Vol.2019-GN-106 No.5
Vol.2019-CDS-24 No.5
Vol.2019-DCC-21 No.5
2019/1/24

液体窒素を使った氷3Dプリンター

藤田　大樹[1,a)]　羽田　久一[2,b)]

概要：本研究では、氷の造形物を印刷する 3D プリンターを制作し、これにより正確な造形を行うための調査を行った． このプリンターは FDM(熱溶解積層法) のプリンターのヘッドパーツを加工し，水を押し出す機構を追加したもので，液体窒素を冷媒として氷の造形物を作る． 3D プリンターのヘッドから押し出された水を，ベッドの周りに溜めた液体窒素により冷却しアルミのトレーの上に氷を造形する． 氷の造形物を出力するにあたって，押し出す水の量と移動速度と出力された造形物の関係性を調査した． 3D モデルを slic3r で Gcode に変換して利用することで，既存の 3D プリンターと同じ操作で氷の造形物を出力できる．

キーワード：氷，3D プリンター，ラピッドプロトタイピング

1. はじめに

氷の造形物は美しく世界中で人気のあるアート作品の一つである．しかし，氷の彫刻を楽しむためには極寒の土地に足を運ばなくてはならず，彫刻を作る作業も 0 ℃以下の環境でなくてはならない．溶けることを前提に結婚式などのイベントのために作られることもあるが，そういったものは職人が素早く作っている．

最近では 3D プリンターなどによって，クリエイターが自分の設計した物を簡単に形にすることができる．

過去の研究に氷造形を素早く正確に行うための研究 [1] がある．今までの氷造形は，素早く設計通りに造形できるメリットがある．しかし，用意するパーツが高価であったり環境に悪いなどの問題点があるため，普及させるのは難しい．我々が新規に提案する氷造形は液体窒素の冷気で水を凍らせ，積層していく造形法である．既存のデルタ型 3D プリンターを使い，最小限の改良と設備で氷造形を可能にすることができる．

前回の氷造形よりも速度は遅くなる可能性があるが，より純度の高い氷の造形物を作ることができる．液体窒素以外は 3D プリンターに使われている物のため，簡単に実装することができる．

[1] 東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科
Tokyo University of Technology, Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences
[2] 東京工科大学 メディア学部
Tokyo University of Technology, School of Media Science
[a)] g31170136d@edu.teu.ac.jp
[b)] hadahskz@stf.teu.ac.jp

2. 氷造形の提案

氷の造形物を誰でも簡単に造形できるようにするための試みは，過去にも幾つかある．

氷の造形物を自動で作り出す手法には，氷の彫刻を CNC で掘削する試み [2] や 3D プリンターと同じ仕組みで高精度な氷造形 [3] がある．CNC で切削する [2] タイプの造形法は精度の高い氷の造形物を切削することができる．3D プリンターと同じ仕組みで高精細な氷造形を行える研究 [3] では，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遅い．これらの氷造形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．

氷の彫刻を楽しんだり製作したりするには，極寒の環境で彫刻するしかないのが現状である．

我々は，氷造形を楽しむにあたって造形物の精度は関係ないと考える．氷の造形物は溶けてなくなる上に観賞用などの用途に用いられることがほとんどで，工業用の部品などに用いられることは一切ないからである．高精細な氷造形よりも，特殊な環境を必要とせずに素早く造形できる方が良いと考える．

このことから印刷されるべき氷の造形物は，ユーザーが設計した形状に近い形で出力されれば問題ないと判断する．

そこで我々は環境に左右されずに，氷の造形物を楽しむことのできる方法を提案する．

前回我々の開発した氷造形法は，フロンガスと水を吹き付けて造形したが，今回は液体窒素と水を使って造形する仕組みを提案する．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-GN-106 No.5
Vol.2019-CDS-24 No.5
Vol.2019-DCC-21 No.5
2019/1/24

液体窒素を使用する理由としては直接触れていなくとも，周囲の空気を低温にすることができ，積層された水を凍らせることができるためである．また，液体窒素は環境に優しくフロンガスに比べてコストが安いメリットがある．

3. 関連研究

今までは不可能だったマテリアルでの造形を可能にすることで，技術がなくとも任意の形状を印刷可能にしている研究を調査した．

一般的に 3D プリンターと言うと，プラスチックを溶かし積層する熱溶解積層法 (FDM) が主流である．研究の中には柔らかい造形物を作るプリンターとして，ぬいぐるみを造形するプリンター．チョコレートや砂糖を使ったフードプリンターなどが存在する．これらは，通常なら難しい作業や時間のかかる作業からユーザーを解放するとともに，初心者でも自分の好きな形状を作ることができる．

