

研究論文

Elsa：氷を素材とした3Dプリンタの開発

藤田 大樹^{1,a)} 中野 亜希人² 羽田 久一^{2,b)}

受付日 2018年7月14日, 採録日 2018年11月30日

概要: 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わけではない。本稿では、氷の造形物を素早く印刷するための新しい3Dプリンタの手法を提案する。水とフロンガスを個別に噴霧する2つのエアブラシを3Dプリンタに組み込むことにより、既存の3Dプリンタと同じ操作で氷の造形物を出力できる。この氷プリンタを使うことで、誰でも高速に氷の造形物を作ることが可能となる。本システムの評価として、氷のラインをパラメータを変えながら印刷し関係性を調査した。この結果から、氷の造形物を印刷するのに適したパラメータを発見した。また、既存のGCodeを氷プリンタ用のGCodeに変換するソフトウェアを実装した。これにより、ユーザは特別な知識がなくても氷プリンタ用の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プリンタに新しい表現を与える。

キーワード: ラピッドプロトタイピング, 3Dプリンタ, 氷

Elsa: Development of 3D Printer Using Ice

HIROKI FUJITA^{1,a)} AKITO NAKANO² HISAKAZU HADA^{2,b)}

Received: July 14, 2018, Accepted: November 30, 2018

Abstract: In this paper, we propose a 3D printer that uses ice as a material. Although it is common to make ice objects by sculpture, it is not easy for anyone to easily produce due to problems such as skills and procurement of materials. In this paper, we propose a new 3D printing method to print object rapidly with ice. Our system consists two airbrushes that spray water and Freon gas individually. We install this mechanism into a delta type common 3D printer. It is possible to create ice objects with same as operation. We investigated a relationship between printing parameters and printed line shape ice objects. From this result, we found suitable parameter sets to create ice object. We also implement software to convert GCode from the original to that for our system. This software support user to create GCode for ice printer without knowledges. Ice objects are temporary, dissolve and completely disappear. This characteristic gives new expressions to 3D printing systems.

Keywords: rapid prototyping, 3D printing, ice

1. はじめに

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。氷はその美しさと儚さから人々に親しまれ

ており、様々な作品が作られている。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に限られているのが現状である。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。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、我々は3Dプリンタ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。近年では熱造形や光造形などの安価な3Dプリンタが登場し、自分でモデリングしたものを簡単に作り出すことができるようになってきた。3Dプリンタ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きるようになる。現在の氷プリンタでは、造形に時

¹ 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科
Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences,
Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo 192-0982,
Japan

² 東京工科大学メディア学部
School of Media Science, Tokyo University of Technology,
Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan

a) g3117023e5@edu.teu.ac.jp

b) hadahskz@stf.teu.ac.jp

間がかかるもの、素早く造形できても精度が悪いものしかない。我々の目指す氷プリンタは、高速で造形し造形の工程も見て楽しめる氷の造形物を印刷できるプリンタである。それらの間を埋めるように素早くある程度設計どおりの造形物を印刷できる氷プリンタ（以降 Elsa）の開発をする。

2. Elsa の提案

氷の彫刻はアート作品や料理の飾りとしてよく用いられる。しかし、氷の造形物を作るには氷の塊やノミなどの機材や技術が必要で誰でも簡単にできるものではない。氷の彫刻を CNC で掘削する試み [1] があるが、CNC や削るための氷の塊のコストなどから一般家庭までには普及しないと思われる。

現在普及している 3D プリンタを使った造形は 3 種類ある。レーザ焼結 (SLS) は、粉末にレーザを当て時間をかけて高精細で高硬度のオブジェクトを出力できる 3D プリンタである。材料に粉末を使い不活性ガス用の設備が必要になることから、一般家庭では使いにくい。

熱溶解積層法 (FDM) は、ある程度の精度と速度を有し、低コストで一般家庭に最も普及している。プラスチックの材料を細いノズルから押し出して層を積み上げ造形物を作る。

光造形 (SLA) は、紫外線で硬化する液体を使用し積層していく。層を作るために毎回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代わりに精度の高い造形ができる。SLA は材料の液体が高価で造形後の掃除に手間がかかり、完成した造形物の周りが固まるまで紫外線に当てておく必要がある。

現在の高精度な氷造形 [2] は、20 mm/h のスピードで高さ 0.1 mm の積層をしていく。この速度で氷の造形物を作るには 0°C 以下の部屋を用意し、造形中はつねに温度を下げておく必要がある。また、CNC [1] を使った掘削も時間がかかり特殊な環境が必要になる。

造形に時間がかかると精度の高い造形物を出すことができるが、特殊な機材が必要になり氷の造形物をすぐに楽しむことができない。趣味で 3D プリンタを使う人にとっては、ある程度の精度を保ち素早く造形できる方が有意義だと考える。

そこで我々は、常温の室内で通常の 3D プリンタと同じような速度で造形できる Elsa を提案する。Elsa が満たすべき要件は以下の 2 つである。1. 常温の部屋で高速かつある程度の精度を持った氷の造形物を作る。2. 現在普及している 3D プリンタと同じ学習コストで使える。

3D プリンタを使うには、モデリングの知識やソフトウェアの知識が最低でも必要になってくる。しかし、それらは特別難しいものではなく、初めて触る人でも少ない学習で使うことができる。Elsa も同様に既存のプリンタを使うのと同程度の学習で使えるため、初心者の人でも簡単に使う

ことができる。

現状では、ヘッドパーツにエアブラシを 2 本搭載し、それぞれをフロンガスの缶とエアコンプレッサにつないでいる。水を瞬時に氷にするためには、水の粒をなるべく細かくする必要がある、エアブラシは最も適しているため使用している。ヘッドパーツをエアブラシを使わない一体型のもので製作できればさらにコストを抑えることができるが、この造形法をとるとオーバハングのある造形物を作ることができないという問題がある。

