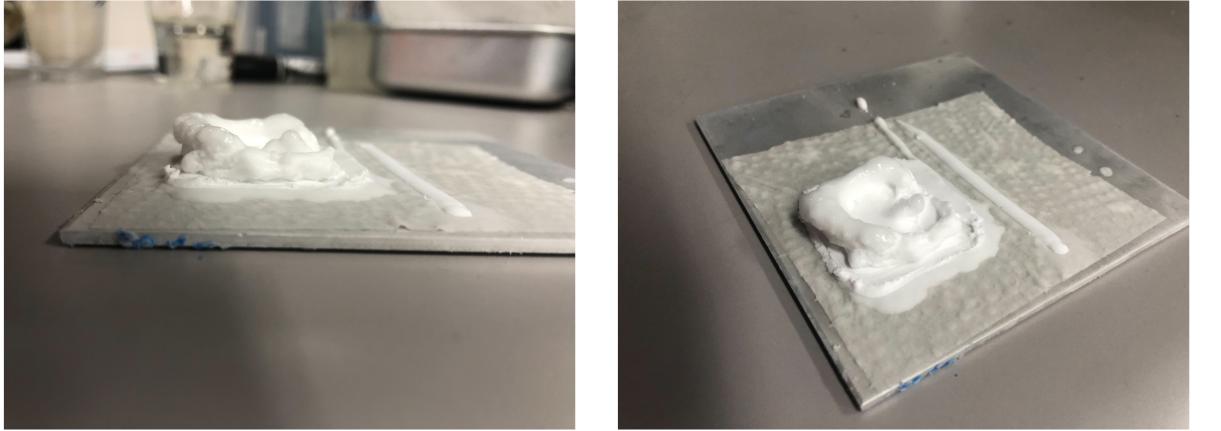


図 5.1 押し出し量が多すぎた氷の造形物

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

結果と考察

3 今回の実験では、氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発と氷のマテリアルとした造形を
4 作成する際、純粋な水ではなく、砂糖を混ぜ粘性を持たせた液体を用いて造形を行った方がより
5 精度の高い造形がでいるのではないかと仮説をたて検証を行った。実験では、純粋な水を使用し
6 た場合と水と砂糖を 1 : 3 で混ぜた液体での場合で比較を行った。水と砂糖を混ぜた液体の方が
7 造形精度が高く、積層もスムーズに行われた。よって、氷をマテリアルとした 3D プリンターでの
8 造形を行う際、水と砂糖を混ぜた液体の方が、適しているということが分かった。

9 また、氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発において、使用したものは既存の 3D プリン
10 ターの部品やどこでも手に入れやすいものを多く使用した。特に、一般で広く使われているスラ
11 イソーソフト Ultimaker Cura を利用して操作できるようにしたことで、3D プリンターを扱える
12 もの方なら、だれでも操作可能なものになっている。

13 よって、既存で開発されている氷をマテリアルとした 3D プリンターよりも比べ、一般の人でも
14 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
15 アルとした 3D プリンターの開発ができたと考える。

16 しかし、今回開発した氷をマテリアルとした 3D プリンターにもいくつか課題が残る。1 つ目が
17 予備実験において、手で試した際の精度を自動かさせた際に再現できていないこと。2 つ目一度に
18 造形できる量に制限があること。この二つを解決できたらと考える。1 つ目の予備実験において、
19 手で試した際の精度を自動かさせた際に再現できていないこととくに、オーバーハングに関して
20 は、いくつか原因が考えられる。手で試した際に使用した、液体の温度が 50 °C 近くと温かかった
21 ものに対して、実験で使用したものは常温だった。液体の温度がある程度高温の際、既に造形さ

1 れている氷を一部溶かして積層される。一度解けてから、再度氷になっているため、層ごとの結
2 びつきが強くなる。これと、液体の粘度が加わることにより、予備実験ではオーバーハングが
3 可能であったと考える。そのため、今後押し出す液体の温度についての検証が必要であると考え
4 る。また、今回ノズルの大きさ 1.0mm で行ったが、ほかの大きさでどのような違いが現れるの
5 か、最適なノズルのサイズを探す必要もあると考える。

6 2つ目の一度に造形ができる量が制限があることに関しては、今回液体を押し出す機構とノズル
7 の距離を粘度を持つ流体が通るため、抵抗が大きくなると予想されたため、シリンダーを採用し
8 た。今後ポンプを利用した、液体の押し出し機構などを検討する必要がある。

1

第 7 章

2

まとめ

3 近年 3D プリンターの低価格化が進んだことで一般にも普及が進んでいる。これにより、これ
4 まで生産者と消費者は別の者であったが、生産者と消費者が同一の存在となるなりつつあるのだ。
5 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
6 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。3D プリ
7 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
8 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
9 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
10 だと考える。その中でも、私は氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発を行おうと考えた。

11 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、多くの人々に親しまれて様々
12 な作品が作られている。しかし、氷の作品は作るのに時間がかかり、彫刻の技術や設備が必要と
13 なるため、誰でも簡単に触れ合えるものではない。また、現在開発されている氷をマテリアルと
14 した 3D プリンターはマグカップサイズのものを作るのに 50 時間ほどかかるもなど特殊な環境や
15 知識が必要なものしかない。そのため、一般の人でも扱いが可能かつ、一般的の 3D プリンターと同
16 程度の速度とある程度の精度を両立した氷をマテリアルとした 3D プリンターの提案する。