布や繊維をマテリアルとして使用するプリンターは，レイヤー方式 [4] とニードルフェルト方式 [5] がある．レイヤー方式はレーザーで輪郭を切り出し積層していくことで布の造形物を印刷することができる．レイヤーであるため，内部で配線を行うことができ様々なアプリケーションを提供している．ニードルフェルト方式は，羊毛フェルトをニードルで固めて造形していく方式でテディーベアーを簡単に作ることができる．

フードプリンターは，チョコレート [6] と砂糖 [7] が市販されており，実際に立体物の造形が可能になっている．

過去にも氷の造形物を印刷する手法があり，これらは高精細で造形スピードが遅く冷凍庫の中のような環境が必要なものと室内で素早く造形することができるものがある．

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 [2]．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，造形には冷凍庫のような環境が必要であり，時間もかかる．

氷を積層しながら造形する研究として文献 [3] がある．この研究では，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 という速度で造形する．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．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．

ハンディータイプの氷造形 [8] 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．

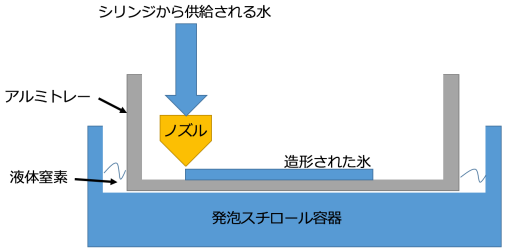


図 1　氷ができる仕組み

4. 前回の研究との対比

前回の研究では，エアーブラシから水とフロンガスを噴射し氷を生成していた．この手法により，素早く氷の造形物を印刷することが可能となった．この研究の問題点は三つある．一つ目は，コストが高いことである．使用しているフロンガスのボンベをすぐに使い切ってしまうため，ランニングコストが高い．二つ目は，造形物が純粋な氷ではないことである．エアーブラシから噴射されている水の量は少ないが，実際に出力された氷の体積はとても大きくなっている．これは，気体を多く含んだ氷であるためである．含まれている気体がこの場合ほとんどがフロンガスであり，食べると独特の風味があり食べるのには向いていない．三つ目は，環境に対して悪影響があることである．造形に使用しているフロンガスは温室効果ガスであり，大量に使用すると地球温暖化促進につながる．

本研究ではこれらの問題を解決できる氷造形を開発した．本研究の氷造形は普通の 3D プリンターのエクストルーダーとヘッドパーツを改良するだけでよく，高価な別のハードウェアを必要としない．液体窒素を用いて造形するため，ランニングコストも前回の研究よりも大幅に抑えることができる上，環境にも優しい氷造形を行うことができる．

5. 造形の仕組み

本研究の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．造形の仕組みは図 1 のようになっている．造形用ベッドのアルミトレーを液体窒素の満たされた発泡スチロールの容器に沈め，冷やす．液体窒素は－ 196 ℃で，アルミトレーもそれに近い温度にまで冷やされている．そこに水を垂らすことで，冷やされた水が氷に変わる．冷やされた氷の温度は 0 ℃よりも低く，その上に水を垂らすと氷柱ができるように氷が積層される．

6. 液体窒素を用いた造形の実装

本研究の液体窒素造形の機構について述べる．機構の全体は図 2 のようになっている．ノズルから水を供給するためにシリンジを押す機構を実装した．液体窒素造形専用の

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

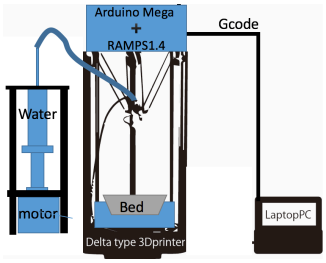


図 2　システム全体図

ベッドとして，液体窒素用のトレーと造形用のトレーをそれぞれ用意した．液体窒素用のトレーは発泡スチロールでできておりそこに液体窒素を蓄えておく，その中に熱伝導性の良い金属のトレーを置く．今回はアルミトレーを使用し，その中に造形物を出力する．

6.1　プリンターの制御

氷の 3D プリンターの制御は，Repetier-Host Mac 1.0.2 [9] という 3D プリンターの制御用アプリケーションと Mariln[10] というファームウェアを使用している．

プリンターは，RAMPS1.4 プリンタ制御ボード [11] を駆動する Arduino Mega 2560 マイクロコントローラで制御している．STL ファイルの変換は，Slic3r v1.1.7[12] を使いモデルを GCode に変換する．GCode を Repetier-Host に読み込ませることで，造形を行う．

6.2　造形のための設定

液体窒素式造形を行うにあたって，Slic3r を使い STL ファイルを GCode に変換する必要がある．前回の研究では，GCode に変換した後さらに専用の GCode に変換する作業が必要になっていた．本研究では，Slic3r から出力された GCode をそのまま使うことができる．

