

# Conference on 4D and Functional Fabrication 2020

– New Paradigm over 3D Technology –



2020年10月15日(木) 13:00 - 17:05,  
2020年10月16日(金) 9:15 - 17:30  
オンライン開催

主催 慶應義塾大学SFC研究所ファブ地球社会コンソーシアム / (一社)日本画像学会4DFF研究会 共催

後援 画像関連学会連合会, やわらか3D共創コンソーシアム

# Conference on 4D and Functional Fabrication 2020

## ~ New Paradigm over 3D Technology ~

### Technical Program

10月15日(木)

13:00 - 13:05

#### Opening Remark

4DFF2020 大会実行委員長 古川 英光 (山形大学)

13:05 - 13:30

#### 招待講演

座長: 藤井 雅彦 (inkcube.org)

**IN-01** ソフト材料開発と3D プリント技術で拓くソフトマターロボティクスの分野横断的統合アプローチ

小川 純

(山形大学) 3

13:30 - 14:30

#### Session1

#### マテリアルデザイン・FAB プロセス(1)

座長: 湯浅 亮平 (キヨーラク株式会社)

13:30

**OP-01** 振動透過抑制可能な複合材ラティス構造

船場 海斗<sup>1</sup>, 水上 孝一<sup>1</sup>, 古賀 洋一郎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 愛媛大学, <sup>2</sup> 株式会社 3D Printing Corporation) 7

13:50

**OP-02** Ashby map を用いた 3D Print 可能な architected structures の特性把握

岡崎 太祐, 浅野 義弘, 櫻井 智子, 常盤 拓司, 仲谷 正史, 田中浩也

(慶應義塾大学) 11

14:10

**OP-03** 原子配列を模倣した双安定性構造の有限要素法による力学特性最適化

鐘ヶ江 壮介, 奥川 将行, 小泉 雄一郎

(大阪大学大学院) 15

14:35 - 15:35

#### Session2

#### 加飾・新工法の提案

座長: 高橋 茂樹 (山形大学)

14:35

**OP-04** オンデマンド溶融熱転写プリンタによる機能性加飾印刷

鈴木 健太, 渡辺 将仁, 小林 浩, 寺尾 博年

(アルプスアルパイン株式会社) 17

14:55

**OP-05** 3D プリンタへの物理的振動付与によるテクスチャ生成の応用可能性

荒井 将来<sup>1</sup>, 田中浩也<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院, <sup>2</sup> 慶應義塾大学) 19

15:15

**OP-06** Graftin' Craftin': 接ぎ木と針金かけを用いた樹木の生長過程での形状制御による収穫可能な動的機構の生成手法

千葉 一磨, 橋田 朋子

(早稲田大学大学院) 23

15:40 - 16:40

## Session3

## 4DFF アプリケーション: 食品

座長: 市原 政喜 (市原国際特許事務所)

15:40

**OP-07** RepRap ベースの 3D フードプリンターの開発

茂木 勇志<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>  
 (^1 山形大学, ^2 山形大学大学院) 27

16:00

**OP-08** RepRap SWIM-ER を用いたゲル食品サンプル

亀岡 将成<sup>1</sup>, 茂木 勇志<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>,  
 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>, 王 忠奎<sup>3</sup>, 平 井 慎一<sup>4</sup>

(^1 山形大学, ^2 山形大学大学院, ^3 立命館大学総合科学技術研究機構, ^4 立命館大学) 31

16:20

**OP-09** 代替食品における 3D フードプリンターの活用

倉持 丘帆<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>  
 (^1 山形大学, ^2 山形大学大学院) 35

16:40

**OP-10** Functgraph の応用と機能生成の考察

黒木 優人, 渡邊 恵太  
 (明治大学) 37

17:00 - 17:05

## 大会実行員会からの連絡

10月16日(金)

09:15 - 09:20

大会実行委員会からの連絡

09:20 - 10:00

基調講演

座長:古川 英光 (山形大学)

- KN-01** AMを核としたものづくりの未来 - 量産社会の常識から逃れるということ  
山中 俊治

(東京大学 生産技術研究所) 1

10:05 - 11:25

Session4

## 社会実装・社会課題にむけて

座長:山岡 潤一 (慶應義塾大学)

- 10:05  
**OP-11** COVID-19下における3Dプリントによるフェイスシールド製造のムーブメントの調査  
青木 まゆみ<sup>1</sup>, 常盤 拓司<sup>1</sup>, 宮川 祥子<sup>1</sup>, 吉岡 純希<sup>1</sup>, 道用 大介<sup>2</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>慶應義塾大学, <sup>2</sup>神奈川大学) 41
- 10:25  
**OP-12** 3Dデジタル装具の社会実装にむけて  
上田 雄一<sup>1,2</sup>, 森田 淳<sup>1</sup>, 光部 貴士<sup>1</sup>  
(JSR 株式会社, <sup>2</sup>ラピセラ株式会社) 47
- 10:45  
**OP-13** 3Dゲルプリンター"Rep Rap SWIM-ER"の社会実装  
横江 一真<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>山形大学, <sup>2</sup>山形大学大学院) 49
- 11:05  
**OP-14** こどもたちの目を3Dデジタルものづくりに! 業界を挙げたファミリーマーケティング実践の提案  
三野 晃一  
(一般社団法人障害者・高齢者3Dプリンタファクトリー) 53

11:25 – 11:45

## 4DFF研究会協賛団体活動紹介

12:45 - 13:10

## ショーケース:動画による研究成果紹介

13:10 – 14:20

ショーケース:研究成果発表と議論(@zoom会議室)  
(各発表のzoom会議室URLは別紙参照)

- SC-01** インクジェット型AMにおける透明樹脂積層界面の光学的性質  
山崎 淳<sup>1</sup>, 古宇田 光<sup>1</sup>, 松本 宗久<sup>2</sup>, 菊地 健一<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>高エネルギー加速器研究機構, <sup>3</sup>丸紅情報システムズ株式会社) 57
- SC-02** 外形形状と内部構造を自由に制御可能な、3D設計・造形一貫型システムの開発  
森田 淳, 中村 和洋, 上田 雄一  
(JSR 株式会社) 59

- SC-04** ヘリカルハニカム構造体の提案  
譜久原 尚樹 (日本アグフア・ゲバート株式会社) 63
- SC-05** Differential Growth Model を用いた建築スケール 3D プリンティングへの通気性付与  
名倉 泰生<sup>1</sup>, 青山 新<sup>2</sup>, 河井 萌<sup>1</sup>, 知念 司泰<sup>1</sup>, 松木 南々花<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 慶應義塾大学, <sup>2</sup> 慶應義塾大学大学院) 65
- SC-06** ボロノイ構造を用いた水の表面張力による環境呼応ファサードの提案  
河井 萌<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>, 大野 定俊<sup>2</sup>, 中島 奈央子<sup>1</sup> (1 慶應義塾大学, 2 株式会社竹中工務店) 69
- SC-07** 機能性タンパク質から味や香りまで、機能性印刷におけるピエゾ式インクジェットヘッドの可能性  
齊藤 衛, 板倉 舞, 杉本 雅明 (エレファンテック株式会社) 73
- SC-08** 家庭用プリンターに対するインク粘度調整用ヒーター搭載の試み  
森 真怜, 高橋 啓太, 齊藤 衛, 杉本 雅明 (エレファンテック株式会社) 77
- SC-09** 家庭用プリンターに対する UV インク硬化用 LED ランプ搭載の試み  
高橋 啓太, 森 真怜, 齊藤 衛, 杉本 雅明 (エレファンテック株式会社) 81

14:25 - 15:45

## Session 5

## マテリアルデザイン・FAB プロセス(2)

座長:古賀 洋一郎 (3D Printing Corporation)

14:25

- OP-15** 形状保持・書き換えが可能な面状物体の設計と制御に関する検討  
久保木 仁美, 篠 康明 (東京大学) 85

14:45

- OP-16** トレーシングペーパーへの防水加工による吸湿変形の制御と表現  
高橋 明日香, 西條 瞳, 渡邊恵太 (明治大学) 89

15:05

- OP-17** ゲルを用いた摺動デバイスの研究  
佐藤 大介<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> 山形大学, <sup>2</sup> 山形大学大学院) 93

15:25

- OP-18** 磁性材配合樹脂による 3D プリンター造形物内への情報記録における情報記録領域の体積の効果  
ピヤラット シラバパスパコオンウォン, 鈴木 雅洋, 鳥井 秀幸, 上平 員丈 (神奈川工科大学) 97

15:50 – 16:50

## Session 6

## 4DFF アプリケーション: 生活

座長:大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

15:50

- OP-19** パラメトリック・シンセシスを通じたイヌ用義足データのカスタマイゼーションサービスの実装  
佐倉 玲<sup>1</sup>, 櫻井 智子<sup>1</sup>, 島田 旭緒<sup>2</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup> (<sup>1</sup> 慶應義塾大学, <sup>2</sup> 東洋装具医療器具製作所) 99

16:10

- OP-20** ソフト材料を使用した新しい関節の開発  
青山 韶, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナビン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> 山形大学, <sup>2</sup> 山形大学大学院) 103

16:30

**OP-21** PPC(Post Process Customization)により強度の部分的調節を可能とする3Dプリント簡易サポート林 園子<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>2</sup>, 濱中 直樹<sup>3</sup>, 井上 由貴<sup>4</sup>, 中谷 雄俊<sup>5</sup>(<sup>1</sup>慶應義塾大学大学院, <sup>2</sup>慶應義塾大学, <sup>3</sup>合同会社ハマナカデザインスタジオ,<sup>4</sup>横浜労災病院, <sup>5</sup>ユニチカ株式会社)107

16:50 - 17:20

## Special Session

**SP-01** 五輪エンブレムから立体／3Dプリンティングへの幾何学的展開野老 朝雄<sup>1</sup>, 平本知樹<sup>2</sup>, 湯浅亮平<sup>3</sup>, 江口壯哉<sup>4</sup>, 田中 浩也<sup>4</sup>(<sup>1</sup>tokolo.com, <sup>2</sup>株式会社 wip, <sup>3</sup>キヨーラク株式会社, <sup>4</sup>慶應義塾大学) 5

17:20 - 17:30

## 各賞受賞者発表 &amp; Closing Remark

4DFF2020 大会副実行委員長 藤井 雅彦 (inkcube.org)

## 4DFF 研究会協賛団体

1		武藤工業株式会社	<a href="https://www.mutoh.co.jp/3d/index.html">https://www.mutoh.co.jp/3d/index.html</a>
2		KJ ケミカルズ株式会社	<a href="https://www.kjchemicals.co.jp/">https://www.kjchemicals.co.jp/</a>
3		丸紅情報システムズ株式会社	<a href="https://www.marubeni-sys.com/product/manufacturer/">https://www.marubeni-sys.com/product/manufacturer/</a>
4		山形大学 山形大学インクジェット開発センター	<a href="https://inkjet.yz.yamagata-u.ac.jp/yu-ijc/">https://inkjet.yz.yamagata-u.ac.jp/yu-ijc/</a>