Elsa で使用している機材のコストは、エアブラシやエアコンプレッサとプリンタ本体を合わせて 8 万円程度になっている。また、フロンガスを使い造形しているためランニングコストは高くなってしまふ。デルタ型プリンタのヘッドパーツを交換すれば氷の造形をすることができるため、簡単な分解と組み立てをするだけで実装することができる。一般の人にも簡単に組み立てることができるため、需要があれば一般家庭に普及させることができる。

氷を好きな形にしようとしたときは、型を用意するやり方や、削るなどといった手法がある。型を用意すれば簡単に量産できるが、サイズを変えるなど、それ以外のものを作ることができない。手で削る手法は難易度が高く、文字などといった細く複雑な形状を作るのはとても困難である。本研究のプリンタは、幾何学模様やレタリングといった単純な形状のモデルなら印刷することが可能であり、難しい技術を使わずに様々な形の氷を作ることができる。

3. 関連研究

新しい材料を使い、今までの 3D プリンタでは表現できなかった物を作ることを可能にしている研究を調査した。

現在主流になっている熱溶解積層法 (FDM) は、プラスチックを使って造形するもので、コストが安く扱いやすい。しかし、プラスチックの造形物しか作ることができない。今回調査した論文では、プラスチック以外の材料を使った造形を可能にしている。新しい材料の造形物は、どれもユニークな特性を持っており利用範囲を広げることができる。柔らかい造形物を作ることのできるプリンタ [3], [4] やチョコレートなどの食べ物プリンタ [5], [6], ガラス [7], セラミック [8], [9], [10] や金属 [11] などのプリンタが作られている。

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 [1]。多軸の CNC を使い掘削するこ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面から考えると難しい。

3Doodler [12] はペン型のデバイスで、熱造形式 3D プリンタのヘッドを手で持ってフリーハンドで材料を押し出して、造形していくため直感的に自分のアイデアをフリーハンドで形にしていくことができる。モデリングの

手間を省き、直感的な造形を可能にしている。ハンディータイプの氷造形 [13] は、瞬時に氷を出し手を動かして造形する。この研究では、ワイヤフレームを組むことでオブジェクトの大まかなサイズ感を表現し、溶けて消えるためラピッドプロトタイピングの際に出る大量のゴミを削減することができ、モデリングの知識がなくても即座に造形を始めることができるメリットがある。しかし、正確さや強度のある造形物を作るのは難しい。

水を FDM のように積み上げていく造形法をとっている研究として文献 [2] がある。この研究では、冷やした水を 1 滴ずつ垂らしながら造形する。造形のスピードはかなり遅く 20 mm/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使用し、オーバハングのある造形も可能になっている。過去にも水を垂らしながら造形する研究があり、 -20°C の水を液体の状態に保つため急速冷凍を防止する研究を参考にしている [14]。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環境の部屋で造形する必要がある。

我々の研究では、FDM のような速度と精度を持った室温でも氷の造形物を作る 3D プリンタを開発した。

4. Elsa の実装

3D プリンタに実装した、氷を作るための機構について述べる。氷を素早く作るためには、過冷却水を使うのが最も一般的な手法ではあるが、準備に時間がかかり少しの衝撃で凍り始めてしまうため制御が難しい。過冷却水を使わずに氷を瞬時に作るために我々は液化した代替フロン (HFC134a) を使用した。フロンガスの入った缶を逆さにすることで、液状のフロンを出すことができる。フロンが断熱膨張する際に奪う熱で水を冷やし、瞬時に氷を作ることができる。液体のフロンガスと霧状の水を同時に板に当たるように吹き付けると、氷が付着する。このことから、エア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。

Elsa の全体は図 1-1 のようになっている。デルタ型の 3D プリンタのヘッドパーツを一新し氷造形が可能になるように改造した。

4.1 氷造形のための機構

フロンガスを使って氷を作るためには水を霧状に噴射する必要がある。安定して氷を効率的に作るために、水用のエアブラシ (タミヤ 74519) とフロン用のエアブラシ (タミヤバジャー 350II) を利用する。2つのエアブラシは、シングルアクションで弁の開閉率をニードルチャックネジで調節しボタンを押すだけで噴射される。

それぞれの噴射を制御するサーボモータを固定できるパーツを 3D プリンタで作成した。エアブラシの塗料を

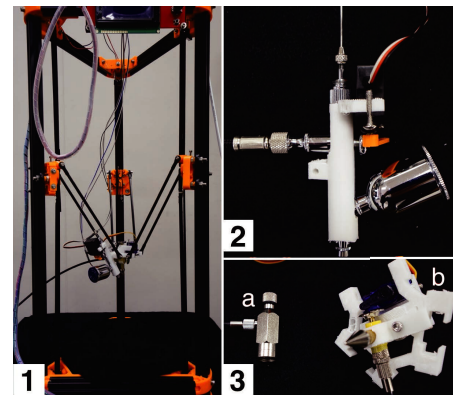


図 1 全体図とヘッドパーツの構成

Fig. 1 Overall view of 3D printer and composition of head parts.

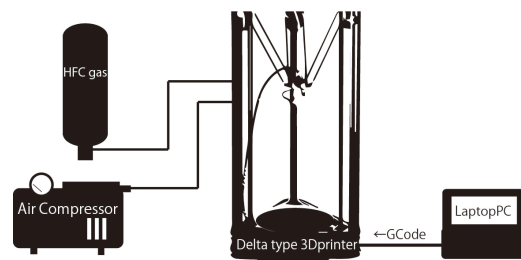


図 2 システムの全体図

Fig. 2 Overview of system.

入れる部分に水を入れることで、一定の霧状の水を持続して噴射させることができ、弁の開閉だけで噴射の制御ができる。フロンガスを噴射するエアブラシはコンプレッサにつなぐ部分にフロンガスのチューブを付け、噴射の制御をする。

図 2 にシステムの全体図を示す。ガスボンベ (HFCgas) とエアコンプレッサはそれぞれエアブラシにつながっている。PC から GCode をプリンタに送ることで造形することができる。GCode とは 3D プリントする際に必要なファイルで、プリントする際はモデリングしたデータを slicer ソフトを使い、変換して使用する。

図 3 のように 2つのエアブラシを使い、それぞれのエアブラシから水とフロンガスを別々に噴射する。フロンガスの入ったボンベは逆さにして液化ガスをエアブラシまで送る。エアブラシは、押すだけで噴射できるタイプの物を使用しサーボモータで噴射の制御をできるようにした。エアブラシの取り付けは、図 3 のとおりである。フロンガスを噴射するエアブラシは地面に対して垂直になるようにし、水を噴射するエアブラシは、角度をつけ水がフロンガスと混ざり合うように固定する。フロンガスの噴射の圧力が強いので、水を垂直に噴射すると飛ばされて別の場所に氷ができてしまううえに、いびつな形になってしまう。液化フロンガスが断熱膨張したときの気化熱で水が氷になるため、ベッドの上に氷ができる。

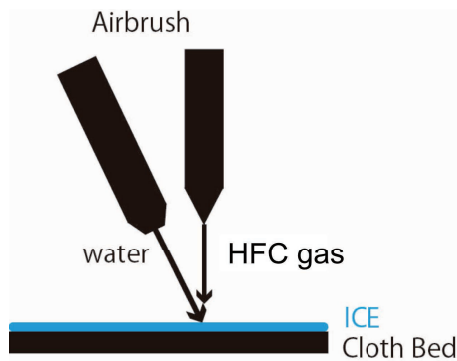


図 3 氷造形のための機構
Fig. 3 Mechanism for ice printing.

4.2 水用のエアブラシ

水用のエアブラシ図 1-2 は、コンプレッサにつながっており塗料を入れる部分に水を入れてセットしておく。フロンガス用のエアブラシの横から交差するように水を噴射し、フロンガスの気化熱で水が氷に変化する。エアブラシから水を噴射すると水が細かい霧状になり、効率的に凍らせることができる。水を霧状にすることで、均一で歪みのないラインを作ることができる。フロンガスと水はベッドの上で混ざるように、水用のエアブラシの取り付け角を調整する。水用エアブラシは取り付けの際に、アームの間にくるように配置され、固定の際はネジでアームと一緒に固定する。

4.3 フロンガス用のエアブラシ

フロンガスは、冷媒として利用されることが多く人体に無害で沸点が -30°C のとても蒸発しやすい物質である。ガスボンベ内に入っているフロンガスは高圧で液体になっている。液体が蒸発する際に生じる気化熱は、冷却効率が高い。逆さにセットしたボンベをフロンガス用のエアブラシに接続し、ノズルから液化ガスを噴射する。フロンガス用のエアブラシは地面に対して垂直になるようにセットする。我々は、フロンガス用のエアブラシとサーボモータを設置できるように、CAD で新しいヘッドパーツを設計した。設計した新しいパーツを 3D プリンタで造形し、組み立てると図 1-3 のようになる。図 1-3 の a はボンベからフロンガスを供給するためのもので、b についたエアブラシをサーボモータで押すことで噴射できるようになっている。このパーツはデルタ型プリンタのヘッドとして、3つのアームに固定できるようになっている。

4.4 ベッドに適切な素材の調査

氷で 3D プリンティングする際に、通常のベッドでは氷が溶けてしまうため、専用のベッドを使う必要がある。我々は、ガラスと布の 2 種類をベッドとして使い実験を行った。

ガラスベッドは、常温の状態と冷却する状態の 2 パターンの実験を行った。ガラスベッドが常温のときは、氷ができても噴射時の風圧で氷が飛ばされてしまい造形できない。冷却したガラスベッドは、氷が定着し安定し風圧で飛ばされることもなく安定して造形することができた。しかし、造形するたびに冷凍庫でガラスベッドを冷却する必要がある。また、ガラスに着いた造形物が剥がれない問題もある。冷却したガラスと造形物が固着し、剥がそうとすると造形物が壊れてしまう。布を使ったベッドでは、フェルト生地を使う。布ベッドは、氷を定着させ常温でも氷が溶けずに残っている状態を維持することができた。造形物を剥がす際は、綺麗に剥がすことができ造形物が壊れることはなかった。以上のことから我々は、布を使ったベッドを採用した。布ベッドは冷却する必要がなく、常温でも使えるため造形した後すぐにセットし直し次の造形を始めることができる。

4.5 Elsa の制御

氷の 3D プリンタを制御するにあたり、Repetier-Host Mac 1.0.2 [15] という 3D プリンタの制御用アプリケーションと Marlin [16] というファームウェアを使用した。プリンタは、RAMPS1.4 プリンタ制御ボード [17] を駆動する Arduino Mega 2560 マイクロコントローラで制御されている。エアブラシの噴射をサーボモータで制御するために、ファームウェアの変更を行った。2つのエアブラシを同時に噴射するために、2つのサーボモータを GCode で制御できるようにした。3D モデルの slicer ソフトは、Slic3r v1.1.7 [18] を使いモデルを GCode に変換する。GCode が Repetier-Host からプリンタに送られ、造形が行われる。