6.3　ヘッドの構造

ヘッドパーツは，FDM 方式のプリンターと同じものを使用している．フィラメントを挿入する場所にゴムチューブを接続してあり，シリンジに繋がっている．シリンジが押されると，ノズルの先端から水が出るようになっている．ヘッドパーツは通常完全に密閉されているわけではないため，水漏れを防止するために O リングやシリコンを使い，密閉加工する必要がある．

本研究では，ノズルの温度は slic3r で設定されたものをそのまま使用できる．ノズルは金属製で熱伝導率が高く，液体窒素の冷気で内部の水が凍結し，詰まってしまう問題がある．このため，ノズルを熱してこれを回避する必要がある．また，氷が想定よりも積層されてしまった場合，ノズルの温度が高いと余分な氷を溶かしながら動くため，ベッドから氷がはがれるのを防ぎ，造形物の高さを整えることができる．今回はノズルの温度を 70 ℃に固定して造形している．

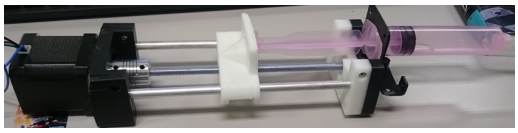


図 3　シリンジの機構



図 4　液体窒素造形用ベッド

6.4　シリンジの機構

シリンジを押して水を供給するためにエクストルーダー用のモーターを利用している．シリンジを押すために，図 3 に示した押しネジ機構を使っている．3D プリンターで製作した土台に棒ネジを通しエクストルーダーのモーターと連結する．この機構を使うことで，モーターが回転するとスライダーが並行移動してシリンジを押し込むことができる．フィラメントを押し出すためのエクストルーダを押しネジ機構に組み込むことで，水の押し出し量を自由に調整できる．押し出し量の調節は Slic3r で行い，安定して造形できる設定を探していく．

6.5　造形用のベッド

ベッドは図 4 のように 2 層構造になっている．青い容器は発泡スチロール製で，液体窒素を貯めておくために用いられる．銀色のトレーは，熱伝導率の高いアルミでできている．このアルミトレーを液体窒素の中に入れ，その中に水を垂らし造形していく．造形が完了した後はアルミトレーだけを取り出し，下から温めることで簡単に造形物を取り外すことができる．

7.　プリンターの動作検証

動作検証のため二つの調査を行った．一つ目は，デルタ型プリンタに実装した水を供給するための機構とプリンター全体の動作検証，二つ目は，氷を積層できるかどうかを調査した．この二つの実験を行うことで，プリンターの挙動と造形の特徴を知ることができる．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

7.1 プリンター全体の動作確認

製作した氷プリンターの動作の検証を行った．氷プリンターの設計上アルミトレーの範囲内でしか造形できず，大きなものは作れないことは前提である．しかし，アルミトレーの範囲内であっても，ヘッドパーツを支えるための支柱が移動する際にアルミプレートに干渉し，ベッドを動かしてしまうことがあることがわかった．この結果からアルミプレート内のすべての場所で造形できるわけではないことがわかった，ヘッドパーツがアルミトレーの枠に当たらないサイズで造形する必要がある．検証の結果，実際に造形できるサイズは 40mm × 60mm × 50mm であることがわかった．シリンジの押し出し機構は問題なく機能し，水漏れなくノズルから水を出すことができた．また，先述したようにノズル内で水が凍結する問題があったが，ノズルの温度を上げることで，凍結の問題も解決した．

7.2 氷造形の初期実験

ノズルから供給された水が綺麗なラインを引いて凍るか，積層することが可能かどうかを調べた．ラインを引く実験ではノズルの移動速度が速すぎると，凍る前に次の造形が始まってしまい，直線状に凍らない問題があった．そこで，Slic3r のパラメータを変更し調査を行った．ノズルの移動速度の速度のパラメータである Speed を変更し，50mm/s にすることで造形できることがわかった．この時，氷の幅は 3mm，高さが 0.1mm という結果になったため，このパラメータを元に積層の実験を行った．

7.3 氷の積層実験

初期実験から Slic3r のパラメータを次のように設定した．ノズルの移動速度のパラメータである Speed を 50mm/s に設定し，次のレイヤーを造形する際ノズルをどれだけ上げるかを決めるパラメータの Layer height を 0.1mm，外壁の厚みの層数を設定するパラメターの Perimeters を 3 に変更した．

この設定で図 5 のような GCode を生成した．高さが 5mm に設定されており，5mm の高さまで積層できるかを調査した．

造形の際に，水の押し出し量が少なすぎると，特定の場所だけ積層され一部が全く造形されないと言う結果になった．水の押し出し量は，フィラメントの押し出し量を設定する，Extrusion multiplier のパラメータで制御できる．初期は 0.1 で始め 0.1 ずつ足していき造形した．結果 Extrusion multiplier が 0.4 の時にうまく積層ができ，図 6 のような氷を造形することができた．飛び出している部分は最初の造形の際に生まれるもので，今回は無視する．計測の結果，高さ 5mm，幅 4mm と言う結果になった．