4DFF2020 では武藤工業株式会社からの紹介はありません。

## 講演者紹介

## 基調講演

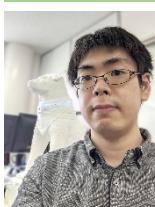


## 中山 俊治 (東京大学 生産技術研究所 教授)

1957年愛媛県生まれ。東京大学工学部卒業後、日産自動車デザインセンター勤務。1987年よりフリーのデザイナーとして独立し、腕時計から鉄道車両に至る幅広い工業製品をデザインする一方、1991年より94年まで東京大学助教授を勤める。1994年にリーディング・エッジ・デザインを設立。2008~2012年慶應義塾大学教授。2013年4月より東京大学教授。

(Photo by Naomi Circus)

## 招待講演



## 小川 純 (山形大学 工学部 准教授)

1988年札幌市生まれ。2015年北海道大学大学院終了。博士(情報科学)。専門はアニメイテッドロボティクス、ソフトマターロボティクス、やわらかいモノから創り出せる知能や演出に興味を持つ。博士号取得後、米国コロンビア大研究員、会津大ロボット事業准教授を経て、2019年より山形大工学部准教授。現在はアクチュエータ、3Dプリント、人工知能など分野横断的にゲル材料の『やわらかさ』を活かす技術開発に着手。ソフトマターロボットの社会実装に向けて、ゲル技術をロボットシステムに統合する研究に挑戦している。

## AMを核としたものづくりの未来 - 量産社会の常識から逃れるということ

山中 俊治

Shunji YAMANAKA

東京大学

University of Tokyo

### 【要約】

私たちは、あまりにもどっぷりと量産社会にいます。消費者としての私たちは好みの椅子を膨大な商品群から買うことができますが、実はどの椅子も「あなたに合わないことはない」範囲で設計されたものに過ぎません。本当の意味であなたの体、あなたの生活にフィットするようデザインされた椅子は今のところ世界のどこにも存在しません。量産社会とは、全ての人が標準的な設計で我慢している社会でもあるのです。

Additive Manufacturingをベースにしたマス・カスタマイゼーション社会を成り立たせるためには、製造プロセスだけでなく、商品企画、設計、コストなどものづくりに関わる様々な概念を見直さなければなりません。作り手としてのあなたが、製品コストと聞いてすぐに生産量、マーケットサイズに頭がいくのも、量産効果が常識になってしまっているからです。

本講演では、私と東京大学山中研究室が開発してきた様々な「未来のものづくりのためのプロトタイプ」を紹介します。私たちの身の回りのモノが、どのように変わっていくのか、皆さんと一緒に考えるきっかけになれば幸いです。



# ソフト材料開発と3Dプリント技術で拓くソフトマターロボティクスの分野横断的統合アプローチ

小川 純

Jun OGAWA

山形大学

Yamagata University

## 【要約】

ソフトマターロボティクスは身体の主要な構成材料にソフト材料を積極的に採用し、能率的にソフト材料を動かす機構・駆動系、柔らかさを認識する感覚器系、ソフト材料特有の表現法などを扱う要素技術の総称である。ソフト材料は「柔らかさ」に起因する弹性や伸縮性、自由曲面への密着性などの変形に係る優れた特徴をもつが、実際に具体的な姿形をもつロボットの技術に転換する場合、非効率的な駆動力伝達や3次元造形の困難さ、時間経過による予期せぬ物性の変化などの欠点が浮き彫りになりやすく、結局は従来の硬い金属やプラスチックで代替されてしまうことが多い。しかし、柔らかく、そして時間で変性する性質にこそ、実際の生物がもつ機能の本質に迫るものがある。また、柔らかいセンサを通して、ソフト材料から得られるデータは動きの識別を容易にする情報を含んでおり、特微量解析を適用することで、高精度なパターン識別器として応用できる。本講演は、このような「ソフト材料を活かす方法」を念頭に置いたこれまでのロボット開発事例を基に、ソフト材料開発から一つの完成されたソフトマターロボットの開発に至るまでに登場する材料科学、機械工学、電子工学、感性工学、情報科学の要素技術を分野横断的に統合するアプローチについて紹介とともに、3Dプリント技術の重要な役割と意義について私見を交えて議論する。



## 五輪エンブレムから立体/3D プリンティングへの幾何学的展開

野老 朝雄<sup>1</sup>, 平本 知樹<sup>2</sup>, 湯浅 亮平<sup>3</sup>, 江口 壮哉<sup>4</sup>, 田中 浩也<sup>4</sup>

Asao TOKOLA<sup>1</sup>, Tomoki HIRAMOTO<sup>2</sup>, Ryohei YUASA<sup>3</sup>, Soya EGUCHI<sup>4</sup>, Hiroya TANAKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tokolo.com, <sup>2</sup>株式会社 wip, <sup>3</sup>キヨーラク株式会社, <sup>4</sup>慶應義塾大学

<sup>1</sup>Tokolo.com, <sup>2</sup>wip inc., <sup>3</sup>Kyoraku Co., Ltd., <sup>4</sup>Keio University

### 【要約】

市松模様で表現された東京 2020 五輪エンブレムは、形の異なる 3 種類の四角形を繋げて円状に表現し「違いを乗り超えてつながり合う」ことを伝えたものでした。

今回、この「つながる幾何学」というコンセプトを踏襲しながらも、平面(2D)から立体(3D)へと次元を上げ、あたらしいカタチを幾何学的に探求していく研究を、3D プリンティングを最大活用しながら行いました。

4DFF2020 のスペシャルセッションでは、このプロセスを五輪エンブレムデザイナーの野老朝雄さんを交えて発表します。



# 振動透過抑制可能な複合材ラティス構造

Composite Lattice Structure for suppression of vibration transmission

船場 海斗<sup>1</sup>, 水上 孝一<sup>1</sup>, 古賀 洋一郎<sup>2</sup>

Kaito FUNABA<sup>1</sup>, Koichi MIZUKAMI<sup>1</sup>, Yoichiro KOGA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>愛媛大学, <sup>2</sup>3D Printing Corporation

<sup>1</sup>Ehime University, <sup>2</sup>3D Printing Corporation

## 【要約】

本研究は、振動抑制が可能なメタマテリアルの材料に連続炭素繊維を使用して、その繊維量が構造の比剛性と振動特性に与える影響を調査したものである。振動抑制を実現するために、反共振を利用した Inertial Amplification というバンドギャップ生成のメカニズムを使用した。連続炭素繊維の量を適切に選択することにより、高い比剛性と広いバンドギャップ幅の両立が可能である。また、材料に炭素繊維の短纖維を含有するナイロンを使用したときに比べ炭素連続繊維を使用することで、比剛性、バンドギャップ幅ともに向上した。

キーワード: メタマテリアル、炭素繊維、振動減衰、バンドギャップ、3D プリンティング

## 【Abstract】

In this study, we made a metamaterial that can suppress vibration transmission with continuous carbon fiber, and the effect of the amount of fiber on the specific stiffness and vibration characteristics of the structure was investigated. In order to realize vibration transmission suppression, we used a bandgap generation system called Inertial Amplification that uses antiresonance. By appropriately selecting the amount of continuous carbon fibers, it is possible to achieve both high specific stiffness and a wide bandgap. Furthermore, the specific stiffness and bandgap width were improved by using continuous carbon fiber compared to when nylon containing short carbon fiber was used as the material.

Keywords:metamaterial, carbon fiber, vibration attenuation, bandgap, 3D printing

## 1. 序論

振動抑制が可能な音響メタマテリアルで、代表的なメカニズムに Bragg 反射と局所共振がある。同じサイズで比較すると、Bragg 反射はバンドギャップの周波数帯は高いが幅が広く、局所共振はバンドギャップの周波数帯は低いが幅が狭いという特徴を持っている。機械振動を抑制したいと考えた場合、低周波に幅広いバンドギャップが要求され、この代表的な 2 つのメカニズムでは困難である。また構造材として使う場合、剛性と軽量性も要求される。

近年、低周波に幅広い周波数帯のバンドギャップを達成するために、反共振を利用して Inertial Amplification(IA)というメカニズムが模索されている。従来、低周波の振動を抑制するには質量を大きくする必要があったが、IA では小さな質量でも低周波で幅広い周波数帯の振動抑制が可能である。この構造を炭素繊維強化プラスチック(CFRP)で印刷し、CFRP が比剛性と振動抑制機能にどのような影響を与えるか調査した。

## 2. 剛性解析

有限要素法ソフトウェア ANSYS を使用して解析を行った。剛性解析の目的は、炭素繊維(CF)の幅を変えたときの構造の剛性を取得し、比剛性を算出することで、その構造の性能を評価することである。

図 2.1 に解析モデルを示す。IA のメカニズムを三角

形の各辺に組み込んだ三角形を  $2 \times 5$  で配置したものである。色によって異なる物性値を定義し、本解析では Onyx と一方向 CFRP を定義した。Onyx とは短纖維の炭素繊維が含有されたナイロンのことであり、Onyx はプリント経路が一方向に揃っている場合と、直交して積層されている場合で、材料物性が異なるため、一方向 Onyx と直交積層 Onyx を使い分ける必要がある。また、CFRP はプリント経路が一方向のときの物性値を定義した。

CFを入れることによる剛性の影響を調べるために、CF と Onyx の 2 種を構成材料とした場合と、Onyx のみを構成材料とした場合の 2 つのモデルで解析を行った。図 2.2 にプリント経路を示す。構成材料を CF と Onyx の 2 種とした場合は、赤色、水色、紫色のエリアにはそれぞれ一方向 CFRP、一方向 Onyx、直交積層 Onyx の物性値を定義した。

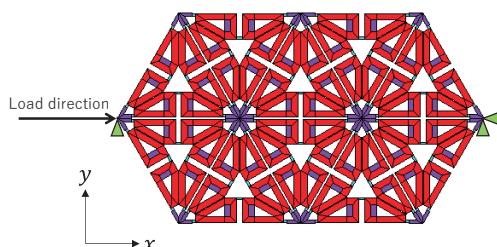


図 2.1. 剛性解析モデル。



得し、波数とそれに対応する固有振動数をグラフにプロットすることにより、分散曲線を取得した。

図 3.4(a)に構成材料を CF と Onyx としたときの分散曲線を示し、図 3.4(b)に構成材料を Onyx のみとしたときの分散曲線を示す。一番低い周波数のバンドギャップに注目するため、以降バンドギャップは一番低周波にあるバンドギャップを指す。図 3.5 に  $b$  の幅を変えたときの、バンドギャップ上限・下限の周波数  $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  を示す。構成材料が CF と Onyx の場合、 $b$  が 0.7 mm 付近までは  $b$  の幅が大きくなるにつれて、 $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  ともに増加し、バンドギャップの幅も広くなっている。しかし、 $b$  は 0.7 mm 以上になると  $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  やびとバンドギャップの幅は少しずつ現象しており、 $b$  の幅はバンドギャップの幅にも影響を与えている。構成材料が Onyx のみの場合も、弾性率が大きく異なるため、 $f_{top}$  のピークの位置に差異が見られるが、曲線としては同じ挙動を示している。

バンドギャップの性能を評価するために、バンドギャップの相対的な広さ BGW [%]を式(3.3)で定義する。

$$BGW [\%] = \frac{f_{top} - f_{bot}}{(f_{top} - f_{bot})/2} \times 100 \quad (3.3)$$

BGW はバンドギャップの幅を、バンドギャップの中心周波数で割った値となっている。バンドギャップの幅が大きく、中心周波数が低いほど大きな値となり、性能が良い。

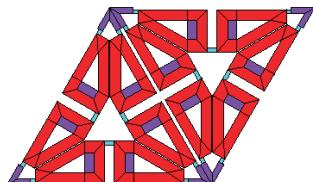


図 3.1. 固有振動数解析モデル。

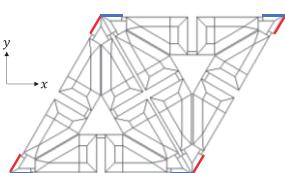


図 3.2. 周期境界条件。

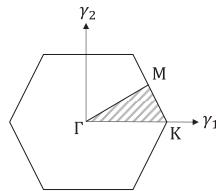
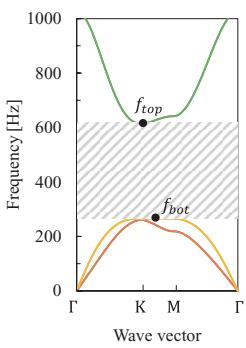
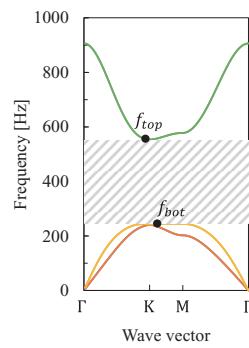


図 3.3. ブリルアンゾーン。



(a) CF and Onyx.



