

Elsa:氷を素材とした3Dプリンターの開発

藤田 大樹^{1,a)} 中野 亜希人^{1,b)} 羽田 久一^{1,c)}

概要：本論文では、氷を造形用のマテリアルとして使用する3Dプリンターを提案する。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作成できる訳ではない。本提案では氷の造形物を印刷するために、二つのエアブラシを使い水とフロンガスを噴射することで高速に微細な氷を作る。二つのエアブラシはサーボモーターを使い噴射を制御し、水とフロンガスを別々のエアブラシから同時に噴射し気化熱で氷を作る。この機構をデルタ型の3Dプリンタに組み込む事により、既存の3Dプリンタと同様にモデリングを行うことで、氷の造形物を出力できる。この氷用3Dプリンターを使うことで素早く氷の造形をすることができるようになり、誰でも氷の造形物を作ることが可能となる。造形される氷のレイヤーは細く一定の太さで造形されるため、高速に一定の精度のオブジェクトを造形することができる。氷の造形物は一時的な物で、時間の経過で溶けて完全に消失する性質を持っており、3Dプリンターを用いた制作物に新たな表現を与えることができる。

キーワード：ラピッドプロトタイピング, 3Dプリンター, 氷

Elsa: Development of 3D Printer Using Ice

HIROKI FUJITA^{1,a)} AKITO NAKANO^{1,b)} HISAKAZU HADA^{1,c)}

Abstract: In this paper, we describe a three-dimensional (3D) printer that is used to make models that temporarily exist and disappear without a trace. The printer injects water and hydrofluorocarbon gas (HFC gas) from two air brushes and instantly makes an ice object. Using this 3D printer, persons can rapidly and precisely make ice shapes. Then, the printed ice object evaporates a few hours later. Because all of the printed material is water, the objects then vanish a few hours later, and the process of vaporization is not reproducible. The proposed system creates edible ice objects rapidly, and it therefore, can be used to provide made-to-order services at restaurants or parties to provide garnishes made of ice. We give new expressions to objects created with 3D printers.

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いる。氷の可能性はとても多く、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は限られてしまっているのが現状であ

る。我々は氷造形を誰でも簡単に行うことのできる仕組みと、既存の slicer から出力される GCode を変換しすぐに使えるようにするためのソフトウェアを開発した。slicer はモデリングソフトから出力された STL ファイルを GCode に変換するためのもので、造形時の積層ピッチやマテリアルなどを設定することで最適な GCode を自動で生成することができるアプリケーションである。GCode は3Dプリンターなどの CNC 機器を制御するための命令で、GCode の精度が造形の精度を左右する。

現在 3D プリンターを使った造形は3つに分けられる。レーザー焼結 (SLS) のように、粉末にレーザーを当て時間

¹ 東京工科大学

^{a)} g3117023e5@edu.teu.ac.jp

^{b)} akito@sfc.keio.ac.jp

^{c)} hadahskz@stf.teu.ac.jp

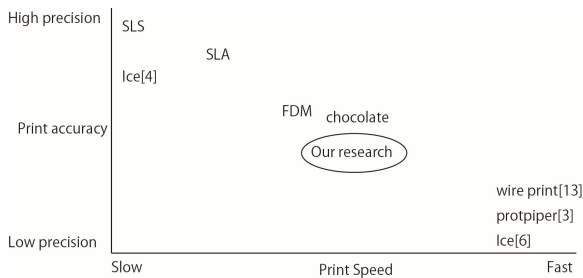


図 1 モデリング速度と精度の関係

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 プリンターで、安くても 50 万円近くし材料に粉末を使い不活性ガス用の設備が必要になる一般家庭では使いにくい、材料が樹脂の場合サポート材を作らずに造形できるメリットがある。ある程度の精度と速度を有し、低コストで一般家庭にもっとも普及している熱溶解積層法 (FDM) は、プラスチックの材料をエクストルーダーで巻き込み、熱を加えてとかしながら細いノズルから押し出して層を積み上げて造形物を作る。ラピッドプロトタイプングをより素早く行うために、速度をあげ最低限の精度を持った造形物を作る 3D プリンターがある。

3D プリンターに要求される成分を二つの軸にし、それぞれのプリンターがどの需要を満たしているかを図 1 に示す。縦の軸が精度を示し、横の軸が印刷にかかる時間を示している。速度を優先すると精度が落ち、精度を優先すると速度が落ちてしまう。図 1 の様に 3D プリンターの印刷は時間と速度が反比例している。