印刷中にヘッドパーツが造形中の氷に干渉する場面があったがヘッドが加熱されていたため，溶かしながら進み

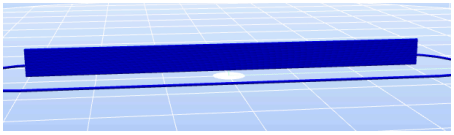


図 5 実験に使った GCode



図 6 綺麗に造形された氷



図 7 押し出し量が多すぎた氷の造形物

造形の失敗を防いでいた．また，押し出される水は少量でアルミトレーや氷に表面張力で吸い付き，凍ることで積層されていることがわかった．ヘッドの上げ率や温度を調節することで，さらに精度や効率を上げることができる可能性がある．

押し出し量が多すぎると，図 7 のようにところどころふくらみのある形状になってしまう．

8. 結果

実験の結果，本システムにおいて氷造形を行うことのできる，Slic3r の設定を見つけることができた．STL を液体窒素造形用の GCode に変換するにあたって，Slic3r の設定を変更する必要があるが設定は保存されるため一回行うだけで良い．設定を変える部分は，図 8 の赤枠部分である．

Filament の部分は，フィラメントの太さを設定する Diameter を 1.75，フィラメントの押し出し量を設定している，Extrusion multiplier を 0.4 に変更する．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

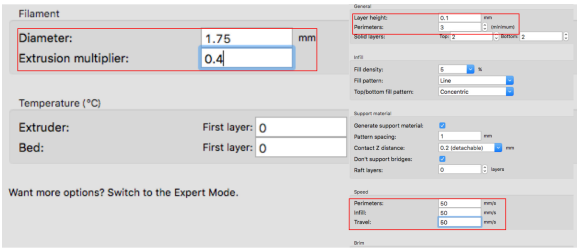


図 8　slicer の設定

General の部分は，ノズルの上げ幅を設定する Layer height を 0.1 に，外壁の厚みの積層数を設定する Perimeters を 3 に設定している．出力される氷は，幅が 1mm 以上出てしまうため，Perimeters の設定をある程度大きくし，内側の積層時に干渉しないようにしている．

Speed の部分は，造形速度を設定している．これらは全て 50mm/s に設定する．造形速度が速すぎると，水が完全に凍る前に次の積層が始まってしまい，結果的に積層できずに造形が失敗してしまう．50mm/s で造形することで，造形できることがわかっている．

9.　今後の課題

現状では，液体窒素の供給は全て手動で行っているため，今後は自動で供給する仕組みを実装する必要がある．また，造形可能であるということを証明しただけであるので，さらに精度を上げることができるか，パラメータと造形物の関係を明らかにする必要がある．また，現在は簡単なラインの造形に止まっているが，様々な形状の造形物を印刷することで，プリンターの性能を調査していく．

10.　まとめ

本研究では，液体窒素を用いた造形法で氷の造形物を FDM 方式と同様に印刷できる 3D プリンターを製作した．液体窒素式氷造形のための機構を実装し，動作に問題がないかどうかを調査した．Slic3r のパラメータを変えながら造形し，積層可能なパラメータを明らかにした．造形速度は，前研究よりも遅いが室内で造形可能であり，空気の含まれていない水だけの氷を印刷することができる．

参考文献

[1] ：Elsa:氷を素材とした 3D プリンターの開発，研究報告デジタルコンテンツクリエーション（DCC），pp. 2188–8868 (2017-DCC-17(22)).
[2] ： Suntory-3D on the Rocks, (online), available from ⟨http://www.tbwahakuhodo.co.jp/work/3d-on-the-rocks/⟩ (accessed 2017-10-16).
[3] 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).
[4] 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).
[5] 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).
[6] ： Chocolate printer, (online), available from ⟨http://www.opt-techno.com/opt_choc_bk/⟩ (accessed 2018-12-24).
[7] ： 3DSystems Chefjet 3D food printer, (online), available from ⟨https://ja.3dsystems.com/culinary⟩ (accessed 2018-12-24).
[8] 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).
[9] ： Repetier, (online), available from ⟨https://www.repetier.com/⟩ (accessed 2017-10-16).
[10] ： Marlin, (online), available from ⟨http://marlinfw.org/⟩ (accessed 2017-10-16).
[11] ： RAMPS1.4, (online), available from ⟨http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4⟩ (accessed 2017-10-16).
[12] ： Slic3r, (online), available from ⟨www.slic3r.org⟩ (accessed 2017-10-16).

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan