

マルチマテリアルを用いた 4D プリンティングと有機的表現

総合政策学部 4 年 田岡菜



目次

- 1. 研究要旨
- 2. 研究背景
- 3 研究動機
- 4. マテリアル
 - 4.1 感温性（形状記憶）フィラメント
 - 4.2 水溶性フィラメント
- 5. 研究手法
- 6. 開発
 - 6.1 外部構造
 - 6.2 内部構造
- 7. 表現
 - 7.1 4D Printed Nature(2018.03)
 - 7.1.1 プロセス
 - 7.2 4D Printed Sketch Work(2018.12)
 - 7.2.1 プロセス
 - 7.3 4D Flower(2019.01)
 - 7.3.1 プロセス
- 8. 評価
 - 8.1 取り組み
 - 8.2 耐候性
- 9. まとめと展望
- 10. 謝辞
- 11. 参考文献
- 12. 図引用元

1. 研究要旨

今日、様々な出力方式の 3D プリンタが開発、販売され幅広い分野で使われている。また、3D プリントすることのできる素材の種類も増えており、特殊な性質を持つ素材や柔らかい素材も容易に出力可能となってきた。

本研究ではその中でも外部の条件によって形状、状態が変化する性質を持つ複数のマテリアルを用い、時間経過の中で多段階的に変化する構造の検討とそれを用いた有機的表現の開拓を行った。

2. 研究背景

本研究の背景として挙げられるのは、4D プリンティングという新たな研究領域である。4D プリンティングは 2013 年に Massachusetts Institute of Technology(以下 MIT)Media Lab の Self Assembly Lab スカイラー・ティビッツ氏によって提唱された概念、研究分野であり、3D プリンティングに時間要素を加えたものを指し、時間の経過によってその形状や振る舞い、機能性が変化するのが特徴である。[1][2]

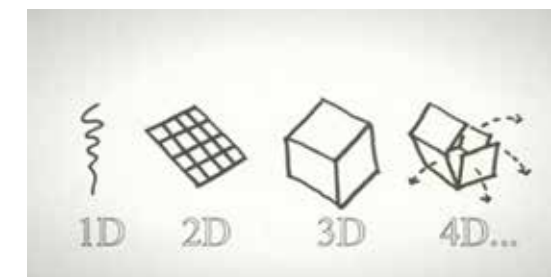


図 2.1：同氏により説明された 4D プリンティングの図

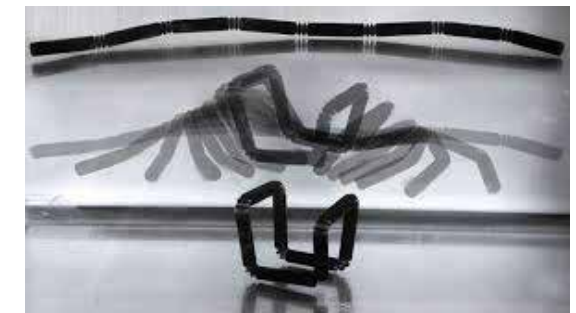


図 2.2：MIT Self Assenmbly Lab より発表された、棒状の 3D プリントモデルが自ら折りたたまれる様子

3D プリントがプリント後に変化を含まないのに対し、4D プリンティングはプリント後に大きな変化を持つため従来の 3D プリンティングと比較して多くの応用と幅広い表現力を持つと言える。

4D プリンティングの研究領域は

- 1. 出力方式
- 2. 外部刺激
- 3. 材料
- 4. 応用先 / 目的

の 4 要素とその組み合わせによって分類することができる。[3]

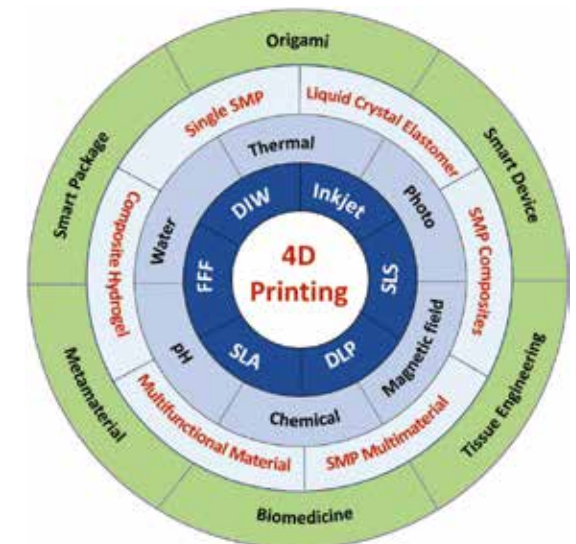


図 2.3: 4D プリンティングの分類の図。但し、図に含まれぬ要素をもつ 4D プリンティングも存在する

ここではいくつかの研究例を、上記の分類を元に紹介する。

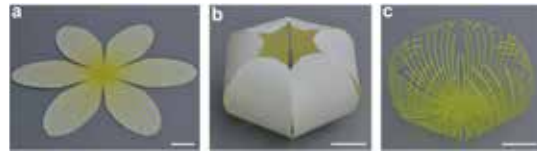


図 2.4

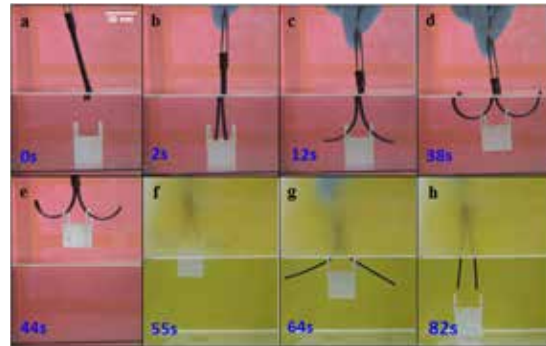


図 2.5

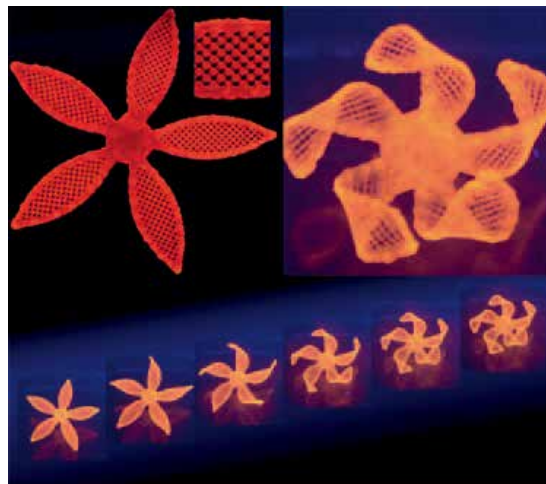


図 2.6

日本でもジワジワと ...

国内でも 2018 年に初めて 4D プリンティングに関する学会、”Conference on 4D and Functional Printing 2018” が本論文の指導教員である田中浩也実行委員長によって催された。従来の 3D プリンティングの先を行く様々な研究が紹介され、筆者もショーケース展示並びにショートプレゼンを行った。



図 2.4 は 1.FFF 方式で出力され、2. 熱によって変形し、3. 紙と PLA を材料として用いることで、4. 新しいモデルの作成方法を提案している。紙に 3D プリントを施し温冷によって変形させることで軽やかな 3D モデルを簡易に作ることができるといった研究である [4]。

図 2.5 は 1. マテリアルジェットイング方式で出力され、2. 熱によって変形し、3. 複数の SMP(Shape Memory Polymer) を材料として用いることで、4. フックをはじめとした新しい機能を提案している。異なるガラス転移点を持つ SMP を組み合わせることで 3D モデルの反復的な動きを実現するといった研究だ。[5]

図 2.6 は、1. マテリアルジェットイング方式で出力され、2. 水によって変形し、3. 複数のハイドロゲルを用いることで、4. 複雑な三次元構造を実現している。生物の構造を模倣することで 3D プリンタを使った生物学的表現を可能にするといった研究だ [6]。

この他にも多様な 4D プリントに関する研究がなされている。[7][8][9][10][11]

3. 研究動機

低価格の 3D プリンタの登場により世界的にも国内でもメーカームーブメントと呼ばれる動きが生まれ、今までの作りに関わることのなかった多くの人々がものづくりを楽しむことができるようになった。しかしながら 3D プリンタによって作られるものは既存品のコピーなど独自性が低いもの、アウトプットの美しさが鑑賞に耐えないものが殆どである。これは 3D プリンタが生産技術に過ぎず、一つの表現メディアとしては未成熟であることの証である。

また、近年盛り上がりを見せる 4D プリンティング分野の研究だが、その技術を用いた芸術表現は未だ開拓の余地が多分に残されている。本研究では、4D プリンティングをある種のアクチュエーターと捉え、制作活動を試みたいと考えた。

4. マテリアル

本論文では FDM 式 3D プリンタで使うことのできる感温性フィラメントと水溶性フィラメントを用いる。

4.1 感温性フィラメント

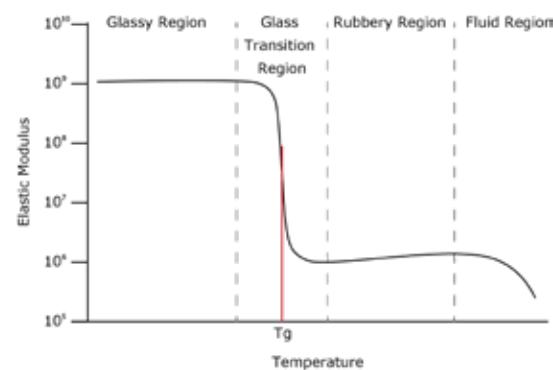
本研究で主に用いるマテリアルはユニチカ株式会社により開発されている感温性フィラメントである。本フィラメントは形状記憶の性質を持つ合成ポリマーである。[12]



図 4.1.1: 感温性フィラメントのイメージ

この材料は以下の5つの特徴を持つ[13]。

1. 融点以上で造形された形状を記憶する
2. 造形後、ガラス転移点 (Tg) 以上にあたたまるとやわらかくなる
3. やわらかくなった造形物に形状の変形を加えることが可能
4. 変形させた状態で冷ますと形状固定する
5. 再び温めることでやわらかくなるとともに、記憶した元形状に戻る



図：温度遷移とそれに伴う性質変化のグラフ

本研究では、満開の状態の花を出力し、やわらかくなった造形物に形状の変形を加えることが可能という特徴を利用して蕾に変形させ、再び温めることでやわらかくなるとともに、記憶した元形状に戻る特徴によって開花のような表現を実現している。

4.2 水溶性フィラメント

もう1種類本研究で用いる材料は、三菱ケミカルホールディングスグループ日本合成化学より発売されている水溶性フィラメント、「MELFIL™」である。本フィラメントは変形ポリビニルアルコール系樹脂でできており、主な特徴である水溶性を活かしたサポート材への利用がなされることが多い。



図 4.2.1：水溶性フィラメントの使用例の図

本研究では主に花の中心部を本フィラメントで制作し、水溶性の性質を利用して花びらがバラバラになる表現をした。また、水に濡れると接着性が生まれるのを利用し、ガラス壁面への接着を行った作品もある。

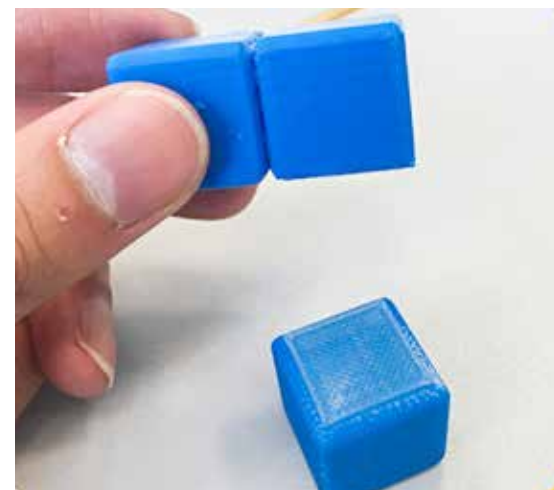


図 4.2.2：水溶性フィラメントの使用例の図。接着性を利用して2つの立方体 3D モデルを接着している

5. 研究手法

本研究は以下の2つの手法を行き来することによって進められる。

1. 時間によって形状が有機的に移ろう 4D モデルの構造開発
2. 構造開発を用いた表現と制作

6. 構造開発

本章では感温性フィラメントにおける3D モデルの構造開発を記述する。

一般に、3D プリントモデルはその外形を決める外部のデザインと、外形を埋める内部の構造デザインによって成立する。通常の3D プリントは外部形状が重要で内部の充填は軽視されるが、本フィラメントのような機能性を持つ材料はその両方が重要となってくる。

ここでは、外部構造と内部構造に分けて記述する。

6.1 外部構造

本研究では感温性フィラメントを単一、もしくは異なるガラス転移点をもつ感温性フィラメントを層状に組み合わせることによって有機的な表現を実現している。

表のように、従来の3D プリンティングは温度の変化が起きてもその形状に変化は生まれない。一方感温性フィラメントを1種用いることで一定の温度をきかけとして形状に変化が生まれる。これが2種、3種と増えていくとそのモデルの形状変化のタイミングも増えていく。

	t<30℃	30℃≤t<35℃	35℃≤t
従来の3D プリント			
感温性 1 種 1 層			
感温性 2 種 2 層			

図：従来の3D プリンティング、感温性フィラメント1種1層、感温性フィラメント2種2層の動きの比較図。白い層はガラス転移点が30℃のもの、黒い層はガラス転移点が35℃のものを表す。

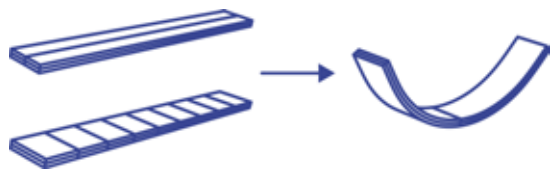
複数の感温性フィラメントを組み合わせるときに重要なのは、互いが互いの動的变化を遮らないことである。たとえ一つの材料がガラス転移点を超えても、上層または下層の材料がガラス転移点を下回った場合、下回っている層の硬さが上回っている層の形状変化を遮り、動きが生まれない。複数のガラス転移点を持つ材料を積み重ねる形で組み合わせる場合は最も低いガラス転移点をもつ材料を最下層とする。

6.2 内部構造

既記の通り、感温性フィラメントは出力した形を記憶する。

具体的に何を記憶しているかというところ「出力時の樹脂の方向」であり、すなわち「3Dモデルをどのようにスライスするか」が感温性フィラメントが記憶する形状を定めている。

樹脂の出力方向は、出力後に変形する方向に平行に近ければ近いほど、元の形に戻ろうとする力が働きやすい。



図：3Dモデルのスライス方向と曲げの図

上図は直方体の二種類のスライス方法とその後の変形を示す。元の形に戻ろうとする力が働きやすいのは上の平行なスライスモデルである。

後述する、花のような表現や制作を行う際には花の中心から外側に向かって、花弁の縁と平行にパスを描くようにスライスする。

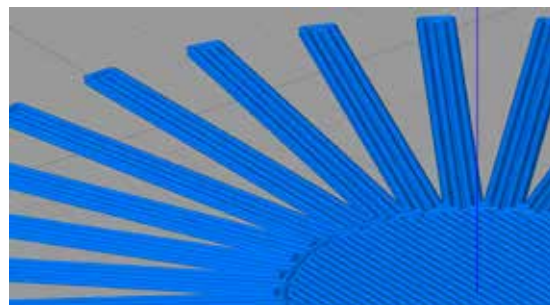


図 6.2.2：3Dモデルスライサー "Simplify 3D" でのスライシングの様子

7. 表現

構造のデザインの研究を用い、卒業制作を含む3つの作品を制作した。

この章ではそれらの作品のコンセプトと用いた材料を時系列に紹介する。

7.1 4D Printed Nature

本作品は田中浩也研究室所属の名倉泰生と2018年3月に制作した壁面型インスタレーション作品である。

※建物の壁面に花型のモジュールを設置、気温や気候によって形状や色に変化することで自然のように景観に変化を加え、自然とインタラクションを起こす作品。気温が30℃を超えると開花し色が薄くなり、雨が降りガラス面に雨水が流れると花が落下し池に落ちるようになっている。花びらの部分は感温性フィラメントでできている。中心部に使われたのは自作のフィラメントである。販売されているポリビニルアルコール (PVA) フィラメントをペレット状にし、そこに金魚の餌を混ぜ、再びフィラメントの形状に戻す。そうすることで、花が池に落下したあとは金魚が中心部を食べ、かつPVAが水に溶けることによってモジュールがバラされていく。

本作品は、作品設置後から起こるあらゆるインタラクションから徹底的に人間を排除し、花が咲き、落ち、散っていく変化が全て自然の移ろいや積極的介入によって起こる、新しいインタラクションアートである。

(<https://vimeo.com/259768127>)



図：4D Printed Nature の映像よりスクリーンショット

使用する材料、道具

1. 花

FDM 式 3D プリンタ

・感温性フィラメント

(ガラス転移点 35℃)

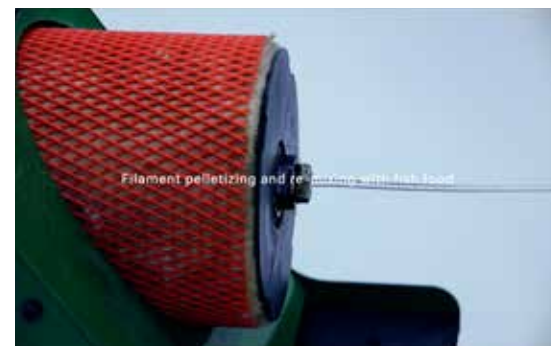
・金魚の餌入水溶性フィラメント

2. 窓の模様

窓枠式 3D プリンタ

3. その他

・金魚



図：金魚の餌入りフィラメントを作る様子

7.2 4D Printed Sketch Work

本作品は環境情報学部所属の勝沼千秋と2018年12月に制作したものである。

本作品は、4D プリンティングが既存の花の絵画の描写手法の代替になるという仮定から始まっている。

花の絵画は昔から多くの国で愛されてきた。しかしながら絵画の中の花は実世界の花のように蕾が花開いたり、咲いた花が散ったりなどの変化をすることはなく、時間のなかで変化する形状や色そのものにあり、今までの絵画にはそれが表現できなかったが4D プリンティングを用いることで可能になるのではないかという挑戦だ。

本作品ではガラス転移点が 30 度、35 度、40 度の感温性フィラメントを組み合わせ、3 度の変化のタイミングを与えた。部屋が暖くなるにつれて、茎が立ち上がり、花が2段階に花開く。室内にて絵画の花の移ろいを楽しんでもらうことを実現した。

使用する材料、道具

1. 花

FDM 式 3D プリンタ

・感温性フィラメント

(ガラス転移点 30℃ , 35℃ , 40℃)

・PLA

2. その他

・額縁 (アクリル板つき)

・アクリルガッシュ

・塗装道具一式

・3D ペン



図：3 段階の変化を起こす絵画の様子

7.3 4D Flower

本作品は日産自動車のデザイナーである池田篤士氏、花岡大輔氏、高木陽介氏らと2019年1月に制作した。2019年1月12から25日にGOOD DESIGN MARUNOUCHIにて開催された企画展示「1kg展」にて展示された。



図：「1kg展」の様子



図：作品「4D Flower」の写真

本作品は4Dプリンティングの技術を用い、1日の流れの中で花が蕾から満開になり、やがて雨により散っていく時の流れを表現したものである。

花が3輪並んだ本作品は、左から昨日、今日、明日の姿を表しており、一つの什器の中で時の流れとそれの表れが同居している。この表現は古く、絵巻に用いられた「異時同図法」に一致する。「異時同図法」とは、異なる時間における人物のふるまいを一つの絵に描く構図法で、効果的な時間表現を可能にしている[15][16]

感温性フィラメントによって造られた花卉が熱によって開くことで蕾はやがて満開を迎える。開花にかかる時間はおよそ45分で、肉眼で分かるか分からないかのゆっくりとした速度だ。



図：開花中の作品の姿

満開になったあとの花には雨が降る。水溶性フィラメントでできた花托が濡れることで少しずつ溶けていき、花托に挿された花卉がそれに伴いはらはらと散る。散花にかかる時間はおよそ2時間だ。花のかたちは月下美人（ゲッカビジン）と呼ばれる多肉植物をモチーフにしている。この花は夏の夜に一晩だけ花開き、数時間でしおれてしまうことで知られ、本作品のイメージに沿うとして参考にした。[17]

(<https://vimeo.com/313949256>)

使用する材料、道具

1. 花

FDM 式 3D プリンタ

- ・感温性フィラメント（ガラス転移点 30℃,35℃,40℃,45℃）
- ・水溶性フィラメント

2. 茎, 葉

粉末焼結 (SLS) 式 3D プリンタ

- ・ナイロン粉末

3. 瓶

光造形 (DLP) 式 3D プリンタ

- ・紫外線硬化樹脂

4. 熱源

ハロゲン電球 (40W)

7.3.1 制作

1. 花のデザイン

本作品は複数のデザイナーによる共同制作であり、筆者は主に花と花形状の変化のデザインを担当した。意匠の面では、花は本物の植物らしさとフィクションならではの抽象度が織り交ざるようデザインし、機能面では開花と散花の動きが実現するよう設計した。本章では意匠、機能の2つの章に分けデザインプロセスとその工夫について記述する。

1.1 意匠性

- ・上から見たときの花卉の角度

植物の葉が茎につく形状には一定の順序がありその配列のことを「葉序」という。[18] 葉序は太陽の光を多く浴びるために最適化されており、植物の中心から螺旋状の曲線を描いて生える。多くの植物の葉の開度（回転数 / 葉の数）の法則にはフィボナッチ数が見られ、その究極的な「黄金角度」は 137.51°であるという。

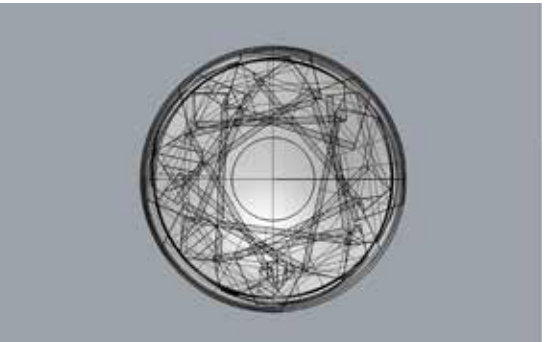
開度	開度(角度)	主 な 植 物 例
$\frac{1}{2}$	180.00°	ニレ, シナノキ, イネ
$\frac{1}{3}$	120.00°	ブナ, ハシバミ, クロイチゴ
$\frac{2}{5}$	144.00°	サクラ, リンゴ, カシ, アカザ
$\frac{3}{8}$	135.00°	ボブラ, ナシ, オオバコ
$\frac{5}{13}$	138.46°	ヤナギ, アーモンド, タンポポ
$\frac{8}{21}$	137.14°	ヒメムカシ, ヨモギ, ノジオギク
...		
ϕ^{-2}	137.51° (黄金角)	黄金角で与えられる黄金植物

図 7.3.1.1：開度と主な植物の例

本作品ではその黄金角を採用し、花卉を 137.51°ずつ回転しながら配置することで、実際の植物のような形状を実現した。元来は意匠性の為に「黄金角」をデザインに採用したが、結果として熱によって花を開花させる際に花卉を均一に温めることができ、機能面から評価しても適切なデザインであったと言える。



図：プロトタイプ段階の本作品。螺旋状に均等に花卉が配置されているのがわかる



図：花卉を黄金角で配置するために切れ込みの入った花托

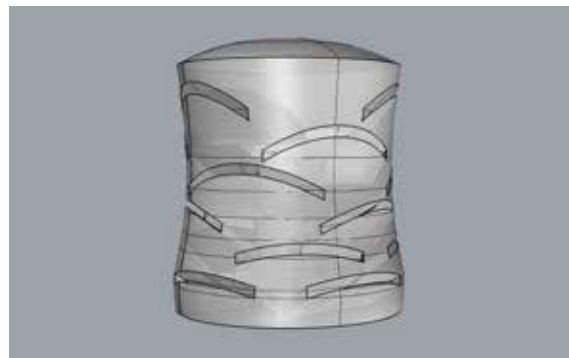
・横から見たとき花卉の角度

花を上から見た時の中心からの回転角度は記した通りであるが、ここでは花を真横から見た時の花卉の角度について記述する。

蕾の状態の花卉の角度を 90° としたとき、多くの花は満開を迎えたときにその角度が 0° まで広がることはない。多くは緩やかな鋭角を描き、横から見た時のその姿は美しい。本作品でも、プロトタイプ



図：花托に対し垂直に花卉を挿したプロトタイプと、改善後の開花した様子



図：層ごとに角度の異なる花托の様子

花びらを 0° に挿していたが、満開時の不自然さより角度をつけた。花卉は6層に分かれており、より花の立体感を出すために層ごとに花卉の角度を変えている。最も内側の層を1層目とし以降 n 層目と表すと、層ごとの角度は $(48 - 3n)^\circ$ である。

この角度は花托に設計された花卉を挿すための切れ込みの角度によって調整される。



・花脈

花卉には葉同様に脈のようなものが見られ、これは花脈と呼ばれる [19]



図 7.3.1.7：蓮の花脈の様子

実際の花脈は、花によっては目で観測出来ない程度の細さ、薄さである。本作品ではテーマの一つである「儚さ」を表現するためにこの花脈を中心としたデザインにした。そのため、本作品の花卉には面がなく、縁と花脈のみで構成されている。一本の花脈の幅は 0.46mm 、厚みは 0.2mm である。



図 7.3.1.8：本作品の花脈の様子

・花托の内部構造

水溶性でできた花托は溶ける過程でその内部構造が露わになり、その際にもっともらしい姿を保つ必要がある。筆者は既存の充填パターンより最も有機的に感じたハニカム構造を選んだ。

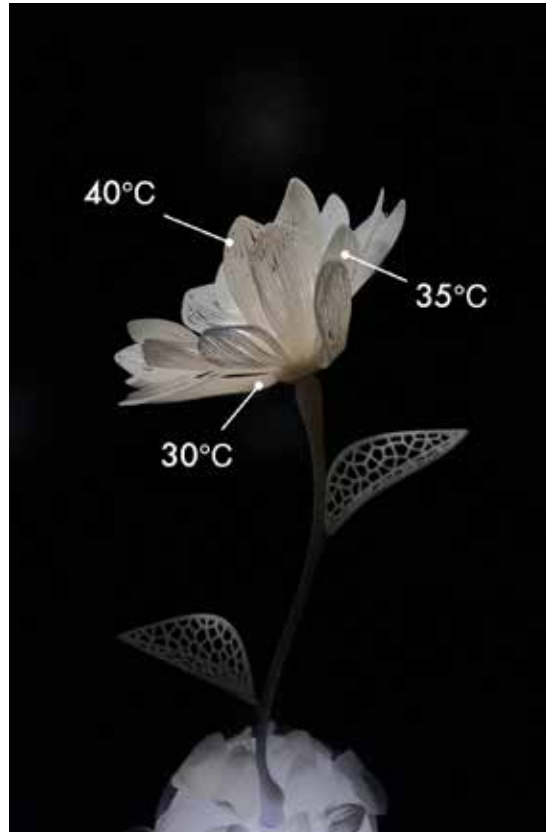


図：花托が溶けて内部構造が露わになった様子

1.2 機能性

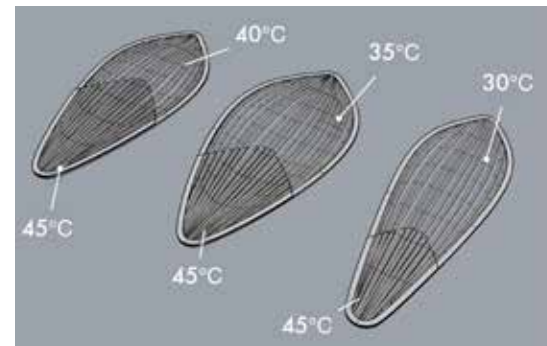
1.2.1 開花

本作品では一つの花の中で複数のガラス転移温度をもつ感温性フィラメントを組み合わせることで成立している。



図：使用した感温性フィラメントのガラス転移点の図

花卉は6層に分かれており、外側の花卉から花開くようにマテリアルが配置されている。最も内側の花卉の層を1層目とした時、1,2層目にはガラス転移点が40°Cの感温性フィラメント、3,4層目には35°C、5,6層目には30°Cのものをを用いている。また、開花の際に熱によって花卉が垂れすぎないように、全ての花卉の根元にはガラス転移点が45°Cでできた層を1層出力している。



図：モデリングソフト上のマテリアルの割当

1.2.2 散花

水溶性フィラメントでできた花托が溶けることで花が散る本作品。溶けるスピードを決めているのは花托の充填である。今回は水が上部から垂れてくるため、花托の上部が薄くなるよう充填率を設定することで、水が内部にすばやく浸透するようになる。



図：花卉が散る様子

2. 什器

本作品では熱源としてハロゲン電球を用いることでモデルを熱している。

什器に組み込まれたハロゲン電球は、ナットの位置を上下させることによってモデルからの距離を変えることができるようになっており、それにより温まるスピードを調整することができる。



図：什器の裏側の様子

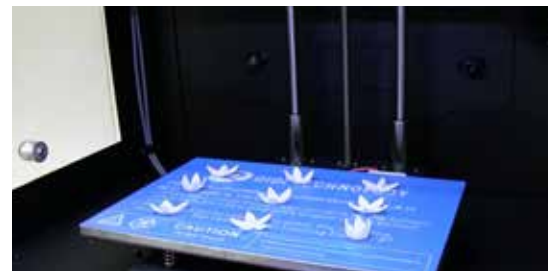
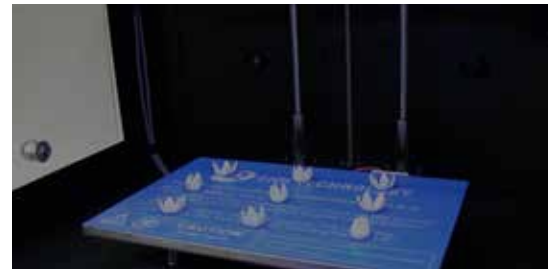
習作たち ...

これまで幾つかの作品を制作したが、実際の作品が出来上がるまでに構造のテストや形状の確認のためのプロトタイプを幾度も重ねて来ている。これらを作品未満の「習作」と呼び、ここにて時系列で紹介する。

1.3D プリンタ上で動く 3D モデル

4D プリンティングの研究、制作を始めた当初の様子。感温性フィラメントによって3D プリントしたモデルを変形させ、再び3D プリンタに戻すことでヒートベッドの熱によって有機的に形を変えろといったものだ。

三枚目の図は、フレキシブルフィラメントと感温性フィラメントを組み合わせお湯の中で動く生物を制作した。



2. ユニチカ社「感温性フィラメント」 プロモーションムービー



材料提供を受けていたユニチカ株式会社の材料PR動画に出演、ならびに3Dモデルの提供を行った。

3. 多段階に動く 3D モデル

これまで単一だった動きを多段階的にするべく行ったプロトタイプ。

ガラス転移点が 30 度,35 度の感温性フィラメントを組み合わせている。

卒業制作である 4D Flower の先駆けとなる実験。



8. 評価

8.1 取り組み

本研究の取り組みは「1kg 展」にて国内で初めて 4D プリンティングの応用を一般に公開したことで評価される。

8.2 耐候性

屋外での作品展示の際の耐候性に関する評価は以下のとおりである。

1. 実験条件

実施期間

2018 年 7 月 9 日～7 月 16 日

実施場所

SUBWAY 慶應大学 SFC 店

天候

- 期間中降水量 0
- 期間中最高気温 31.5°C
- 期間中最低気温 23.8°C
- 期間中平均気温 27.16°C
- 最大瞬間風速 9.7m/s
- 合計日照時間 66.3 時間

2. 実験結果

期間中のモジュールの落下は見られず、同条件の場合には水溶性フィラメントのガラス面への接着は問題なく、正常に展示できるといえる。気温による形状の変化も正常にあらわれた。しかしながら感温性フィラメントに含まれる変色インクが開始 5 日頃から薄くなってしまい、製造元に問い合わせたところ紫外線に耐性のないインクであるとのことだった。無着色の感温性フィラメントを用いた同条件の展示は正常に行うことができるといえる。



図：展示および耐候実験の様子

9. まとめと展望

これまでおよそ2年間、4D プリンティング技術の探求と制作活動に取り組んできた。

既記の通り、材料としては存在していても、その表現については未だ開拓の余地があった本領域に、研究と表現という2つの異なる手法をもって切り込むことで3D プリンティングそのものの可能性を拡大することできたと感じる。

振り返るとこれまでの取り組みの中で最も印象的だったのは、展示「1kg 展」にて自ら作った作品を見つめる皆の姿である。最終日の夜、“4D Flower”を囲う6,7人の人々は一言も発することなく、その緩やかな開花をじっと見守っていた。その場だけ切り取られたかのような不思議な時間が流れており、作品を囲う人々にはある種の連帯感のようなものさえ感じられた。それは、3D プリントされたものに対する全く新しい形の鑑賞スタイルであった。

本研究において実際に第三者の鑑賞態度まで観察できたのは“4D Flower”のみであったが、それ以前に制作した、屋外の気候の移り変わりと共に楽しむ作品(4D Printed Nature)と室内の温度の変化と共に楽しむ作品(4D Printed Sketch Work)に関しても、そのスピードと、置かれた環境、トリガーのコントロールしきれなさから、きっとまたそれぞれで新しい人と作品の関係が生じるに違いない。

では、4D プリンティングを用いて作り手が提供できる「心地よい鑑賞体験」の要素は一体何か。それは、1. よいかたち 2. よいうごき 3. よいスピードの3つであると考える。

1. よいかたち

4D プリンティングは、動いている最中は勿論、動く前、動いたあとの姿も全て鑑賞の対象であり、鑑賞者がその対象のどんな瞬間のフレームを切り取ってもうつくしいことが鑑賞に値する条件であると感じる。そしてこの、全フレームに意匠性を求めるデザインはこれまでに要求されてきたデザインとは全く異なるセオリーと細やかな努力が必要であることは言うまでもない。

2. よいうごき

無論、4D プリンティングは静止している状態のほうが魅力的では意味がない。モーターでは実現できないなめらかな動きや時々予測のつかぬ不安定さまでも、魅力的なコンテキストやかたちへのせることで鑑賞者に届く。いきものでもない、つくりものでもない、その間に人々が体験したことのない心地よさがあると感じる。

3. よいスピード

今回制作した“4D Flower”は開花の程度によってそのスピードが異なるモデルであった。それは、開花に伴って熱の当たり方が変わるからであり、蕾から開き始める瞬間が最も速く、満開に近い状態では目で観測するのが難しいほどゆっくりとしか動かない。連日鑑賞者を観察して

いると、微々たるスピードの違いで作品の周りに生まれる空気がまるで異なることがわかる。

速すぎると先に起こることが推測できてしまう。遅すぎると気づくことができない。人の目でなんとか見ることができる、しかし現実世界に存在しない、どこか心地よい「遅さ」があるのでは、と感じさせられた。それを体験として提供するためには、人間が心地よいと感じるメカニズムや、既に心地よいとされる類似した体験の分析も必要となってくるかもしれない。また、鑑賞の対象となるモデルへの工夫は勿論、モデルの動きのトリガーとなる外部要因に対してもより細やかなチューニングが要求されるだろう。

今後の展望は、大きく分けて研究的展望と制作的展望がある。研究的展望としては、感温性フィラメントを用いた可逆的な動きの実現である。現状、本フィラメントを用いた動的表現は不可逆で一方通行である。制作した“4D Printed Nature”や“4D Flower”はある種その儚さを生かした作品となっているが、可逆的な動きが可能となればより多くの表現や鑑賞体験を期待できると考える。

制作的展望としては、より長い期間の中で形が移ろうものを制作したいと考える。自ら定義した4D プリンティングの「心地よい鑑賞体験」を構成する要素のうち最も関心があるのが「よいスピード」である。“4D Flower”の展示にて、分単位の鑑賞時間における「よいスピード」と

呼べるものは、感覚的ではあるが掴めたような感じがしている。より難しく、そしてより豊かなのが長期間に渡る鑑賞体験であると考える。

一過性の体験としてではなく、「暮らすように鑑賞する」あるいは「鑑賞するように暮らす」という体験が生み出せるとしたら、対象と鑑賞者の関係はどういったものになるのか。気づいたら吐く息が白む季節になっていた、起きたらいつもの道に霜柱ができている。初雪が降った、車のフロントガラスが凍った、それが全て溶ける、気づかぬうちに新たな生命が地面から生えている。桜が咲く、あっという間に散っていく。自然には既に「暮らすように鑑賞する」「鑑賞するように暮らす」豊かな現象がいくつもある。自然の豊かさから学びながらも、自然には表現することのできない、無論人工物にも決してない心地よい「遅さ」をもつ美しい鑑賞物を作りたいと考えている。

10. 謝辞

はじめに、本研究をご指導いただいた田中浩也先生に厚くお礼申し上げます。
いつもの確なアドバイスとあたたかい言葉をかけて下さり、大きなプロジェクトや
体外的な活動のチャンスを沢山下さったこと、本当に感謝しています。

3 Dプリンタを殆ど触ったことすらなかった十九の頃から多くのことを優しく教えて
くれた諸先輩方、プロジェクトに協力してくれた勝沼千秋さんや名倉泰生くんを
はじめとした後輩たち、苦楽を共にした卒論同期の大日方伸くん、磯野えりちゃん、
皆と過ごし議論した四年間の研究生生活は財産です。

材料のご提供や研究の相談に乗って下さったユニチカ株式会社の中谷雄俊さん。
慌ただしい研究活動を力強く応援、サポート下さりありがとうございました。
最高のパートナーです。

共に作品を作って下さった日産自動車デザイナーの池田篤士さん、花岡大輔さん、
高木陽介さん。ものづくりのプロとして、人に見せるものを作るとは何たるかを
学ばせて頂きました。素敵な作品と一緒に作ることが出来て本当に嬉しいです。

研究生生活をサポートしてくれた同居人さん、両親、高橋賢くんをはじめとした友人達、
恋人に感謝しています。ひとりひとりが支えでした。本当にありがとうございました。

本研究の一部は教育奨励基金「学習・研究奨励金」ならびにエキセントリック・リサー
チ奨励賞金の助成によります。

2019 年 01 月 29 日
田岡菜

11. 参考文献

[1] S. Tibbits, The emergence of “4D printing”,
[https://www.ted.com/
talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_
printing](https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing) (2019 年 1 月時点参照).

[2]S.Tibbits. 2014. 4D Printing: Multi-Material
Shape Change. Architectural Design Volume 84,
Issue 1.
<https://doi.org/10.1002/ad.1710>

[3]Xiao Kuang Devin J. Roach Jiangtao Wu
Craig M. Hamel Zhen Ding Tiejun Wang Martin
L. Dunn Hang Jerry Qi. 2018. Advances in 4D
Printing: Materials and Applications. Advanced
Functional Materials Volume 29, Issue 2.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>

[4]Quan Zhang, Kai Zhang and Gengkai Hu.
2016. Smart three-dimensional lightweight
structure triggered from a thin composite sheet via
3D printing technique. Scientific Reports volume
6, Article number: 2243.
<https://www.nature.com/articles/srep22431>

[5]Jiangtao Wu, Chao Yuan, Zhen Ding, Michael
Isakov, Yiqi Mao, Tiejun Wang, Martin L.
Dunn and H. Jerry Qi. 2016. Multi-shape active
composites by 3D printing of digital shape
memory polymers. Scientific Reports 6, Article
Number: 24224(2016)
<https://www.nature.com/articles/srep24224>

[6]A. Sydney Gladman, Elisabetta A. Matsumoto,
Ralph G. Nuzzo, L. Mahadevan and Jennifer
A. Lewis. 2016.Biomimetic 4D printing. Nature

Materials volume 15, pages413–418.[https://doi.
org/10.1038/nmat4544](https://doi.org/10.1038/nmat4544)

[7]Byoungkwon An, Ye Tao, Jianzhe Gu, Tingyu
Cheng, Xiang Anthony Chen, Xiaoxiao Zhang, Wei
Zhao, Youngwook Do, Shigeo Takahashi, Hsiang-
Yun Wu, Teng Zhang and Lining YaoPsy. 2018.
Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-
Folding Materials and Interfaces. Proceedings of
the 2018 CHI Conference on Human Factors in
Computing Systems – CHI ’18: Paper No. 260.
<https://doi.org/10.1145/3173574.3173834>

[8]Farhang Momeni, Seyed M. Mehdi Hassani.
N, Xun Liu and Jun Ni. 2017. A review of 4D
Printing. Materials & Design Volume 122: Pages
42-79.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>

[9]Yiqi Mao, Michael S. Isakov, Jiangtao Wu,
Martin L. Dunn and H. Jerry Qi. Sequential Self-
Folding Structures by 3D Printed Digital Shape
Memory Polymers. 2015. Scientific Reports 5,
Article Number: 13616(2015)
<https://www.nature.com/articles/srep13616>

[10]Joanne Ee Mei Teoh, Yue Zhao, Jia An,
Chee Kai Chua and Yong Liu. 2017. Multi-stage
responsive 4D printed smart structure through
varying geometric thickness of shape memory
polymer. Smart Materials and Structures Volume
26: Number 12.
[http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-
665X/aa908a](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aa908a)

[11] Qi Ge, Amir Hosein Sakhaei, Howon Lee, Conner K. Dunn, Nicholas X. Fang & Martin L. Dunn. 2016. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. Scientific Reports 6, Article Number: 31110(2016)
<https://www.nature.com/articles/srep31110>

[12] 3D プリント用 ” 感温性 ” フィラメント - ユニチカ
http://www.unitika.co.jp/news/fiber/post_42.html

[13] 形状記憶ポリマー (SMP) フィラメント - 造形後に加熱して、形状のカスタマイズが可能 -
<http://www.kr.k.co.jp/wp-content/uploads/37e3726f9bfb02d3c9381520b4fa54c3.pdf>

[14] 3D プリント用水溶性フィラメント MELFIL | 日本合成化学
<http://www.nichigo.co.jp/melfil/>

[15] 楊曉捷 (2012) 「絵巻の文法序説 - 『後三年合戦絵詞』を手掛かりに -」, 『日本研究』第 46 巻, 国際日本文化研究センター.
<http://202.231.40.34/jpub/pdf/js/IN4601.pdf>

[16] 「細田守 冒険するアニメーション」, 『SWITCH』Vol.33, 出版社スイッチ・パブリッシング

[17] 内海俊策 (2002) 「花はなぜ美しいか 1. 昆虫と受粉」, 『千葉大学教育学部研究紀要』
<https://core.ac.uk/download/pdf/96956573.pdf>

[18] 佐藤修一 (1997) 「植物の形態にひそむフィボナッチ数と黄金比に関する考察」, 『理学専攻科雑誌』39(2), 東京理科大学, 『日本数学教育学会誌・臨時増刊, 総会特集号』79, 公益社団法人日本数学教育学会.

[19] 栗田正秀 (2003) 『植物解剖学用語辞典 (改訂版)』つつじ会.

12. 図引用元

図 2.1 4D Printing – All You Need to Know in 2018 <https://all3dp.com/1/4d-printing/>

図 2.2 参考文献 [2]

図 2.3: 参考文献 [3]

図 2.4: 参考文献 {4}

図 2.5: 参考文献 [5]

図 2.6: 参考文献 [6]

図 4.1.1: 参考文献 [12]

図 4.2.1: 参考文献 [14]

図 4.2.2: 参考文献 [14]

図 8.3.?: 参考文献 [12]

図 8.3.1.4: John D. 氏撮影の "lotus"
<https://flic.kr/p/3ACE7>