氷の造形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 [1] とラピッドプロトタイプングを素早く行うためのハンディータイプ [2] のみで、中間の部分が欠落している。そこで、我々は精度と速度を両立させた氷の 3D プリンターを製作した。現在広く普及しているタイプのプリンターの一部を改修することで氷造形を可能にし、誰でも簡単に氷の造形物を作れる様にする。

2. 氷造形の提案

氷の造形物を 3D プリンティングするための仕組みについて提案する。氷の彫刻はアート作品や宴の舞台で彩りを飾るのによく用いられ、氷の塊を削り出して様々な作品を作ることができる。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 で掘削する試みがあるが、削るための氷の塊や CNC 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。現在もっとも普及している造形方は熱溶解積層法で、このタイプの 3D プリンターは最近になって低コストになり誰でも購入できるようになったため、多くの人に認識されている造形法と言える。使用方法も簡単で、誰でも自分のモデリングした物を出力することが

できる。我々は、熱溶解積層法と同じ仕組みで、氷を積層で積み上げての造形物を作ることにした。熱溶解積層と同じ方法での造形なら、使いやすく誰でも簡単に氷の造形物を作ることができるようになる。

3. 関連研究

新しい材料を使って造形物を作り、今までの 3D プリンターでは表現できなかった物を作ることを可能にしている論文を調査した。

現在主流になっている 3D プリンターはプラスチックを使って造形するタイプのもので、コストも安くとても扱いやすい。しかし、プラスチックの造形物しか作ることができないため、耐熱性や柔軟性などがいないため表現に限界がある。今回調査した論文では、プラスチック以外の材料を使い様々な表現を可能にしている。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アーティストの活動の幅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ー [3][4] やチョコレートなどの食べ物プリンター [5][6]、ガラス [7]、セラミック [8][9][10] や金属 [11] などのプリンターが作られている。

氷を掘削し様々な彫刻を作りお酒に入れて楽しむものもある [12]。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的に難しい。

氷を FDM の様に積み上げていく造形方を取っている研究は、Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Structures[1] というものがある。この研究では、 -20°C にまで冷やした水を一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 20mm/h の速さで造形するため、精密な造形が可能で塩水をサポート剤として使用し、オーバーハングのある造形も可能になっている。この研究は、 -20°C の水を液体の状態を保つために急速冷凍を防止する研究を参考にして [13]、造形時間はサイズにもよるが、精度を出すためにスピードを犠牲にしているため印刷に 5 から 50 時間かかる。

3Doodler[14] という製品がある。3Doodler はペン型のデバイスで、熱造形式 3D プリンター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ィアをフリーハンドで形にすることができる。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 [2] は、瞬時に氷を出し手を動かして造形する。この研究では、ワイヤー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プングの際に出る大量のゴミを削減することができる。この研究では、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。

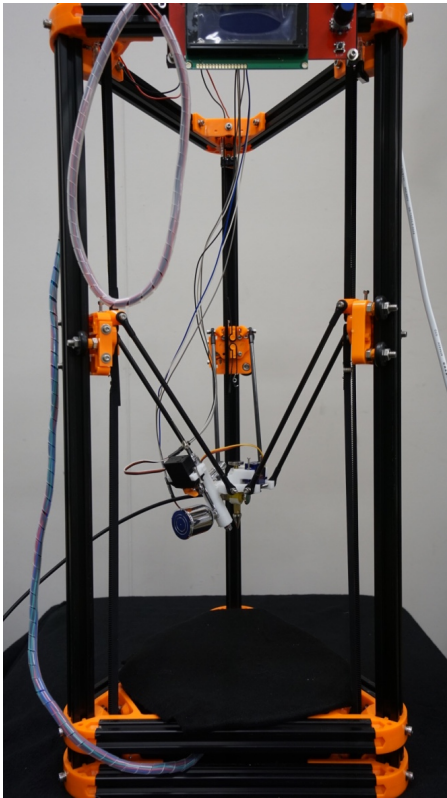


図 2 プリンターの全体図

4. 氷プリンターのヘッドパーツの実装

3D プリンターに実装した氷を作るための機構について解説する。氷を素早く作るためには、過冷却水を使うのがもっと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代替フロン(HFC134a)を使うことにした。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の気化熱で水を冷やし、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、氷が付着することがわかった。そこで、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2のようになり、デルタ型の3Dプリンターのヘッドパーツを一新し氷造形が可能になるように改良した。

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。水の粒が大きすぎると噴射の圧力に押されベッドの外へ飛んで行ったり、いびつな形で凍ってしまうため二本のエアブラシを使う。安定して氷を効率的につくるために図3の水用のエアブラシとフロン用のエアブラシと、制御用のサーボモーターを固定するパーツを3Dプリンターで作成した。エアブラシの塗料を入れる部分