17 一般の人でも扱いが可能かつ、一般的の 3D プリンターと同程度の速度とある程度の精度を両立
18 した氷をマテリアルとした 3D プリンターを開発するにあたり、純粋な水を積層すると、水の粘度
19 が低いため、固まる前に広がってしまう。そのため造形精度が悪く、オーバーハングなども造形
20 することが難しい。よって、水の粘度を上げることにより、上記の問題の解決や精度を向上させ
21 することができるのではと考えた。また、他の研究では、特殊な機材を使用し、装置が高価になり

1 がちである。日本各地で手に入り、価格も 1 リットルあたり 300 円と安価であるため、液体窒素
2 を冷却材として使用する。最後に一般の人でも扱えるように、世界中で使用されている 3D プ
3 リントおよびスライ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
4 考えると考え、氷をマテリアルとした 3D プリンターの開発を行った。

5 実験では、純粋な水を使用した場合と水と砂糖を 1:3 で混ぜた液体での場合で比較を行った。
6 水単体と比べ水と砂糖を混ぜた液体の方が造形精度が高く、積層もスムーズに行われた。氷を
7 マテリアルとした 3D プリンターでの造形を行う際、水と砂糖を混ぜた液体の方が、適していると
8 いうことが分かった。また、開発において使用したものは既存の 3D プリンターの部品やどこでも
9 手に入れやすいものを多く使用した。特に、一般で広く使われているスライサーソフト Ultimaker
10 Cura を利用して造形できるため、3D プリンターを扱えるものなら、少ない学習コストで使用
11 することができる。よって、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
12 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 プリンターの開発ができたと考える。

13 しかし、今回開発した氷をマテリアルとした 3D プリンターにもいくつか課題が残る。1 つ目が
14 予備実験において、手で試した際の精度を自動かさせた際に再現できていないこと。2 つ目一度に
15 造形できる量に制限があること。この二つを解決できたらと考える。

16 今回の研究開発では、氷をマテリアルとした造形物をある程度の速度と精度で制作を行える機
17 構を開発し、Ultimaker Cura で操作可能なプログラムを組むことで既存の氷をマテリアルとし
18 た 3D プリンターに比べ、一般の人でも扱いが可能な 3D プリンターになった水に粘性を持たせる
19 ことで、一般的の 3D プリンターと同程度の速度とある程度の精度を両立した氷をマテリアルとし
20 た 3D プリンターに大きく近づくことができた。しかし、現状のプリンターではまだ、オーバーハ
21 ングが不十分なこと造形できる量に制限があることなどいくつか問題を抱えている。また、ノズ
22 ルのサイズの調整や水の温度の調整、粘度の調整などまだまだ、ある程度の速度と精度をもった
23 3D プリンターの開発において、検証可能な要素が残されている。一般の人が気軽に氷の造形を樂
24 しみ、様々な氷の造形物を創造するには、上記の要素の検証を行い、さらなる精度と速度の向上

₁ が必要となる。

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. <https://www.codeaward.jp/awards/2014/>
5 work04.html.
- 6 [3] Huaishu Peng, Jennifer Mankoff, Scott E. Hudson, and James McCann. A layered fabric
7 3d printer for soft interactive objects. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference*
8 on *Human Factors in Computing Systems*, Vol. 2, pp. 1789–1798, 2015.
- 9 [4] Michael Stern, Giorgia Franchin, Markus Kayser, John Klein, Chikara Inamura, Shreya-
10 Dave, James C Weaver, Peter Houk, Paolo Colombo, Maria Yang, and Neri Oxman.
11 Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manu-
12 facturing*, Vol. 2, No. 3, pp. 92–105, 2015.
- 13 [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
14 料の高精度プリント. ライフサポート学会, 2016.
- 15 [6] 八角邦夫. フルカラー 3d プリンター. 科学と教育, 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] 鈴木祐哉, 高岸賢輔, 梅津信二郎. 3d 食用ゲルジェットプリンタによる食品創製. 機械材料・
19 材料加工技術講演会講演論文集, Vol. 20, No. 12-19, 2012.
- 20 [9] 積彩. 積彩. <https://sekisai.com/Grasspiral>.
- 21 [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
22 礎研究. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 25, No. 2, pp. 77–79, 2018.

- 1 [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
2 レクトロニクスシンポジウム論文集, Vol. 25, pp. 271–274, 2018.
- 3 [12] E. Barnett, J. Angeles, D. Pasini, and P.Sijpkes. Robot-assisted rapid proto typing for
4 ice structures. Vol. 25, pp. 146–151, 2009.
- 5 [13] 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
6 タルコンテンツクリエーション (DCC) , Vol. 2017, No. DCC-17, pp. 1–7, 2017.
- 7 [14] piuLAB. 60ml syringe extruder for liquid deposition modeling - ldm. 2014. <https://www.thingiverse.com/thing:482873>.