4.6 GCode の最適化

Slic3r で出力された GCode は通常の 3D プリンタ用のものになっている。Elsa で使う場合は、GCode 内に記述された温度の設定の消去、エアブラシの噴射を制御するコマンドの追記をする必要がある。既存の GCode に手動でこれらの変更を行うことは不可能ではないが、大変な手間である。我々は Python を使い、GCode を Elsa で使用するための変換ソフトを開発した。

Elsa 用の GCode を生成するにあたって、Slic3r のパラメータを Elsa 用に設定している。まず、レイヤの高さを 1mm に設定し、ノズルの直径の設定をパラメータに合わせて設定するが 3mm に設定している。

3D プリンタは材料を溶かすためにノズルの温度を上げる必要がある。ノズルを加熱する際に生じるプリンタの停止をなくすために、温度を設定している部分をすべてコメントアウトするようにした。Elsa で造形するにあたって GCode とは 3D プリントする際に必要なファイルで、プリントする際はモデリングしたデータを slicer ソフ

トを使い、変換して使用する。ヘッドパーツに搭載されたエアブラシの弁の開閉を制御するために、2つの GCode をファームウェアに追加した。1つはサーボモータがエアブラシの弁を解放させる GCode, もう1つは弁を閉める GCode が設定されている。この2つのコマンドは開放が G93, 閉鎖を G94 に設定している。この2つのコマンドを Z 軸が変化する際に挿入することで、2つのエアブラシの噴射を同時に制御し無駄な氷を生成するのを防ぐことができる。

5. プリンタの動作検証

ヘッドパーツを組み込みプリンタの動作に支障がないか、またエアブラシから出した水が氷に変化するかなどの動作検証を行った。最初にヘッドパーツを変えた弊害がないかを調査した。ヘッドパーツは既存のヘッドパーツの寸法を元に設計しており、ノズルの中心は既存の設定と同じ場所を通る。しかし、エアブラシなどを乗せた影響でベッドの外周付近では支柱と干渉する可能性があるため、造形範囲限界付近を通るようにヘッドを移動させた。結果としては、どこも干渉することがなく問題なく動作することが分かった。

次に氷を造形できるかの検証を行う。検証には図 4 のモデルを用いて検証する。青い5つのラインは GCode が可視化されたもので、このラインに沿ってノズルが動き造形される。レイヤごとの間隔は 1 mm に設定してあり、造形のためにノズルが 1 mm 上がり造形する。この GCode は細長い長方形の形状をしており、寸法は 2 mm × 60 mm である。長方形の中身を埋めるためのラインが 1 本あり、1 層を造形するのに 1.5 往復する。

この GCode を採用した理由は、単純な 1 本のラインだと三角形に近い形状で造形されてしまい、5 mm 積むことができても計測するのが難しくなってしまうためである。また、2 mm の幅を持たせることで実際にオブジェクトを造形したときに、中身を埋める際の判断材料にすることができる。5 mm の高さがある程度正確に出せることができれば、今後サイズが大きくなっても問題なく造形できると考える。高さを変える際には造形しないようになっている。周囲の楕円形は Slic3r を使って GCode を作ったときに生成される部分で、氷造形の際には印刷しないよう設定して

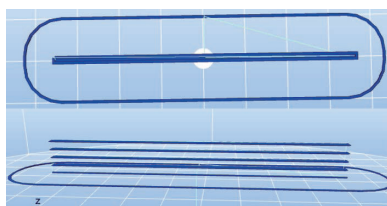


図 4 実験に使うモデル
Fig. 4 Model used for experiment.

いる。

氷が造形できるかの検証と同時に、速度とノズルの高さの違いによって造形にどのような結果が出るかを確認し、この動作検証を通し、安定して造形できそうな速度も調べる。

検証は以下の条件で行う。水の噴射量は一定の量で固定し、ノズルの初期位置を 15 mm, 20 mm, 25 mm, ヘッドの移動速度は 500 mm/min, 1,000 mm/min, 1,500 mm/min, 2,000 mm/min, 2,500 mm/min, 3,000 mm/min の 6 個の値で計測する。

図 4 で造形された物が図 5 である。底面の氷は広がって他よりも太くなっているがこの部分はラフトの役割を果たしている。このラフトは、ベッドから氷を剥がす際に先に碎けるため本体が壊れないように力を加減する目安にでき、ベッドを温めて剥がす際には先に溶け始めるため、本体が溶けるのを防いでいる。

氷のオブジェクトは造形の際にフロンガスが当てられており、氷が冷やされており溶けにくくなっている。

この結果をまとめたものを図 6 に示す。この結果として、ゆっくり進むほうが氷を高く積むことができ、ノズルの位置による影響を大きく受ける。早すぎるとノズルの高さに関係なく造形できる高さが収束していく。

以上のことから遅い速度の 500 mm/min と、完全に収束する前かつ一番速度の出せる 1,800 mm/min が造形に適していると考えられる。

また、ノズルと造形物の最上面との距離が近くなり造形

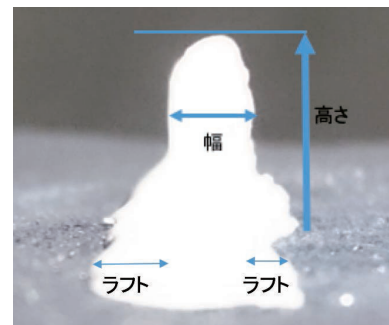


図 5 計測する位置
Fig. 5 Position to be measured.

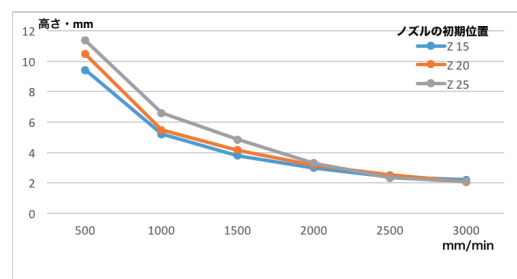


図 6 造形された氷の高さと速度の関係
Fig. 6 The relationship between height and speed of nozzles.

に支障をきたすことが分かった。造形の際は、GCodeに設定した高さ分だけ毎回積み上げていかないと、ノズルと干渉したり距離が離れて積層できないなどの問題が出てくる。

造形の重要な要素となる、ノズルの高さ、移動速度、水の量などを変えて均等に積層できるパラメータを調査した。

6. ノズルの高さ、移動速度、水の量による造形の変化

6.1 調査目的

Elsa で造形される氷はノズルの高さ、ノズルの移動速度、水の量の3つのパラメータで変化する。ノズルの高さは、低すぎても高すぎても造形ができなく、エアブラシの特性上高さを変えると噴射する範囲も変わるため、造形物の幅や高さに影響を与えると考えられる。ノズルの移動速度は、氷を同じ場所にどれだけ当てるかが変わってくるため、速度によって高さや幅が変化する。水の量はエアブラシの弁をどれだけ解放しているかに依存し、水の量が変われば氷の量も変わるため、造形物の高さや幅などに影響してくる。

これらの関係性を調査し、設計したモデルとなるべく同じ高さ、形の造形物を出力できるようにする。それを効率良く行う造形とは、設計したモデルに近い寸法と形状を保ち、なるべく早く完成させることのできることだといえる。

効率良く造形するには、積み上げた際にノズルと氷の上面がなるべく同じ距離を保ち、造形物の内部を埋めるためある程度の幅を出せる必要がある。幅が太ければそれだけ内部を埋めるために必要な移動が少なく済むため、造形時間を短縮することができるが、太すぎると造形物の高さや形状に影響が出る可能性がある。

6.2 調査に用いた環境

実験は室温 28℃ の環境で行う。調査用の GCode として動作検証で使用した図 4 を利用する。

造形に適しているノズルの移動速度として動作検証の結果得られた 500 mm/min, 1,800 mm/min の2つを使用する。

ノズルの高さは動作検証で行った3つの初期位置に加えて 10 mm を加えた。Elsa の造形法の特徴として、水とフロンガスの交点の位置にベッドがないと水を瞬時に氷にすることができない。その最小の位置を調べたとき、ノズルの高さが 10 mm のときが最小だということが分かったため、10 mm を加えた。

エアブラシの弁の解放率は細かく角度を変えても大きな変化がなく、意味がないため 90 度ずつ増やして実験する。解放率によって噴射される水の量は変化するため1分間に噴射される水の量を調べた。90 度のときは 1 ml/min, 180 度のときは 2 ml/min, 270 度のときは 3.5 ml/min, 360 度のときは 5 ml/min となっている。

計測は図 5 に示した高さとの位置を測定する。積んだ高さに多少の誤差があるが、造形物が大きく形を崩すことはなく見た目でもほとんど分からないため、高さは最上面の中心を計測する。幅はラフト役割を持つ部分は測定せず、上の方を計測する。

6.3 結果

図 7 の初期値 10 mm では、移動速度が 500 mm/min の場合 9 mm の積層になっている。移動速度が 1,800 mm/min では、4 mm 以下の積層になっている。初期位置 10 mm はガスの圧力が強く造形中に積層された氷が飛び散ることが多く、積層された面が平らではないことが多かった。水の弁を 360 度回し移動速度 500 mm/min にして造形した際は、幅が 10 mm にまで大きくなることが分かった。これは、造形物の内側を埋める際にうまく使えば印刷時間の短縮が可能になる可能性がある。しかし、ふだんの造形では有効なパラメータではないと判断する。

図 8 の初期値 15 mm の場合は移動速度 500 mm/min で弁が 180 度と 270 度解放されているときの造形で 10 mm の高さまで積めることが分かっている。しかし、10 mm の高さまで積み上げている最中にノズルとの距離が近くなり、フロンガスと水の交点がずれてしまったり氷が吹き飛んでしまう。

造形時に移動速度 1,800 mm/min で水の弁を 360 度解放したときは氷の積層の高さが 5 mm 積めているため、GCode で指定した高さと同じだけ積層されていることが分かる。

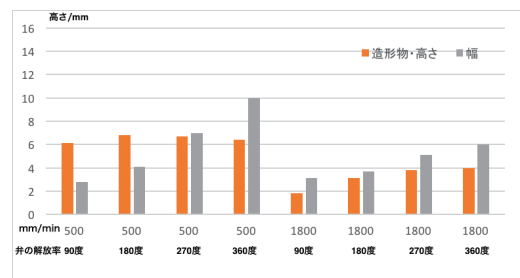


図 7 初期値 Z10 から造形を始めた場合の結果

Fig. 7 The result when starting printing from the initial value Z10.

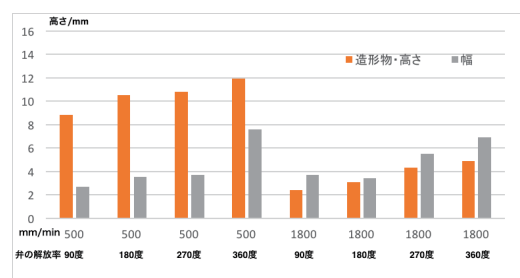


図 8 初期値 Z15 から造形を始めた場合の結果

Fig. 8 The result when starting printing from the initial value Z15.