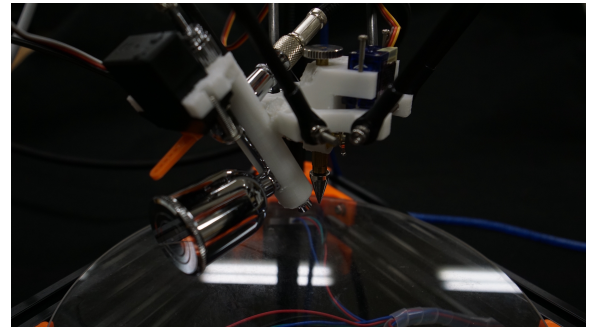


図 3 氷造形用エクストルーダー

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、弁の開放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ーに繋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5にシステムの全体図を示す。ガスボンベ(CFCgas)とエアコンプレッサーはそれぞれエアブラシにつながっている。PCからGCodeをプリンターに送ることで造形することができる。

図4のように二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ー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4にある通りである。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上に、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時の気化熱で水が氷になるため、布ベッドの上に氷ができる。それぞれの仕組みについて解説していく。

4.2 フロンガス用のエアブラシ

フロンガスは、冷媒として多くの場所で使われており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。液体が昇華する際に生じる気化熱は、冷却効率が非常に高い。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。ガスの噴射時の圧力で、水用のエアブラシの位置に取り付けようと凍った氷が流されて予期せぬ方向へ広がってしまう。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しなければならない。我々は、フロンガス用のエアブラシとサーボモーター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プリンターで造形し、組み立てると図6の

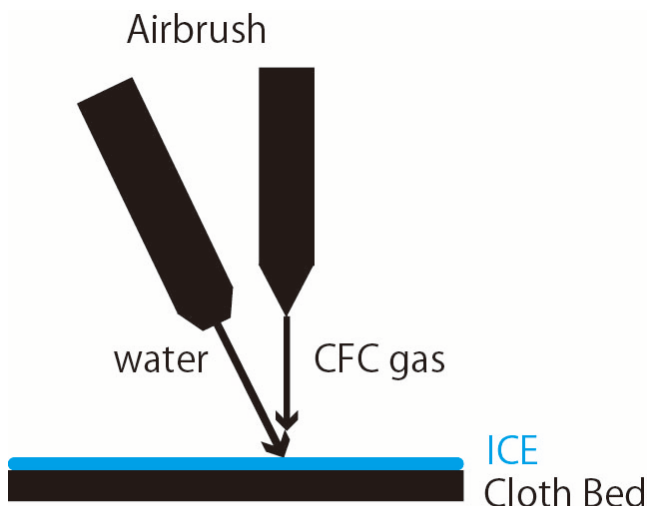


図 4 氷造形の仕組み

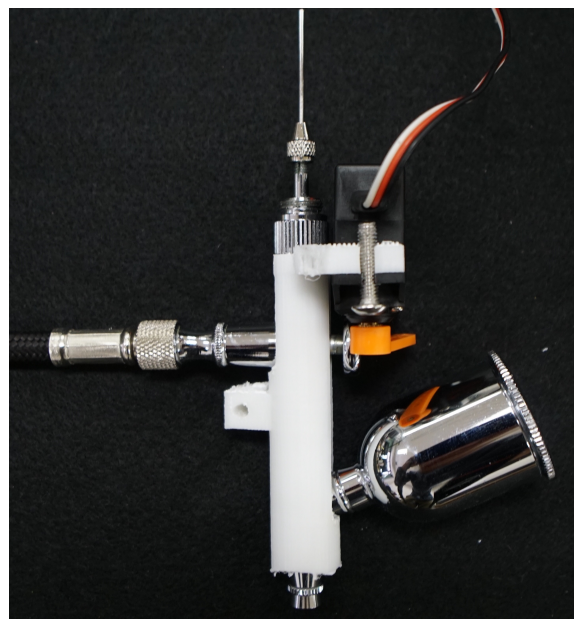


図 7 水用エアブラシ

ようになる。図 6 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ー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ーのヘッドとして、3つのアームに固定できるようになっている。

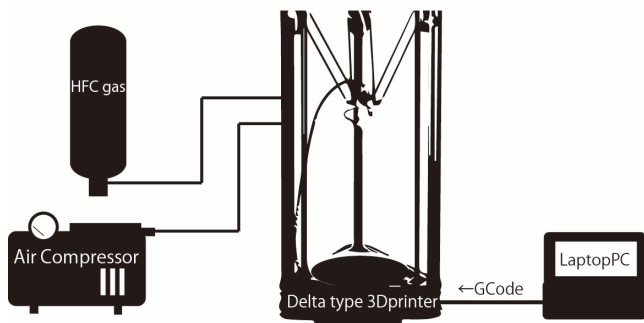


図 5 system over view

4.3 水用のエアブラシ

水用のエアブラシは、図 7 のように保持する。水用のエアブラシは、コンプレッサーに繋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。霧状の細かい水だと、氷は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。

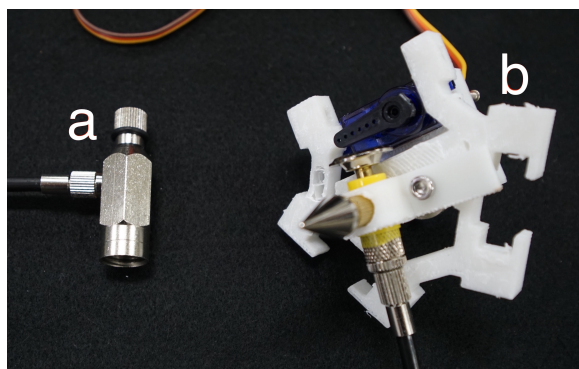


図 6 フロンガス用エアブラシ

4.4 布ベッド

氷で 3D プリンティングする際に、通常のベッドでは水が溶けてしまったりするため、新しい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、常温の状態と凍らせた状態の 2 パターンの実験を行った。ガラスベッドが常温の時は、氷ができて噴射時の風圧で氷が飛ばされてしまい造形できない。凍らせたガラスベッドは、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凍らせる必要があり、スムーズな造形を行うことができない。また、

ガラスに着いた造形物が剥がれない問題もある。凍ったガラスと造形物が完全に一体化し、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 of 布を使った。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。造形物をはがす際は、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実装した。布ベッドは凍らせる必要がなく、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 氷プリンターの制御

氷の 3D プリンターを制御するにあたり我々は、Repetier-Host Mac 1.0.2 [15] と Marlin [16] を使用した。プリンターは、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。我々は、エアーブラシの噴射をサーボモーターで制御するために、ファームウェアの改編をした。二つのエアーブラシを同時に噴射できるように、二つのサーボモーターを GCode で制御できるようにした。3D モデルのスライサーは、Slic3r v1.1.7 [18] を使いモデルを GCode に変換する。この GCode は Repetier-Host からプリンターに送られ、造形が始まる。

4.6 GCode の最適化

slic3r で出力された GCode は、通常の 3D プリンター用のもので Elsa で使用することができない。我々は Python を使い、GCode を氷プリンターで動かすための変換するソフトを開発した。GCode を変換しないと造形できない理由は二つある。一つ目は温度の設定で、既存の 3D プリンター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。slic3r で出力された GCode には、ノズルの温度を設定する命令がありセンサーが一定の温度になったことを認識しないと造形が止まってしまう。Elsa は温度の設定をする必要がないため、この命令分を無視する必要がある。GCode は";"を使うことでそれ以降の文をコメントアウトすることができるため、温度を設置している部分に追記するようにする。

二つ目は、噴射を制御するサーボモーターの制御を行うための命令の追記をする必要がある。サーボモーターを動かして噴射するための命令を GCode ないに書き込まないと、噴射することができない。サーボモーターは G93 と G94 というオリジナルの GCode で制御することができる。G93 は噴射する命令で、G94 が噴射をやめる命令になっている。既存の GCode に手動でこれらの改変を行うことは不可能ではないが、現実的ではない。我々は既存の GCode を自動で編集し、造形できるようにした。



図 8 ラインの幅

5. 実験と考察

今回製作した氷 3D プリンターは、常温の部屋でも氷の造形物の印刷を可能にすることができる。エアーブラシを設置するパーツを自作することで、最小限のスペースに設置できるようになった。既存のパーツとアームの固定位置を同じにすることで、同じ比率での造形が可能になりユーザーは思い通りの造形物を設計したサイズ感で出力することができる。簡単な形状の造形は特に設定を変更する必要がなく、スライサーで作った GCode のままで造形できる。図 8 は輪郭だけを造形したもので、氷のレイヤーがどのくらいの幅で出力されるかを調査した。図 8 のレイヤー幅は 2mm で出力されており、ある程度の精度を持ったオブジェクトを造形することができる。実際に造形した氷の星は図 9 のようになっている。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。実際にはがす際、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と綺麗にはがすことができる。または、裏側からドライヤーで温めると簡単に布からはがすことができる。実際に剥がした星は図 10 のようになっており、星の形状が造形されている。

6. 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ーを使ったアプリケーションの例を示す。我々の氷プリンターは高速に造形することができるため、即座に氷の造形物を用意することができる。形状を保っていられる時間も大きさと気温によるが、1 時間程度で完全に無くなってしまう。即座に造形しすぐに消えていく特性を生かし、我々は以下のアプリケーション例を提案する。

6.1 溶けて無くなることを生かしたメッセージの作成

氷で印刷された造形物は、時間の経過で徐々に溶け形を



図 9 造形された星

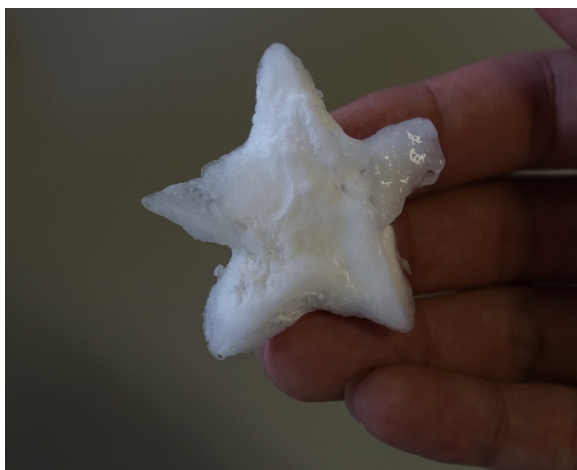


図 10 剥がされた星



図 11 Stripped stars

変えていく。我々はこのプリンターで文字を印刷し、文字が溶けた結果生み出される新しい書体をアートにするアプリケーションを提案する。氷は融ける行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 11 は Elsa という文字を実際にプリントしたもので、書体が崩れ新しい書体になっているのがわかる。文字だけでなくロゴや消えて無くなるメッセージを作ることができるため、応用を効かせればアーティストは崩れる文字から新たな発見を得ることができる。

6.2 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ーは、料理の飾り付けやアクセントに使うことができる。料理には装飾として食品を見栄え良く加工したりすることがある。瞬時に氷を作れるこのプリンターを使えば、その場で料理に星やハートなどの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。

造形が早いと、量産が可能で飲み会の席でもお酒に氷のアクセントを加えることができる。造形の行程を見せることで、ライブクッキングの様なことを行うことができ、目でも客を楽しませることができる。

7. 今後の課題と予定

現在の問題として氷を造形する際に噴射の圧力で、造形物の一部が吹き飛んで欠けてしまう問題がある。この問題を解決するために、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。氷が吹き飛ばないようにすれば、さらに正確な造形が可能になる。オーバーハングの造形をする際は、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。

8. まとめ

氷はアートや料理などで利用され様々な活用法があり、アイデア次第で新しい使い方ができる可能性を秘めている。氷の造形物を印刷するための3D プリンターを製作した。水とフロンガスを混ぜ合わせて氷を作るために、二つのエアブラシを使い専用のエクストルーダーを製作した。布ベッドに水とフロンガスを同時に噴射することで、2mm 幅の氷のラインを造形することができる。実際に、星と文字を造形し時間とともに消える過程を観察した。氷の造形物は今までの3D プリンターにはできない表現をすることができ、造形の幅を広げることができる。

参考文献

- [1] Barnett, E., Angeles, J., Pasini, D. and Sijpkes, 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).
- [2] Fujita, H.: Elsa : Temporary Ice Jet 3D printing, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 559–563 (online), DOI: 10.1145/3024969.3025093 (2017).
- [3] Peng, H., Mankoff, J., Hudson, S. E. and McCann, J.: A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 1789–1798 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702327 (2015).
- [4] Hudson, S. E.: Printing Teddy Bears: A Technique for 3D Printing of Soft Interactive Objects, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 459–468 (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, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 6593–6607 (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, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 541–552 (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] Suntory-3D on the Rocks, available from <http://www.tbwahakuhodo.co.jp/work/3d-on-the-rocks/> (accessed 2017-10-16).
- [13] 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).
- [14] 3Doodler, available from <http://the3doodler.com/> (accessed 2017-10-16).
- [15] Repetier, available from <https://www.repetier.com/> (accessed 2017-10-16).
- [16] Marlin, available from <http://marlinfw.org/> (accessed 2017-10-16).
- [17] RAMPS1.4, available from http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4 (accessed 2017-10-16).
- [18] Slic3r, available from www.slic3r.org (accessed 2017-10-16).