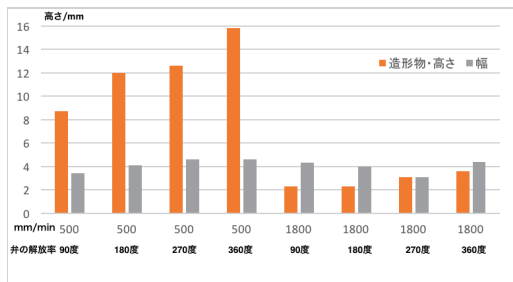


図 9 初期値 Z20 から造形を始めた場合の結果

Fig. 9 The result when starting printing from the initial value Z20.

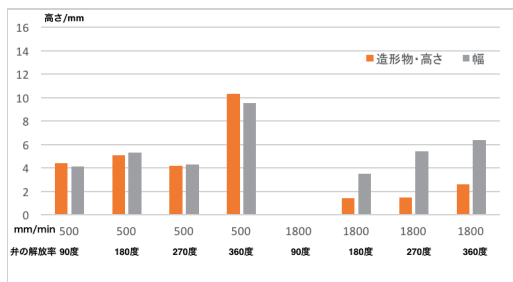


図 10 初期値 Z25 から造形を始めた場合の結果

Fig. 10 The result when starting printing from the initial value Z25.

図 9 の初期値 20 mm の場合は移動速度が 500 mm/min のときは積層量が多すぎ、移動速度が 1,800 mm/min のときは積層量が少なく振れ幅が大きい、このパラメータで造形しようとする、ノズルの上げ方が複雑になってしまうため、初期値 20 mm は造形には向いていないと考える。

図 10 の初期値 25 mm の場合は、距離が離れすぎて水とガスが拡散することから移動速度 1,800 mm/min の場合は水はできるが幅が太く高さが出ないという結果になった。500 mm/min のときに 360 度解放すると高さ幅ともに 10 mm に近い造形ができています。距離が離れるとガスと水が拡散するため、幅の広いラインを引くことができる。このパラメータも精度を落として素早く造形するのに適していると考えられる。

6.4 考察

以上の結果から本研究での Elsa を用いた造形には GCode と同じ高さを出力できた、初期値 15 mm、移動速度 1,800 mm/min、弁は 360 度回したときが最適であることが分かった。高さが均等に積めることで積み上げたときの誤差が少なくなり、サイズが大きくなっても問題なく造形でき、速度が速いため造形時間が短縮されるメリットがある。このパラメータでは、幅が大きくなっているが造形の幅が太いと造形物の中身を埋める時間が短縮できるメリットがある。また、氷の造形物はすぐに溶けて面がとれてしまうため高精度に造形してもあまり意味がないため、このパラメータは総合的に見て優れていると判断できる。

図 8 の 10 mm 積んでいるパラメータでは、Z 軸を 2 mm ずつ上げることで回避することができると思われるがそのために、10 mm 積層できるか調査する必要がある。幅も 4 mm と比較的狭いラインを引けるため、このパラメータを使うことで GCode の生成時に Z 軸を 2 mm ずつ上げても造形でき、単純な形状の造形ならば時間の短縮に使うことができる可能性がある。

移動速度 500 mm/min で、水の弁を 360 度解放したときに幅が 10 mm と太いラインを生成することができることが分かった。大きいサイズのモデルの中身を埋める際に使用すると効率良く使える。

ラインの幅が広いと精度に問題が出るが、造形の際に内部の密度を上げる際に少ないストロークですみラインの端を輪郭に合わせるように造形することで、造形時間が短縮できるメリットがある。

6.5 パラメータを利用した造形

実験で有効な結果が得られたパラメータを使い実際に造形を行った。

図 11-a の GCode を使い同じサイズの星のオブジェクトを印刷できるか調査した。この星は表のパラメータを使用して造形した。このパラメータで造形した際の幅は 9 mm 近くになっているが、Slic3r の設定でノズルの直径をこの 9 mm に合わせると GCode が生成できない問題が出てきた。そのため、ノズルの直径は 3 mm に設定した GCode を使い造形するテストをした。

実際に造形した氷の星は図 11-b のようになった。この手のひらサイズの氷の星を造形するのに造形開始ボタンを押してから計測して 1 分程度かかった。造形物の周りにパウダー状の氷ができてしまうが、星の形を造形することに成功した。剥がす際、布によって剥がれにくい場合があるため繊維質ではない布を使う、または、裏側からドライヤで温めると簡単に布から剥がすことができる。剥がしたものは図 11-c のようになっており、星の形状が造形されている。

実験では幅が 9 mm 近くになっていたが今回の造形でも問題なく星の形状が造形された。この結果から、造形するときに出る幅はそこまで重要なものではない可能性があると考えられる。造形される幅は造形物の高さに多少影響を与えるが誤差の範囲であるため、GCode に変換する際には Slic3r 内のノズル直径の設定を 3 mm で固定しておけば問題なく氷造形を楽しむことができる。

6.5.1 レイヤの間隔 2 mm における造形

考察であげた、ノズルとの距離が近くなるという問題に関しての調査をここで行う。直方体を造形し箱型に見える形状のものが実際に出力できるかを調査した。造形には初期位置 15 の移動速度 500 mm/min、弁を 180 度解放した状態で造形した。造形には表の積層 2 mm のパラメータ



図 11 氷の星の造形工程
Fig. 11 GCode of the star used for printing.

を使用し、10 mm 積層できるか調べた。

この直方体は 25 mm × 25 mm × 10 mm のサイズで造形開始ボタンを押してから計測して造形に 1 分 42 秒かかった。レイヤの数は 5 層で、高さは 2 mm ずつ増えている。使用するパラメータでは幅が 3 mm 近くになっているため、Slic3r のノズルの直径を 3 mm に設定して GCode を生成した。図 8 では 10 mm を少し超えるパラメータになっているが、ノズルが 2 mm ずつ上がっているのも水とフロンガスの交点は、ほぼ変わらないと考えられる。造形した直後は図 12 のようになっており、凹凸があり 1 か所だけ高さが低く面に傾斜が生まれているのが分かる。ベッドから剥がして時間が経つと図 13 のように、溶け始め表面が滑らかになり綺麗な直方体になった。

造形物は 1 番高いところで高さ 11.3 mm になっておりほぼ 10 mm に近いサイズとなった。実験よりも造形物が高くなった理由として、ノズルとの距離が比較的一定で水とフロンガスの交点が安定していたためだと推測できる。

以上のことから造形に適しているパラメータを表 1 にまとめておく。

7. アプリケーション

即座に氷の造形物を印刷できるこのプリンタを使ったア

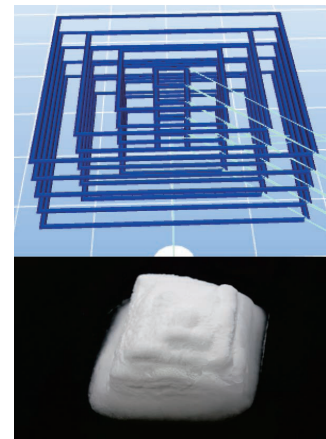


図 12 パラメータを使って造形した直方体
Fig. 12 Cube printed using parameters.



図 13 表面が溶けた直方体
Fig. 13 Surface-melted cube.

表 1 造形に適したパラメータ

Table 1 Parameter for suitable printings.

積層ピッチ	ノズル位置	弁の解放率	速度
1 mm	15 mm	180 度	500 mm/min
2 mm	15 mm	360 度	1,800 mm/min

プリケーションの例を示す。我々の Elsa で用意した氷の造形物は時間が経つと溶けて消滅する。さらに、氷の造形物は水だけでできているため、食べても害のあるものではない。これらの特性を生かし、我々は以下のアプリケーション例を提案する。

7.1 溶けてなくなることを生かしたメッセージの作成

水で印刷された造形物は、時間の経過で徐々に溶け形を変えていく。我々はこのプリンタで文字を印刷し、文字が溶けた結果生み出されるものをアートにするアプリケーションを提案する。氷は溶ける過程で形を変形させ別の形になる。また、同じ文字でも同じ溶け方はしないため必ず違う形状の書体を形作る。図 14 は Elsa という文字を実際にプリントし 10 分おきに撮影した結果である。このように文字だけでなくロゴや消えてなくなるメッセージを作

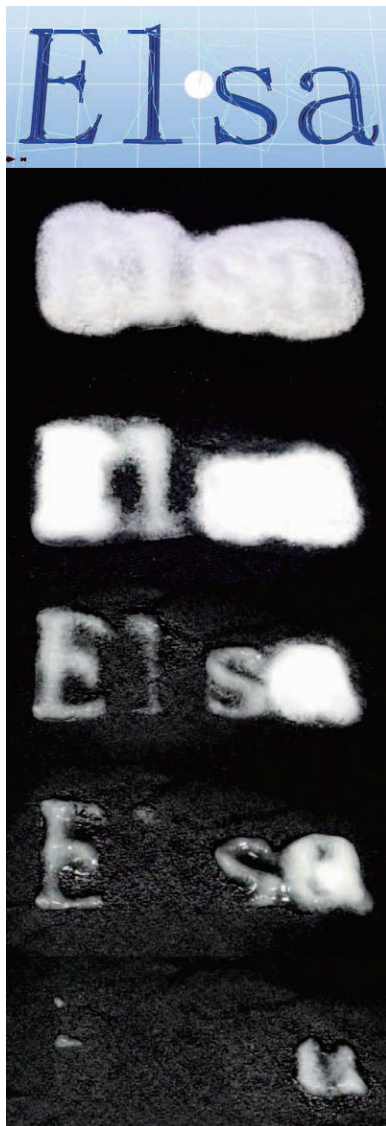


図 14 印刷した“Elsa”の文字が溶ける過程の観察

Fig. 14 Illustration of the letters “Elsa” and stages in the melting process as it changes shape.

ることができる。

7.2 食べることができる造形物

氷の造形物を印刷できるこのプリンタは、料理の飾り付けやアクセントに使うことができる。料理には装飾をして食品を見栄え良くすることができる。瞬時に氷を作れるこのプリンタを使えば、その場で料理に装飾品を盛り付けることができる。また、客のリクエストに答えることも可能になる。氷でできたメッセージを装飾したり、子供の好きなアニメの絵を飾り付けることも可能になる。

造形の工程を見せることで、ライブクッキングのようなことを行うことができ、客を楽しませることができる。

8. 今後の課題と予定

現在の問題として、氷を造形する際にガスの噴射の圧力

で造形物の一部が吹き飛んで欠けてしまうことがあげられる。このため、ガスの噴射の圧力を調節し吹き飛ばないようにする必要がある。これが実現すれば、さらに正確な造形が可能になる。現状普通に造形した場合オーバ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、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問題がある。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いる。オーバハングの造形をする際は氷どうし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。今回の実験で判明した太さを持ったラインを引くパラメータを積極的に利用し、外周と内部でパラメータを使い分けることにより高速に造形するようなシステムを目指す。

9. まとめ

我々は氷の造形物を素早く印刷するための 3D プリンタ Elsa を実装した。水とフロンガスを混ぜ合わせて瞬間的に氷を作るために、2つのエアブラシを使い専用のヘッドパーツを製作した。既存の slicer から出力される GCode を変換し、すぐ使えるようにするためのソフトウェアを開発することで、氷造形を誰でも簡単に行うことのできる仕組みを構築した。布ベッドに水とフロンガスを同時に噴射することで、造形物を安全に剥がすことができ、他のベッドと違い造形のたびにベッドを冷やす行程を省くことができる。

動作検証を行い、結果氷の造形物を作ることができたが使用した GCode とはまったく違う高さの物が造形された。そこで、ノズルの高さ、移動速度、水の量のパラメータが造形に重要なパラメータと考え、効率の良い造形を行うためのパラメータを調べ、パラメータを利用して星と直方体を造形した。星は表 1 の 1mm のパラメータで造形し、直方体は表 1 の 2mm のパラメータを使い造形し、星や直方体の形状を持った氷を造形することができる。また、アプリケーションで利用例を示した。文字や立方体、星などの形状を素早く造形できることを証明した。表 1 のパラメータが有効なことを証明した。また、Elsa の手法で氷造形を行うのに注意するのは、水とフロンガスの交点がずれないことである。そのため、幅が太い造形などもあったが 4mm 程度なら誤差と考えられ、GCode の生成時の Slic3r の設定はノズルの直径を 3mm で固定しておけば問題なく造形でき、Z 軸のピッチだけをパラメータに合わせて変えれば設計した形状と高さを出すことができる。そのため、細かい設定に神経を使う必要がなく大雑把な設定でも問題なく

造形できるため、簡単に氷造形を始めることができる。

参考文献

[1] Suntory-3D on the Rocks (online), available from <http://www.tbwahakuhodo.co.jp/work/3d-on-the-rocks/> (accessed 2017-10-16).

[2] Barnett, E., Angeles, J., Pasini, D. and Sijpkens, P.: Robot-assisted Rapid Prototyping for ice structures, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.146-151 (online), DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152317 (2009).

[3] Peng, H., Mankoff, J., Hudson, S.E. and McCann, J.: A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp.1789-1798, ACM (online), DOI: 10.1145/2702123.2702327 (2015).

[4] Hudson, S.E.: Printing Teddy Bears: A Technique for 3D Printing of Soft Interactive Objects, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, pp.459-468, ACM (online), DOI: 10.1145/2556288.2557338 (2014).

[5] Khot, R.A., Aggarwal, D., Pennings, R., Hjorth, L. and Mueller, F.F.: EdiPulse: Investigating a Playful Approach to Self-monitoring Through 3D Printed Chocolate Treats, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, pp.6593-6607, ACM (online), DOI: 10.1145/3025453.3025980 (2017).

[6] Mizrahi, M., Golan, A., Mizrahi, A.B., Gruber, R., Lachnise, A.Z. and Zoran, A.: Digital Gastronomy: Methods & Recipes for Hybrid Cooking, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16*, pp.541-552, ACM (online), DOI: 10.1145/2984511.2984528 (2016).

[7] Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Klein, J., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J.C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M. and Oxman, N.: Additive manufacturing of optically transparent glass, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol.2, No.3, pp.92-105 (online), DOI: 10.1089/3dp.2015.0021 (2015).

[8] Deckers, J., Vleugels, J. and Kruth, J.P.: Additive manufacturing of ceramics: A review, *Journal of Ceramic Science and Technology*, Vol.5, No.4, pp.245-260 (online), DOI: 10.4416/JCST2014-00032 (2014).

[9] Khoshnevis, B., Zhang, J., Fateri, M., Xiao, Z. and Angeles, L.: Ceramics 3D Printing by Selective Inhibition Sintering, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, No. August, pp.163-169 (2014).

[10] Nachum, S., Vogt, J. and Raether, F.: Additive manufacturing of ceramics: Stereolithography versus binder jetting, *CFI Ceramic Forum International*, Vol.93, No.3, pp.E27-E33 (2016).

[11] Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R. and Wicker, R.B.: Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol.28, No.1, pp.1-14 (online), DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4 (2012).

[12] 3Doodler (online), available from <http://the3doodler.com/> (accessed 2017-10-16).

[13] Fujita, H.: Elsa: Temporary Ice Jet 3D printing, *Proc. 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp.559-563 (online), DOI: 10.1145/3024969.3025093 (2017).

[14] Zhang, W., Leu, M.C., Ji, Z. and Yan, Y.: Rapid freezing prototyping with water, *Materials & Design*, Vol.20, No.2-3, pp.139-145 (online), DOI: 10.1016/S0261-3069(99)00020-5 (1999).

[15] Repetier (online), available from <https://www.repetier.com/> (accessed 2017-10-16).

[16] Marlin (online), available from <http://marlinfw.org/> (accessed 2017-10-16).

[17] RAMPS1.4 (online), available from http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4 (accessed 2017-10-16).

[18] Slic3r (online), available from www.slic3r.org (accessed 2017-10-16).



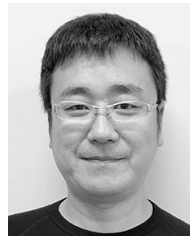
藤田 大樹 (学生会員)

平成 28 年東京工科大学メディア学部メディア学科卒業。平成 29 年東京工科大学大学院入学。



中野 亜希人

東京工科大学演習講師，昭和 60 年生。平成 29 年慶應義塾大学大学院政策メディア研究科後期博士課程所定単位習得退学。同年より株式会社ブーメランで試験車の開発に従事。



羽田 久一 (正会員)

平成 7 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。平成 10 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程単位取得退学。平成 10 年奈良先端科学技術大学院大学附属図書館研究開発室助手。平成 15 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特別研究専任講師。平成 24 年東京工科大学メディア学部准教授。自然の力を利用した芸術と科学の接点に興味を持つ。電子情報通信学会，日本 VR 学会，芸術科学会，他会員。