(b) Only Onyx.

図 3.4. 分散曲線 (a)構成材料を CF と Onyx にしたとき。  
(b) 構成材料を Onyx のみにしたとき。

いことを意味する。図 3.6 に  $b$  の幅を変えたときの BGW 値を示す。構成材料が CF と Onyx では、 $b$  が 0.7 mm のとき、BGW は 85.5 %で最大となり Onyx と比べて 1.5 倍に向上している。また、 $b$  が 2 mm を超えると BGW はほぼ収束する。構成材料が Onyx のみのとき BGW にピークは見られないが、 $b$  が 2 mm を超えると BGW はほぼ収束している。これは BGW を変えずに軽量化できることを意味する。

#### 4. 周波数応答解析

周波数応答解析の目的は、バンドギャップと同じ位置で振動減衰が起きているかを確認することである。

図 4.1 に解析モデルを示す。剛性解析のモデルと寸法は同じである。解析モデル左端部を  $x$  軸、 $y$  軸方向にそれぞれ  $10^{-6}$  mm 変位させ、右端部で変位を取得し伝達率を計算した。伝達率は式(4.1)で定義した。

$$(Transmissibility) = 20 \log_{10} \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (4.1)$$

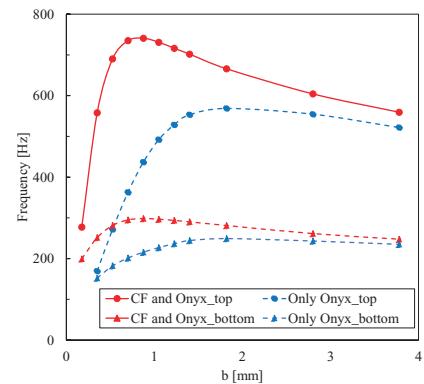


図 3.5.  $b$  の幅とバンドギャップ周波数の関係。

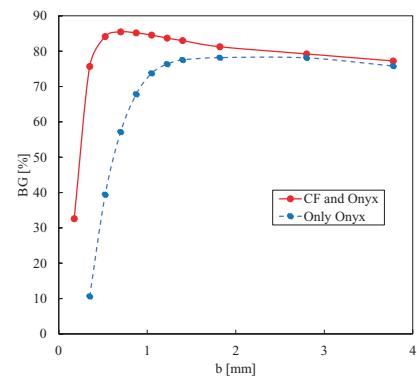


図 3.6.  $b$  の幅と BGW の関係。

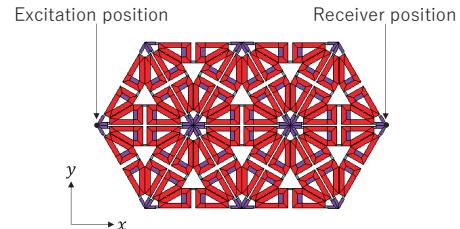


図 4.1. 周波数応答解析モデル。

ここで、 $U_{in}$ は左端部の入力変位、 $U_{out}$ は右端部の変位である。また、 $x$ 軸方向加振の場合は右端部の $y$ 方向変位を0とし、 $y$ 軸方向加振の場合は右端部の $x$ 方向変位を0とした。

図4.2、図4.3に、2つの構成材料パターンの振動透過挙動を示す。材料を変えても、振動減衰できる周波数帯は変わらない。また、分散曲線から得られたバンドギャップの周波数帯と一致している。

## 5. 振動特性実験

$b$ が2.8 mmと3.78 mmの試験体を複合材3DプリンタMark Two(Markforged)でCFを入れて印刷し、振動特性について実験を行った。図5.1に3Dプリンタで作製した、 $b$ が2.8 mmの試験体を示す。加振面を確保するために、端面にコの字型のブロックを印刷した。

試験体のコの字型ブロック部にワックスを塗り、加速度センサを接着した。また、加振器と試験体は糸で吊り、地面やジグに振動が伝わりにくいようにした。

図5.2に実験結果を示す。振動減衰が確認できた周波数帯は、 $b$ を変えてもほぼ同じであった。この結果は固有振動数解析より得られた結果と一致している。しかし、バンドギャップと振動減衰が確認された周波数帯は異なっており、原因として樹脂の吸水やフィラメント付近での空隙により、解析で用いた弾性率が実物と異なる。

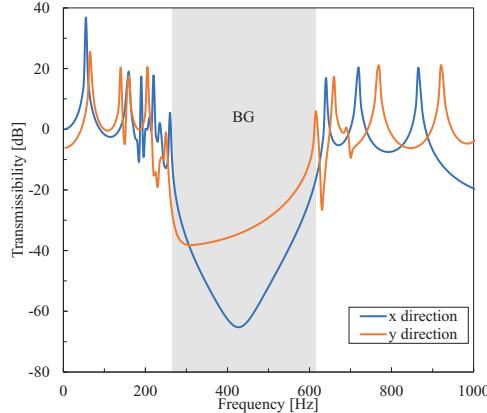


図4.2. 構成材料をCFとOnyxにしたときの周波数応答。

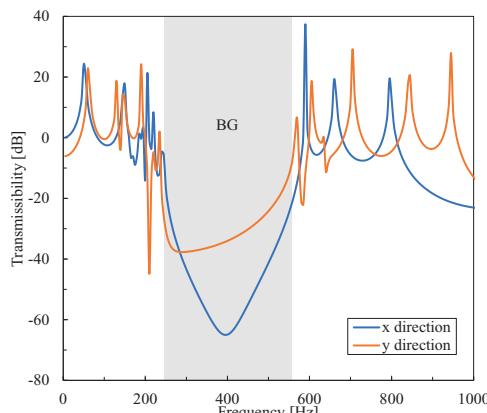


図4.3. 構成材料をOnyxのみにしたときの周波数応答。

っている可能性が考えられる。

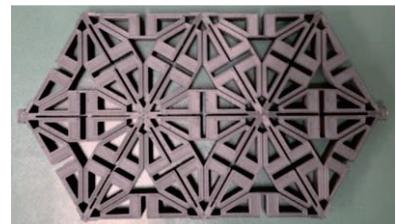


図5.1. CFを使用して作製した試験体。

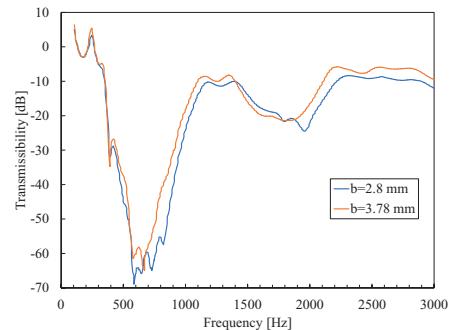


図5.2. 振動特性実験の結果。

## 6. 結論

今回のモデルでは、比剛性が最大となる $b$ の寸法が存在し、CFを入れたモデルの比剛性は、Onyxのみに比べ、1.5倍に向上的する。固有振動数解析ではBGWという式を定義して、バンドギャップの評価を行ったが、剛性解析同様、BGWが最大となる $b$ の寸法が存在する。また、CFを使うことで、 $b$ の幅を小さくできるためさらなる軽量化ができる、高いBGWも得ることができる。周波数応答解析では振動透過挙動が、分散曲線から得られたバンドギャップと一致していることを確認した。

振動特性実験では、 $b$ の幅が異なる2つの試験体で実験を行い、CFを入れたモデルでも振動減衰が可能であることがわかった。

## 参考文献

1. S. Taniker, C. Yilmaz, "Design analysis and experimental investigation of three-dimensional structures with inertial amplification induced vibration stop bands", International Journal of Solids and Structures, (2015), pp.1-10
2. M. Aberg and P. Gudmundson, "The usage of standard finite element codes for computation of dispersion relations in materials with periodic microstructure", Acoustical Society of America, vol. 109, 221907(2016), pp.1-4

## Ashby map を用いた 3DPrint 可能な architected structures の特性把握

Visualizing 3D printable architected structures in Ashby map

岡崎太祐<sup>1</sup>, 浅野義弘<sup>1</sup>, 櫻井智子<sup>2</sup>, 常盤拓司<sup>1</sup>, 仲谷正史<sup>2</sup>, 田中浩也<sup>2</sup>  
Taisuke Okazaki<sup>1</sup>, Yoshihiro Asano<sup>2</sup>, Tomoko Sakurai<sup>2</sup>, Masashi Nakatani<sup>2</sup>, Hiroya Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学政策メディア研究科, <sup>2</sup>慶應義塾大学環境情報学部

<sup>1</sup>Graduate School of Media and Governance, Keio University,

<sup>2</sup> Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

### 【要約】

本研究ではFDM/SLA方式の3Dプリンタと複数のマテリアルを用いてラティス構造の出力を行い、Ashby mapと呼ばれる材料機械特性の比較図の作成を行った。幾何構造の設計変数をパラメトリカルに変えていくことで、材料特性では再現できない機械特性を実現した。Ashby map上で幾何構造、マテリアルごとに計測結果のマッピングを行うことで、条件によって出力可能な機械特性領域を可視化した。これらの知見はラティス構造の設計によって機械特性を変えられることを示しており、試行錯誤の量を減らし、最終アウトプットに近い任意の機械特性のArchitected structureを迅速に選択し設計者を支援するものとして期待される。

キーワード:3D, マテリアル, ラティス構造, 機械特性

### 【Abstract】

In this research, FDM/SLA 3D printers and multiple materials were used to output lattice structures and create comparative maps of material mechanical properties, called Ashby maps. The mechanical properties that cannot be reproduced by the material properties were realized by changing the design variables of the geometric structure parametrically. The mechanical properties that can be output by the Ashby map were visualized by mapping the measurement results for each geometric structure and material.

These findings show that the mechanical properties of a lattice structure can be changed by designing it, which is expected to reduce the amount of trial and error and assist the designer in quickly selecting an architected structure with arbitrary mechanical properties close to the final output.

Keywords:3D, material, lattice structure, mechanical characteristics,

### 1. 序論

3次元幾何学構造を設計することで通常のマテリアルの設計では達成しえない機械特性を達成することできるようになった。このような構造を Architected material と呼び、振動減衰や衝撃緩和などの機械特性を設計している<sup>1,2</sup>。これらの機械特性を比較検討する手法として ashby map<sup>3</sup>と呼ばれる材料マッピング手法が知られている。しかし Architected material が ashby plot に使われる事例では特定の物理課題に限定した形で対して他の

材料より有意であることを示すことに用いられることが多い。本研究では3種のマテリアルと2種の出力技法用いて、製造手法の観点から機械特性のプロットを行うことで設計者に対して Ashby plot を設計の支援ツールとして提供することを目的とした。

### 2. 試験片作成

#### 2.1 ラティス構造の弾性サンプルの作成

本研究ではラティス構造の幾何構造、マテリアル、出力技法の選択によってどのように機械特性が変化するかについて検討した。

##### 2.1a 幾何構造の選定

造形する幾何構造は FDM 造形した事例のある幾何モデル(2019, 櫻井)<sup>4</sup>を参考にした。幾何構造は主に単純立方格子、体心立方格子、面心立方格子が基につくられた。造形手法の印刷制限に応じた6パターンの幾何学構造のモデルで出力を実現した。

##### 2.1b モデリング

試験片のモデルサイズは 30mm × 30mm × 30mm,

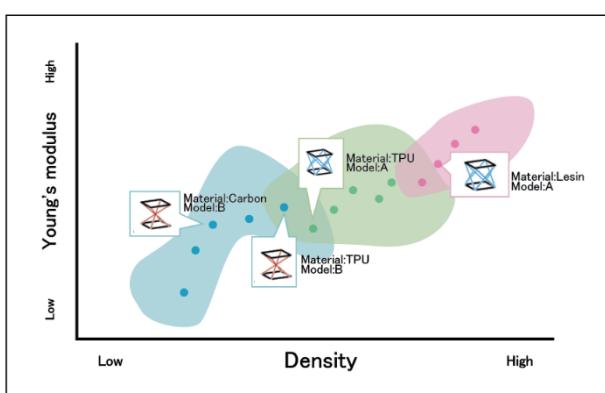


Fig1a. 本研究が狙うデザイン支援のための Ashby map の概念図



Fig.1b 出力する幾何構造

体積 $27\text{cm}^3$ のものを基本にした。櫻井の研究で作成した3Dモデルを援用し、3種類の3Dプリンタで出力した。本研究では、単位格子の格子数( $\text{sq}$ )と柱太さ( $t$ )を変数としてサンプルを作成した。

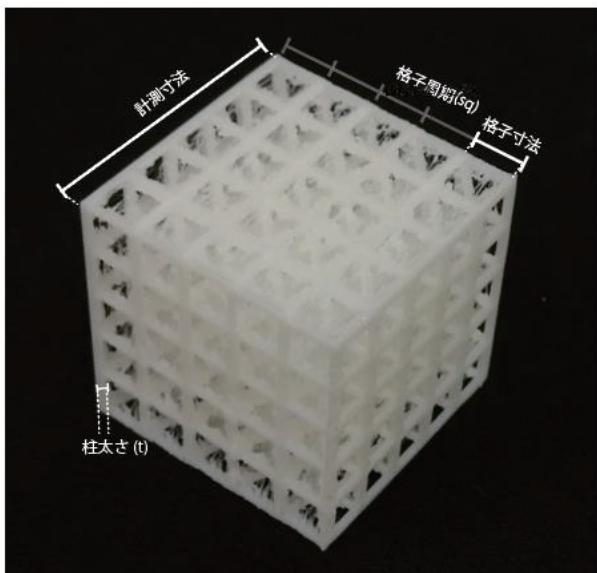


Fig.2 出力物部位名称

### 2.1c 出力

出力には光造形式の3Dプリンタ（Form3）と熱溶解積層型の3Dプリンタ（QIDI TECH 3Dプリンター、L-Devo[ノズル特注品]）と3種の出力素材（Elastic 50A Resin, Fabrial-R filament, SainSmart TPU filament）を用いた。



Fig.3 使用した3Dprinterとマテリアル

造形形式によって出力のできたものについて出力方

法に応じて出力ができた幾何モデルについて Fig4に示した。



Fig.4 実際に出力できたサンプル

## 3. 試験片計測

### 3.1 機械特性の計測

出力したサンプルの機械特性を評価した。造形したサンプルの密度とともに、機械特性の1つとしてヤング率の計測を行った。

### 3.2 ヤング率計測

#### 3.2a 計測機器

計測には Fig5 に示す測定装置 YAWASA MSES-5012-1-SL（テック技販、京都）を用いた。

#### 3.2b 計測条件

計測には 2.1c で出力した3Dプリントされた試験片を用いて行った。標本は定盤の上に乗せられ圧力センサーに球面上のプローブ(30mm)を取り付ける。0.5 mm/s の一定の速度で標本に対して 5 N の荷重に達するまで荷重をかけた。Form 3 で出力したサンプルに対しては、造形の都合上、ラフト面が残るため、この面の上から測定を行った。他の3Dプリンタで出力したサンプルに対しては、積層造形した際の上面から測定を行った。いずれの場合も、5回の測定を行い、推定したヤング率の平均値を計測値として採用した。

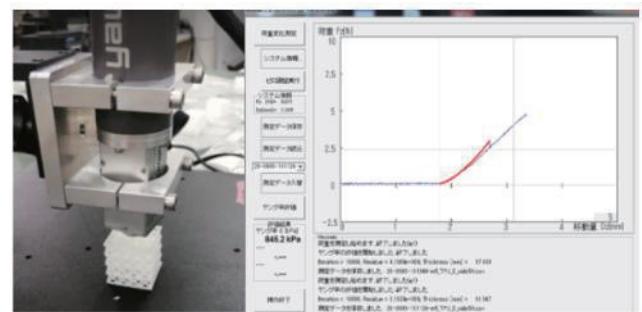


Fig.5 Yawasa での計測と得られるデータ

## 4. 計測結果

計測結果を Fig6 に示す。Fig6a より全体サンプルの傾向として密度とヤング率には正の相関関係がみられることがわかった。また Fabrial-R と TPU は類似した傾向がみられることがわかった。

Fig6b からは R 値が低いことが示されている。このことは標本毎のばらつきが大きいことを示している。Fig6c からはヒステリシスはマテリアルに大きく依

存することが示唆されるが密度に対しては負の相関関係が示唆されることがわかった。  
以上の結果からラティス構造のモデル、マテリアル選択によって複数の機械特性を実際に変えられることを示された。

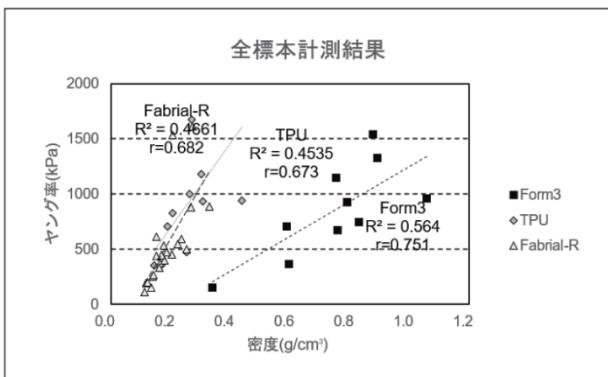


Fig.6a 全標本の密度 - ヤング率の散布図

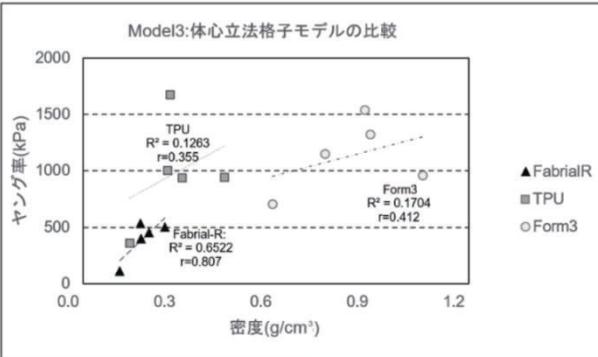


Fig.6b Model3 の密度 - ヤング率の散布図

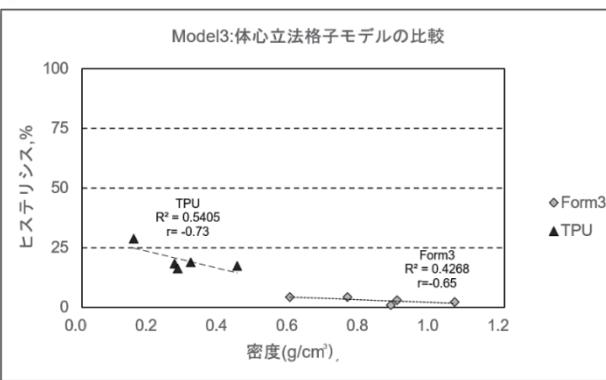


Fig.6c Model3 の密度 - ヒステリシスの散布図

## 5. 結論

今回は特徴や衝撃吸収性についての検討は行っていないが、手で触れてみるとモデル間での差は体感できた。今後、他の機械特性も計測し、Architected Materials のライブラリとして活用できるようにデータ蓄積を行ってゆく。

## 参考文献

- [1]. Pelanconi, M., & Ortona, A. (2019). Nature-Inspired, Ultra-Lightweight Structures with Gyroid Cores Produced by Additive Manufacturing and Reinforced by Unidirectional Carbon Fiber Ribs. *Materials*, 12(24), 4134. <https://doi.org/10.3390/ma12244134>
- [2]. Wang, R., Shang, J., Li, X., Luo, Z., & Wu, W. (2018). Vibration and damping characteristics of 3D printed Kagome lattice with viscoelastic material filling. *Scientific Reports*, 8(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27963-4>
- [3]. Ashby, M. (2013). Designing architected materials. *Scripta Materialia*, 68(1), 4-7. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.04.033>
- [4]. 櫻井 智子, 浅野 義弘, 常盤 拓司, 田中 浩也 (2019) 「3D プリント可能な構造体を既存物と対応づける「やわらかメトリック」の提案」 [https://fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/4DFF\\_sakurai.pdf](https://fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/4DFF_sakurai.pdf)



# 原子配列を模倣した双安定構造の有限要素法による力学特性最適化

Mechanical property optimization of atom-mimetic bistable metamaterial by finite element method

鐘ヶ江 壮介<sup>1</sup>, 奥川 将行<sup>1</sup>, 小泉 雄一郎<sup>1</sup>

Sosuke KANEGAE<sup>1</sup>, Masayuki OKUGAWA<sup>1</sup>, Yuichiro KOIZUMI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院工学研究科

<sup>1</sup>Graduate school of engineering, Osaka University

## 【Extended Abstract】

### 1. 多軸双安定メタマテリアル

本来発現しない特性を、格子構造の制御によって発現するメタマテリアルの研究が盛んに行われている。中でも安定な二つの状態間を可逆的に遷移可能なメタマテリアルは双安定(Bistable)構造と呼ばれ、形状記憶特性や超弾性を発現するため注目を集めている。これまでに多くの双安定構造が開発されているが、それらの多くが一方向の荷重にのみ双安定性を發揮する[1]。複雑な形状や複数方向からの荷重には適用できない。そこで、近年、多方向の荷重に対応できるような双安定構造が多く開発されている[2]。これまでに我々は、双安定構造を複数方向へ対応する構造として、結晶構造の対称性に着目した面心立方構造と双安定構造を組み合わせた構造を提案した[3]。図1に結晶構造の原子モデルおよび粉末床溶融結合により作製した多軸双安定構造を示す。この構造では、原子を模擬した球が面心立方構造の原子位置に配置され、原子間結合を模擬した梁が最近接球同士を結ぶ。図2に示される梁の太さ  $t$ 、球の半径  $R$ 、最近接球間距離  $a$ 、球面-梁間接触角度  $\phi$ 、四面体重心-梁中心間距離  $k$  の5つの設計変数を用いて形状が決定される。本研究では、構造と力学特性の関係を明らかにすることを目的に、 $R$ 、 $a$ 、 $\phi$ および  $k$  を変数とした 1225 種類の構造体の飛び移り座屈(スナップスルー)挙動、双安定性、弾性率および臨界強度を有限要素シミュレーションによって調べた。また、機械学習モデルを用いて設計変数からの力学特性予測を行った。

### 2. 結論

多軸双安定構造の有限要素シミュレーションを行い、設計変数と力学特性との関係性を明らかにした。飛び移り座屈性は  $R$  と  $k$  に依存し、双安定は  $a$  と  $k$  に依存した。球の半径  $R$  が小さく、梁が真っ直ぐに近いほど飛び移り座屈しやすい。一方、最近接球間距離  $a$  が小さく、梁が真っ直ぐに近いほど双安定になりやすい。弾性率および臨界強度は、 $R$  および  $a$  とは負の相関、 $\phi$  とは非常に弱い相関、 $k$  とは正の相関を持った。また、機械学習によって力学特性予測を行うと、決定係数 0.99 の精度で設計変数から力学特性を予測できた。

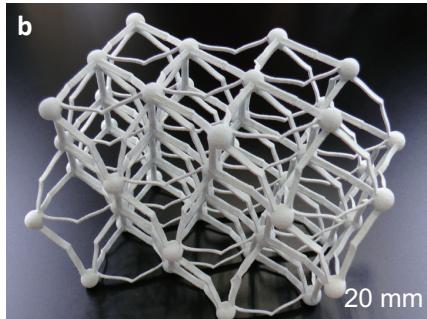
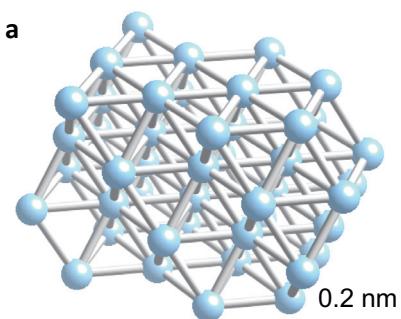


図 1 (a)結晶構造の原子モデルおよび(b)粉末床溶融結合により作製した多軸双安定構造.

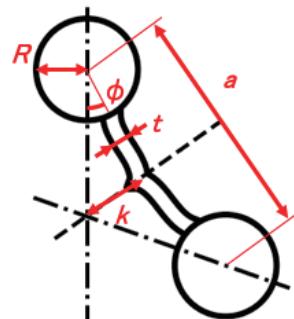


図 2 基本構造の設計パラメータ.

### 参考文献

- [1] D. Restrepo, N. D. Mankame, P. D. Zavattieri, “Phase transforming cellular materials”, *Extreme Mechanics Letters*, **4**, pp.52-60 (2015).
- [2] C. S. Ha, R. S. Lakes, M. E. Plesha, “Cubic negative stiffness lattice structure for energy absorption: Numerical and experimental studies”, *International Journal of Solids and Structures*, **178–179**, pp.127–135 (2019).
- [3] 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 小泉雄一郎, “3D プリントを活用した形状記憶・衝撃吸収メタマテリアル開発”, *The Journal of 4D and Functional Fabrication*, **1**, pp.1-8 (2020).



# オンデマンド溶融熱転写プリンタによる機能性加飾印刷

Functional decorative printing with on-demand melt thermal transfer printer

鈴木 健太 , 渡辺 将仁 , 小林 浩 , 寺尾 博年

Kenta SUZUKI , Masahito WATANABE , Hiroshi KOBAYASHI , Hirotoshi TERAO

アルプスアルパイン株式会社

Alps Alpine Co., Ltd.

## 【要約】

熱転写技術を活用し、静電センサと組み合わせることで、木目等の触感の再現に加えて、ステルス照光可能なタッチデバイスの開発を行っている。熱転写印刷のドライな薄膜インクという特徴を活かして、高精度で多層積層印刷することにより、リアルな凹凸触感を再現している。また、インクが薄く、光の透過性が良いため、ステルス照光にも活かすことができる。更に熱転写では、金属蒸着を印刷できるため、金属-木目グラデーションのような現実には無いような表現も可能である。このように様々な機能を持った層を積層印刷することで、リアルと非リアルを実感できるような新しい付加価値を持った加飾デバイスを目指している。

**キーワード:** 热転写, 加飾, インクリボン, 触感, 凹凸印刷

## 【Abstract】

Combining on-demand thermal transfer technology with the capacitive sensor, we are developing a touch device capable of stealth illuminating in addition to reproducing the tactile sensation of wood grain. Taking advantage of the characteristics of dry thin film ink of thermal transfer printing, a realistic texture feeling is reproduced by printing multilayer with high precision. In addition, since the ink is thin and has good light transmission, stealth illumination is possible. Further, in the thermal transfer, since the metal vapor deposition ink can be printed, a seamless expression such as a metal-grain gradation is possible. We aim at functional decorative printing with increased added value by layering printing inks with various functions.

**Keywords:** thermal transfer print, decorative print, ink-ribbon, tactile sense, uneven print

## 1. はじめに

近年、車載市場において、「CASE」(Connected, Autonomous, Shared, Electric)をキーワードに開発や技術革新が進んでいる。アルプスアルパインでも、図1に示すように「デジタルキャビン」と呼んでおり、CASE領域に加え、当社の特徴である、HMI(Human Machine Interface), センシング、通信の技術を融合したモジュール/システム開発を目指している。その中で、車載加飾においては、今後の自動運転を見据え、快適性をキーワードに車のインテリア化が目指されている。例えば、図1のスマートコントロールパネルのような、木目という見た目の加飾だけでなく、機能性が付加されたデバイスが求められている。

我々は、熱転写印刷を用いることで、木目の見た目だけではなく、積層印刷の特徴を活かして、触感再現も目指している。また、アイコンを使用したい時にだけ表示したいというニーズがあるため、静電センサと組み合わせることで、手を近づけた時にだけ表示させるというステルス照光機能を開発している。更に、金属蒸着を印刷できるというオンデマンド印刷の特徴を活かし、木目-金属グラデーションのようなシームレスな表現も可能である。このように様々な機能を持った層を積層印刷することで、付加価値の高い加飾製品の開発を目指している。

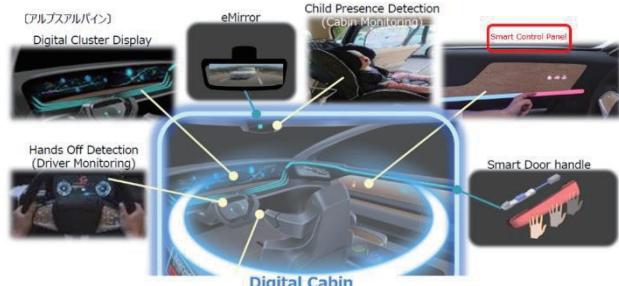


図1. Digital Cabin イメージ

## 2. オンデマンド溶融熱転写プリンタ

溶融熱転写プリンタの外観及び、機構模式図を図2に示す。Roll to rollでフィルムに印刷できるプリンタとなっており、1回の走行で6色重ね印刷できる。複数回走行させることで、多色印刷が可能となっている。サーマルヘッドと呼ばれるユニットを、インクリボン越しに、印刷媒体へ圧接し、発熱体に電流を流し、発熱させることでインクを軟化させ転写を行っている。蒸着インクなども1プロセスの中で、他のインクと同時に印刷可能となっている。



図 2. プリンタ外観と模式図

### 3. 触感印刷とステルス照光

木目印刷時の凹凸触感印刷の模式図を図 3 に示す。フィルムに木目を CMY で印刷した後に、段差用透明インクを積層することで凹凸を表現している。溶融熱転写インクは、初めからドライ状態であり、バインダーを熱で軟化させることで被転写体へ印刷できる。そのため、印刷時に段差ができるので、そこを利用し、木目凹凸を残したまま印刷可能となっている。ポイントとしては、高解像度なので、木目の導管に合わせて凹凸を付けられること、及び 1 層あたり 1~2 μm と薄い透明インクを積層するために、よりリアルな触感付与が可能となっている。

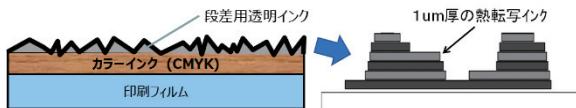


図 3. 触感印刷の模式図

次にステルス照光印刷の模式図を図 4 に示す。通常はアイコンが見えず、使用したい時にだけ、バックライトを点灯させアイコンを表示する機能を「ステルス照光」と呼称している。光が透過する部分と、透過しない部分を黒のパターニング印刷で表現している。また、通常時ではアイコンの段差が見えないようにする機能層や、アイコンを白く見せるための機能層も積層して印刷している。

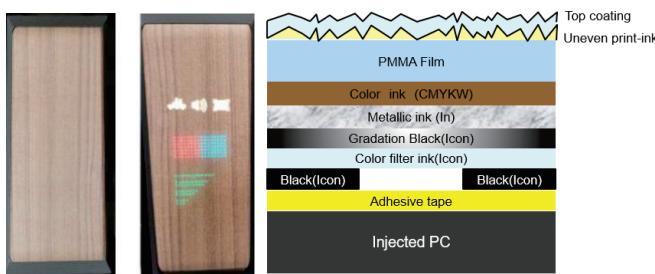


図 4. ステルス照光(左)、構成例(右)

### 4. 様々な加飾デザイン:

熱転写では、金属蒸着インクを印刷できるため、その特徴を活かした様々なデザイン検討を行っている。一例として、図 5 に木目-金属グラデーション加飾を示す。木目の触感に加えて、シームレスに木目と金属が融合している。より滑らかに木目と金属が移り変わるように、白画像と CMY 画像でグラデーション角度や、グラデー

ション位置/幅を調整し、図 5(右)のように大きく 4 つの領域に分けて印刷している。



図 5. 木目-金属 Gradation(左)、Gradation イメージ(右)

また、図 6 には、カーボン柄等のサンプルを示す。これはホログラムインクを積層印刷することで、通常のカーボンでは見られない奥ゆき感を出すことや、見る角度で光の反射が変化するような構成を検討している。



図 6. カーボンサンプル(上)、構成例(下)

### 5. おわりに:

本稿では、オンデマンド溶融熱転写技術を使い、木目触感の再現や、静電センサと組み合わせたステルス照光タッチデバイスの開発状況を報告した。更に、金属蒸着を印刷できるという特徴を活かした、熱転写オリジナルデザインの検討も行っている。熱転写技術はドライインクを積層印刷できるため、このように様々な機能層をもったインクを組み合わせることで、リアルと非リアルを実感できるような新しい付加価値を持った加飾デバイスの開発が可能である。

### 参考文献

1. K. Suzuki, "Thermal Transfer Decorative Printing for realistic textures feeling", Imaging Conference JAPAN (2019).

# 3D プリンタへの物理的振動付与によるテクスチャ生成の応用可能性

Applicability of texture generation by applying physical vibration to 3D printer

荒井 将来<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>2</sup>

Masaki Arai<sup>1</sup>, Hiroya Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科, <sup>2</sup> 慶應義塾大学 環境情報学部

<sup>1</sup> Graduate School of Media and Governance, Keio University

<sup>2</sup> Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

## 【要約】

本研究は、FFF 方式 3D プリンタのヒートベッドに設置された振動スピーカーに音を流しながらプリントすることで、ヒートベッドを物理的に振動させ、G-Code による制御では実現困難な領域の微細なテクスチャを付与する。振動から生成されたテクスチャによる撥水性の発現や、透明な樹脂をすりガラスのように曇らせるといった光学的特性の制御など、機能性・意匠性に関する発見と応用を目的とし、マテリアルやノズル直径、積層ピッチ等のスライス設定、波形や周波数等の音に関するパラメータ等を変化させ、それぞれのパラメータとテクスチャの相関関係を実験的に検証している。また、G-Code で物理的振動を模倣し、G-Code と物理的振動の差異を検証する実験も行っている。

キーワード : FFF, 振動, テクスチャ, G-Code

## 【Abstract】

To create fine textures that are difficult to achieve with G-Code control, this research involves physically vibrating the heat bed by playing sound during printing through exciter installed in the heat bed of a 3D printer. The purpose of this research is to discover and apply functional and aesthetic properties, such as water repellency by textures generated from vibrations and control of optical properties, such as frosting of transparent resins like frosted glass. We are also experimenting to mimic physical vibrations with the G-Code to verify the difference between the G-Code and physical vibrations.

Keywords : FFF, vibration, texture, G-Code

## 1. 序論

FFF(FDM)方式の 3D プリンタにおいて、G-Code による制御でミリメートルオーダーまたはそれ以下の分解能で複雑なテクスチャを生成する際、3D プリントに要する時間の増大、ノズルが長時間微小領域に留まることによる樹脂の溶融、位置決め精度など様々な要因に依り、テクスチャ生成が困難である。

本研究は、3D プリンタに物理的振動を与えることで、G-Code の制御のみでは実現不可能な領域の微細なテクスチャを付与し、造形物の光学的特性(透明度・輝度など)の制御、撥水性の付与などの機能性、物理的振動によって生まれるテクスチャの意匠性を生かした応用を目的としている。

## 2. 先行事例

先行事例としては、Olivier van Herpt らによる”Solid Vibrations”(2015)がある。本来エラーの原因となる振動に注目し、セラミックをプリント可能なデルタ型 3D プリンタのベッド下部にスピーカーを設置し、プリント中に音を流すことで、音(振動)に応じたモアレ模様(テクスチャ)を生成している。本研究では、Solid Vibrations のように物理的振動から生成されるテクスチャの意匠性に焦点を当てるだけでなく、機能性にも焦点を当てる。



出典 : Olivier van Herpt, “Solid Vibrations”,  
<http://olivervanherpt.com/solid-vibrations>, (参照 2020-09-14)

図 1. Solid Vibrations における造形物(セラミック)

## 3. テクスチャ生成方法

シンセサイザー(楽器)で生成した波形をパワーアンプで増幅し、予め 3D プリンタ(Creality3D Ender5)のヒートベッドに設置した振動スピーカーに流すことで、ヒートベッドを物理的に振動させる。振動させつつ3D プリントすることで、テクスチャを生成する。

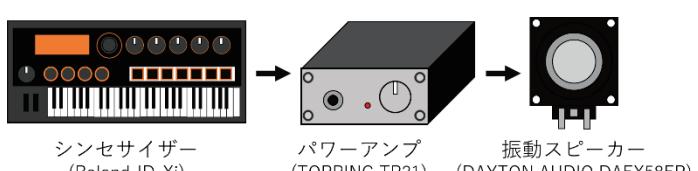


図 2. 波形生成から振動スピーカーまでの流れ

振動スピーカーは、それ単体ではスピーカーとしての役割を果たさず、板などの物体に張り付けることで、張り付けた物体が振動板として機能するものである。振動スピーカーはヒートベッド下部に専用の固定具を介して設置されている。また、プリント中に音を流している最中に振動スピーカーが非常に発熱するため、振動スピーカー背面にヒートシンクを取り付けてある。

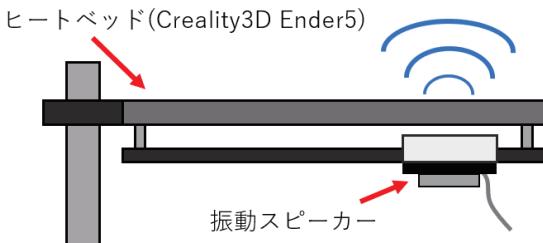


図 3. 振動スピーカーの設置方法

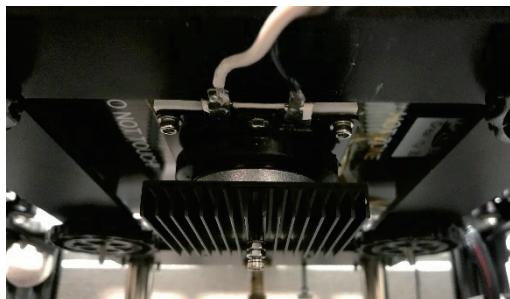


図 4. 実際にヒートベッドに設置した振動スピーカー

波形生成には、Roland 社の JD-Xi を使用している。JD-Xi はアナログシンセサイザーとしての機能を備えており、簡易的なファンクションジェネレータ(任意波形発生器)として使用している。

#### 4. 実験について

テクスチャに影響を与えるパラメータは、プリント形状、マテリアル、ノズル直径などの“物理的パラメータ”、積層ピッチや送り速度などの“スライス設定に関するパラメータ”、シンセサイザーの音色や周波数などの“入力波形に関するパラメータ”的3種に大別され、様々な要因の影響を受けることが、それぞれのパラメータのみを変化させる実験により明らかとなっている。

テクスチャに影響を及ぼすパラメータが多いいため、基準となる条件を予め決めておき、変化させるパラメータは基本的に 1 項目程度に絞り、実際に振動を与えるながらプリントすることで、変化させたパラメータがテクスチャに及ぼす影響を検証している。

例えば、 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 25\text{mm}$ ( $L \times W \times H$ )の立方体および  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 1\text{mm}$ ( $L \times W \times H$ )の立方体を基本形とし、前者は造形物側面、後者は造形物上面に生じるテクスチャを観察するための形状である。

表 1. テクスチャ生成に関わるパラメータ

物理的パラメータ	ノズル(直径)・マテリアル・プリント形状など
スライス設定	積層ピッチ・送り速度など
入力波形	音色(波形)・周波数など

#### 5. 生成されるテクスチャについて

##### 5-1. テクスチャのスケール感

図 5 は、振動を与えるながらプリントした造形物と、そのテクスチャを拡大したもので、ノズル直径 1.0mm、積層ピッチ 0.8mm でプリントされている。赤い四角で囲まれた部分は、テクスチャの 1 単位で、この“単位テクスチャ”的部分は、約  $1.0\text{mm} \times 0.6\text{mm}$  となっており、ノズル直径、積層ピッチ、プリント速度、周波数などのパラメータを変更することで、テクスチャの目の細かさや、模様の変更が可能である。

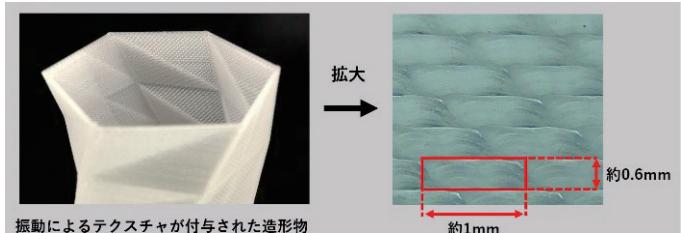


図 5. 振動から生成されたテクスチャのスケール(例)

##### 5-2. テクスチャの有無による見た目の違い(一例)

図 6 に、振動によるテクスチャの有無による見た目の違いを比較したものを示す。図 6 の造形物は、 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 65\text{mm}$ ( $L \times W \times H$ )程度の大きさの花瓶で、透明色の ABS(Pxmalion 製)を用い、同じ G-Code からプリントしたものである。

振動無し(図 6 左側)の場合は透明感があるのに対し、振動有り(図 6 右側)の場合は、すりガラスのように白みがかかった色合いとなる。このように振動を与えることで、すりガラスのような効果を引き出し、3D プリントした造形物表面にテクスチャを付与しつつ、透明度や輝度といった光学的特性を変化させることができる。



図 6. 振動によるテクスチャの有無の比較例

## 6. G-Code による物理的振動の模倣

G-Code で物理的振動を模倣し、どの程度の分解能のテクスチャまで生成可能か、G-Code と物理的振動によるテクスチャの違いを検証する実験を行った。

50mm × 50mm × 25mm(L × W × H)の立方体の1面、すなわち各レイヤーにおいて1本の直線(約 50mm)に相当する領域に対して X または Y 座標を分割し、分割した座標毎に振動の振幅に見立てた Z 座標の変化を入れ、物理的振動の動きを G-Code で模倣した。

G-Code は開発した G-Code 編集ツールから生成され、直線の分割数をより増やしていく際、どの程度の領域までテクスチャが生成可能か、または物理的振動と違いがあるかを検証している。実験はマテリアルに PLA、0.4mm ノズル、送り速度 20[mm/s]、振幅 A は 0.1mm、vase モードでシェル(アウトライン)を1回のみプリントしている。

現在までに 100 分割(分解能約 0.5mm)から 1000 分割(分解能約 0.05mm)まで行っており、分解能 0.05mm 程度の領域まで行くと、テクスチャの生成が困難であることが判明した。

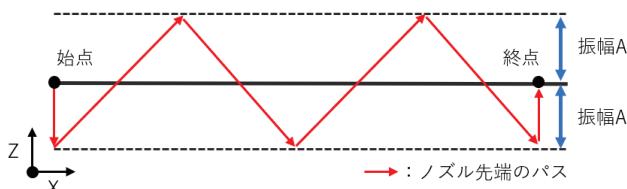


図 7. 物理的振動を再現した G-Code パスの概略図(三角波)

## 7. まとめ

物理的振動によって付与されるテクスチャは、マテリアル・プリント形状といった物理的パラメータ、積層ピッチなどのスライス設定、周波数をはじめとする入力波形に関するパラメータなど、様々な要因の影響を受けることが明らかとなり、周波数 vs テクスチャなど、その内幾つかの相関関係、傾向を実験から得ることができた。引き続きパラメータの相関関係に関する検証は進めていく。

また、実験に伴い、光学的特性の変化をはじめ、先行事例にはない効果なども明らかとなった。

G-Code で物理的振動を模倣する実験では、分解能約 0.05mm(1000 分割)程度の領域まで行くと、テクスチャの生成が困難であることが判明したが、振幅の変更や、三角波以外のパスにおける実験など、実験の余地がある。

## 参考文献

1. Olivier van Herpt, "Solid Vibrations", <http://oliviervanherpt.com/solid-vibrations>, (参照 2020-09-14)
2. polymaker, "Printing A Bridge", <https://polymaker.com/footage-of-worlds-largest-plastic-3d-printer-printing-pedestrian-bridge/>, (参照 2020-09-14)
3. Kam, Menderes & Saruhan, Hamit & İpekçi, Ahmet. (2018). Investigation the Effects of 3D Printer System Vibrations on Mechanical Properties of the Printed Products. 36. 655–666.
4. Musial, Wojciech & Haracewiat, Joanna & Kozłowicz, Krzysztof. (2016). Assessment of the texture and topographic features of a surface produced by the 3D printing process. Advanced Technologies in Mechanics. 2. 35. 10.17814/atim.2015.3(4).27.



# Graftin' Craftin': 接ぎ木と針金かけを用いた樹木の生長過程での形状制御による収穫可能な動的機構の生成手法

Graftin' Craftin': A Fabrication Technique inspired by Plant Grafting and Wiring for Production of Harvestable Automata

千葉 一磨<sup>1</sup>, 橋田朋子<sup>1</sup>

Kazuma CHIBA<sup>1</sup>, Tomoko HASHIDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学大学院

<sup>1</sup>Waseda University

## 【要約】

接ぎ木は複数の植物体を繋ぎ合わせる育種改良法であるが、近年、この園芸手法を接合技術と捉え、樹木を育てながら家具などを制作する取り組みがある。しかし、それらの接ぎ木による立体造形の対象が静的な構造物に限られていた。そこで、本研究では自然物を素材として用い、電力を必要としない動的機構を生成することで本来の意味での持続可能な開発が実現されると考え、針金かけにより若枝を折り曲げて形状保存させ、接ぎ木で所望の箇所を接合してリンク機構を制作し、樹木の切断後に動作する受動歩行機を制作した。その後、歩行機を動作させ、リンク機構の接ぎ木の成功と、歩行機が15度の傾斜を0.5m前進できることを確認した。

キーワード:持続可能性、接ぎ木、針金かけ、からくり、受動歩行機

## 【Abstract】

Plant grafting is a horticultural technique which combines two or more branches into a single tree. In general, this is used for breeding improvement, however, there are attempts to fabricate furniture such as a chair using grafting as a joining technology. Conventionally, grafting enabled constructing static artifacts, on the other hand, fabricating a dynamic machinery or automata through grafting is attempted in this research. Therefore, our approach aims to realize building a passive dynamic walking automaton through bending branches with wires and grafting to manipulate trees' shape. As the result, the plant-based passive walker was able to descend a slope with 15 degree of inclination.

Keywords: Sustainability, grafting, wiring, karakuri, passive walker

## 1. 序論

SDGsにより、持続可能な開発が社会に求められている今、ものづくりにおいても持続可能なファブリケーション技術や持続可能な機構の重要性が高まっている。筆者らは自然による持続可能なファブリケーション技術として植物の接ぎ木や針金かけに注目している。接ぎ木とは植物が切断された形成層の組織を修復する機能を活用して、複数の個体を繋ぎ合わせる品種改良法である。また、針金かけは針金を用いて人為的に植物体を折り曲げて生長方向を操作する手法である。最近では接ぎ木を接合技術として扱い、樹木を育てながら家具や建築を制作する試みもなされている[1][2]。このように接ぎ木といった園芸手法が自然の持続可能なファブリケーション技術である可能性が示されてはいるが、その立体造形のアプローチは静的な構造物に限られているため、動的機構の生成が今後望まれる。

動的機構とは一般的に動力として電力を別途必要とするものが多い。しかし古くからあるからくりは電力を必要とせずに駆動するため、持続可能な機構として再び注目を集めている。たとえば製造業においてシステムの自動化や維持コスト削減のため、作業員の自重など

を動力源とするからくりを活用する事例がある[3]またPVCパイプでできた巨大な機構を、風を動力として動かすテオヤンセンによる人工生命体『ストランドビースト』[4]のように、アート分野でも自然と共生する作品としてからくりを用いるものがある。しかし、いずれのからくりもその素材はアルミやプラスチックといった人工物に限られていた。

筆者らは持続可能な開発の究極な形とは、自然のファブリケーション技術を用いて、自然物を素材とした電力を必要としない動的機構を生成することであると考える。そこで、本研究ではその一歩として、接ぎ木を接合技術として扱い、針金かけによる形状制御を行いながら樹木を素材とするからくりの制作を目指し、からくり、特に受動歩行機の実現を試みる。受動歩行機は位置エネルギーのみを動力源とし、センサシステムやアクチュエータを必要とせずに緩斜面を下る歩行機械を指す。一般的に接ぎ木の成功率は高くないとされているため、必要な機構数を最小限に抑えたミニマムな機構として本研究では受動歩行機を対象とした。本稿では、提案手法の詳細とリンク機構および受動歩行機の精度評価について述べる。

## 2. Graftin' Craftin'

Graftin' Craftin' は接ぎ木と針金かけを用いた樹木の生長過程での形状制御によってからくり、特に受動歩行機を生成する手法である。受動歩行機は斜面に配置されると自重により振り子の原理に基づいて振動することで、地面に接する支持脚と空中に浮いた遊脚とを切り替える。同時に、両脚が節となるリンク機構が腰部に設けられており、それぞれの脚が地面から離れた際に脚の開閉を行う。このように、脚の振りと切り替えが融合した周期運動を繰り返して斜面を降る[5]。受動歩行機には様々なモデルがあるが、今回のような形状が一様でない植物を材料とするためには、歩行機が安定して自立するよう前後に 2 足 1 組の脚を持ち合計 4 点でバランスを保つモデルが最適と考えられる。以上を踏まえ、図 1 に提案する受動歩行機のイメージを示す。

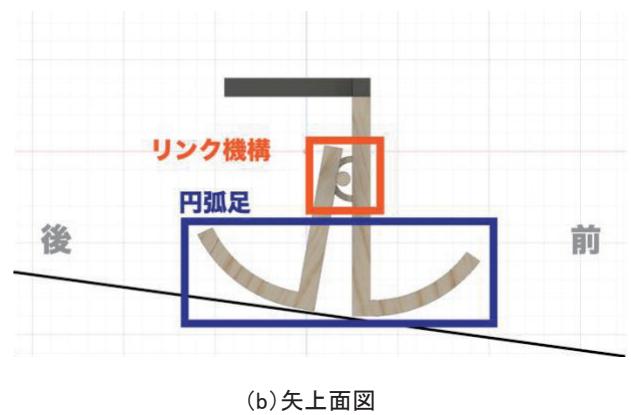
受動歩行機の生成のために接ぎ木と針金かけで実現すべき要件は下記である。

1. 接ぎ木: 前後の脚部が節となるリンク機構を歩行機の腰部に設ける
2. 針金かけ: 歩行機の前後それぞれに 2 本 1 組の円弧足を作る

受動歩行機の脚が前後に開閉を行なながら前進するには腰部にリンク機構が不可欠である。リンク機構とは複数の節と共に通するジョイントによって構成され、ジョイント部分は軸穴に中心軸が通っていることで回転の対偶を持つ。そこで、接ぎ木で作成した輪をジョイント軸穴とし、その中に別の幹を中心軸として通すことでリンク機構を実現する。さらに、受動歩行機の円弧状の足として若枝が生長する間で円弧状に針金かけをし、硬化するまで放置することで形状保存を試みる。なお、受動歩行を実現するうえで重要な歩行機の重心の安定は不規則な形状を持つ樹木のみでは対応できないと判断し、図 1 の黒色部分に示す通り、歩行機作成後に前脚上部に対して重りを固定し、重心位置を最適化する。



(a) 俯瞰図



(b) 矢上面図

図 1 接ぎ木と針金かけによる受動歩行機のイメージ図:

(a) 俯瞰図, (b) 矢上面図

## 3. 実装

### 3.1 接ぎ木に用いた植物と用具

本研究では、一般的に接ぎ木の成功率が高く耐寒性や耐暑性等の環境による生長への影響が少ないとされる柑橘類の中からレモン属 4 本とカラタチ属 1 本の苗木を用いた。歩行機の部品制作のための接ぎ木は枝が休眠している 4 月上旬に実施した。接ぎ木の際、枝の形成層どうしの活着を促進させるために活着剤『カルスメイト』を植物の切断面に塗布し、乾燥を防ぐために接ぎ木用フィルム『ニューメデール』を接ぎ木部分に巻き付けた。また、接ぎ木が活着するまでには 1 ヶ月を要するとされているため 5 月上旬まで放置した後に剪定した。

### 3.2 接ぎ木を用いたリンク機構制作

歩行機の後脚はリンク機構におけるジョイントの中心軸と垂直に固定される必要がある。そこで、図 2 のように、ジョイント中心軸の役割を持つカラタチ苗木の幹をレモン苗木 2 本の幹に対して垂直になるように傾け、レモン幹とカラタチ幹の交点となる箇所の樹皮を剥離し互いの形成層を十字に重ね合わせて接ぎ木を行った。次に、前脚の役割を持つレモン 2 本の幹にジョイント軸穴の作成が求められる。そこで、図 3 に示す通り、2 本の幹から既に発生している若枝を同じ幹の上部の側面に対して自己接ぎ木を行い、輪を形成した。

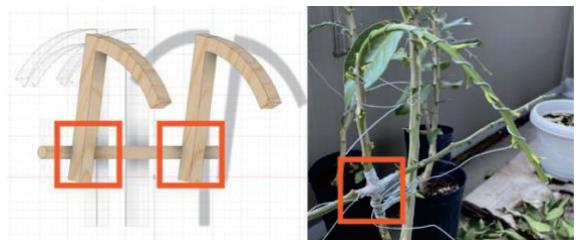


図 2 ジョイント中心軸と歩行機後脚との固定のためのレモン幹 2 本とカラタチ幹との接ぎ木

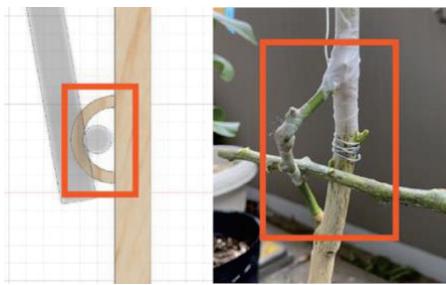


図 3 レモン幹に対する若枝の接ぎ木によるジョイント軸穴

### 3.3 円弧足のための若枝の針金かけによる形状制御

歩行機が前後の脚部に持つ 4 本の足は円弧状である必要がある。そのため、図 4 に示すようにレモンの苗木からすでに発生している若枝に対してワイヤーを取り付け、円弧状に折り曲げて針金かけを行った。このとき、樹木は負の重力屈性により地面と反対方向に枝が伸びているため、生長過程の間では歩行機の部品が上下逆さになった状態で針金かけをする。その後、接ぎ木の活着を待ち、それぞれの幹から歩行機を切り離してから樹木を乾燥させて針金かけによる円弧形状を保存させた。接ぎ木の活着が見込まれる 1 ヶ月後、レモンとカラタチの幹をそれぞれ切断し、乾燥させて針金かけによる円弧足を形状保存した。

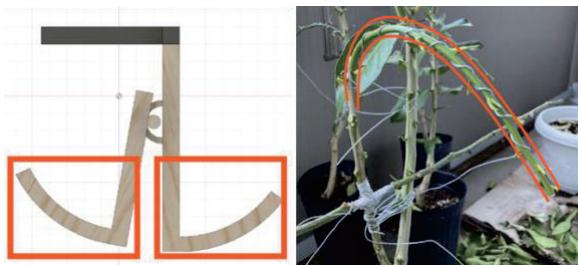


図 4 円弧足作成のためのレモン若枝の針金かけ

### 4. 動作確認

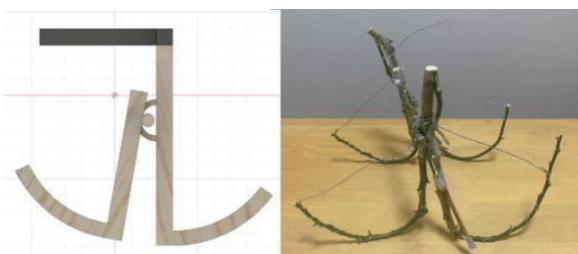


図 5 樹木から切断して組み立てた受動歩行機

接ぎ木と針金かけを行ってから 1 ヶ月後、前脚 2 本に接ぎ木を行って制作したジョイント軸穴に対して後脚と接ぎ木されたジョイント中心軸を組み合わせて、図 5 に示す受動歩行機を完成させ、動作確認を行なった。

#### 4.1 接ぎ木部分の活着の有無

受動歩行機制作のために実施した接ぎ木部分の活着有無の判定を行なった。はじめに、図 6 に示す通り、

腰関節のリンク機構におけるジョイント軸穴のための接ぎ木による輪は活着に成功した。レモンの幹を入れた切り込みに若枝を挟み込むことで充分に互いの形成層どうしが密着したためである。これにより、輪の中に中心軸となる植物を通せばジョイントが作成できることが示された。次に、図 7 の通り、歩行機の後脚のレモンの幹 2 本とジョイント中心軸のカラタチ 1 本による接ぎ木は活着剤の効力で接合はしているものの活着力が弱かった。これはレモンとカラタチそれぞれの形成層を露出させた側面どうしを重ね合わせただけでは強い密着が実現できなかつたためと考える。そこで接ぎ木テープを巻いたまま固定し、歩行機として用いることにした。



図 6 ジョイント軸穴としての接ぎ木による輪

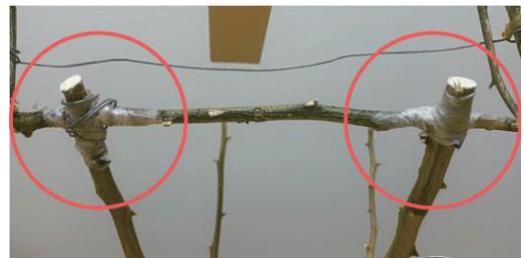


図 7 ジョイント中心軸と後脚との接ぎ木部分

#### 4.2 接ぎ木によるリンク機構の精度評価

受動歩行機の腰関節の役割を果たすリンク機構の回転角度の可動範囲を樹木の切断後に確認した。その結果、接ぎ木によるジョイント軸穴が破損することなく、中心軸は自在に角度を変化させられた。ただし、軸穴は楕円形であり、中心軸となる幹の直径よりも長いため、回転誤差(ガタ)が生じてしまう問題が発生し、受動歩行を実現させるためにはゴムによる固定でガタを軽減させた。また、植物体特有の凹凸形状がリンクの回転の際に摩擦を引き起こすものの受動歩行機における脚の開閉へは影響しなかつた。

#### 4.3 受動歩行機に関する基礎実験および応用実験

##### 4.3.1 基礎実験: 遊脚と歩行機全体の固有角振動数

受動歩行は物体の振動と密接な関わりを持つため、接ぎ木による歩行機の振動特性を理解するための基礎実験を行なった。受動歩行は遊脚の振動と歩行機全体の振動が共振した際に実現できるものと仮定し、それぞれの固有角振動数を求めた。

はじめに、遊脚の固有角振動数を求めるため、それぞれの遊脚を自由振動させたところ、空気抵抗など

の影響は受けるものの 5 周期の振動が得られた。一方で、平地に置いた歩行機全体の自由振動を試みたが、植物体特有の反りや凹凸などによりそれぞれの脚の形状が不規則なため 2 周期しか振動が得られなかった。このことから斜面に配置した際も受動歩行の現象が起きて静止してしまう可能性が示唆される。

それぞれの周期より固有角振動数を導出した結果、表 1 の通り、後脚の固有角振動数の方が前脚よりも高い結果になった。この結果は、前脚の着地より後脚が引きずられて閉脚するまでの速度が速いことを示しており、受動歩行を阻害するものではない。しかし、前脚と歩行機全体の固有角振動数の差は  $5.67 \text{ rad/s}$  と 2 倍近くあった。この差が受動歩行を行なう上で無視できる大きさか否か歩行実験を通じて確かめる。

表 1 植物の歩行機遊脚と全体の固有角振動数

	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	固有角振動数 (rad/s)
遊脚(前)	1.10	0.91	5.69
遊脚(後)	0.67	1.49	9.34
歩行機全体	0.55	1.81	11.36

#### 4.3.2 応用実験: 歩行の各種データの計測

図 8 の通り、段ボールを用いて 15 度の傾斜角を持つ斜面を設置し、その上に受動歩行機を配置した。しかし、植物の枝でできた円弧足の表面は滑りやすく、歩行機を斜面に配置しても脚の開閉を行わないまま滑ってしまう。そこで、受動歩行機全体の振動が安定して行われるように、足底にゴム製の滑り止めを加えた。この状態で歩行機は斜面を下るようになったため、歩行時間と 1 秒あたりの歩数、歩行距離を計測した。なお、傾斜角が 15 度より大きい場合には歩行機は転倒し、小さい場合は歩行せずに静止してしまうため、歩行実験における傾斜角は 15 度で統一した。以下、その結果と実験値より導出した歩行周期と歩行角振動数の平均値を表 2 に示す。

表 2 の通り、植物による受動歩行機は 15 度の傾斜を 0.5m 前進することができた。しかし、段ボールと歩行機足底の滑り止めによる摩擦などによって 0.5m 地点で静止した。加えて、歩行角振動数値は  $57.12 \text{ rad/s}$  と極めて高かった。樹木の不規則な形状によって歩行機の各部品の重さが一様でないことから重心位置が異なる点が挙げられる。

表 2 植物の受動歩行機の歩行実験データ

歩行時間 (s)	距離 (m)	1秒あたりの 歩数 (歩/s)	歩行周期 (s)	歩行角振動数 (rad/s)
23.96	0.50	9	0.11	57.12



図 8 植物の受動歩行機の歩行実験の様子

#### 5. 結論

本研究では持続可能な開発の一環として、自然のアプリケーション技術を用いて、自然物を素材とした電力を必要としない動的機構を生成することを目指し、園芸手法である接ぎ木を接合技術として解釈し、針金かけによる樹木の成長過程での形状制御を通じて動的機構の生成を試みた。特に、機構学において最も基本的かつ汎用性のあるリンク機構を植物の接ぎ木によって実現することができれば、自然物を素材としたからくりの成形加工技術としての可能性を見出せると考え、1 つのリンク機構で成り立つ受動歩行機の制作に取り組んだ。

具体的には、リンク機構のジョイントを作成するために、レモンの接ぎ木で形成した輪に軸穴の役割を持たせ、その間に中心軸としてカラタチの幹を通した。その結果、すべての植物体を切断した後に節の回転角度は自在に制御できることを確認し、前後の脚の開閉が可能であることを示した。次に、受動歩行機の円弧足は、レモンの若枝をワイヤーで針金かけをすることで乾燥後に円弧の形状を保つことができた。以上の工程を通じて生成した受動歩行機を用いて歩行実験を実施し、その結果、15 度の斜面を下ったものの樹木の不規則な形状により推進に必要な重心位置の決定には課題が残った。

今後の展望として、リンク機構の精度を高めるために接ぎ木と針金かけを行ううえで回転誤差を軽減させる工夫が求められる。また、受動歩行機以外のからくりを実現させるために、リンク機構のみならずギアやカムなど他の機械要素を接ぎ木と針金かけでの成形を目指す。

#### 参考文献

- Full Grown: The Gatti Chair, <https://fullgrown.co.uk>, 参照: 2020-07-30.
- VisionDivision: The Patient Garden, <https://www.dezeen.com/2011/10/25/the-patient-gardener-by-visiondivision/>, 参照: 2020-07-30.
- SUS America: Karakuri Automation, <https://www.susamericainc.com/featured/video/>
- Theo Jansen: Strandbeest, <https://www.strandbeest.com/explains>, 参照: 2020-07-30.
- 衣笠哲也, 大須賀公一, 土師貴史: 受動歩行ロボットのすすめ -重力だけで2足歩行するロボットのつくりかた-, コロナ社, 2016.

# RepRap ベースの 3D フードプリンタの開発

Development of a RepRap-based 3D Food Printer

茂木 勇志<sup>1</sup> 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Yuji MOTEKI<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

3D プリント技術は、多くの分野への応用が期待されており、食品加工分野もその例外ではない。本研究の目的は「チョコレート」を素材とし、オープンソースで低コストな食品 3D プリンタを開発することである。オープンソース型(RepRap) 3D プリンタに材料を吐出するためのシリンジを取り付け、材料の吐出量の調整を行った。積層のためには、吐出後の材料(チョコレート)を速やかに固化させる必要があるが、その材料の冷却方法を検討した。(造形物を複数個離して印刷することで、冷却の改善を図った。)

キーワード: 食品 3D プリンタ、オープンソース、チョコレート、低コスト

## 【Abstract】

The 3D printing technology is expected to be applied to many fields, and the food processing field is not an exception. The purpose of this research is to develop an open source and low-cost 3D printer for foods using "Chocolate" as a material. We attached a syringe to the open source (Rep-Rap) 3D printer to eject the material and adjusted the amount of ejected material. In order to stack the chocolate materials, it is necessary to solidify the material immediately after ejection. We examined a cooling method of ejected chocolate. For effective cooling we tested to print multiple objects simultaneously.

Keywords: Food 3D Printer, open-source, chocolate, low cost

## 1. 序論

個人にカスタマイズされた食事を提供でき、新しい食品の製造装置になりえる、という期待から、近年食品 3D プリンターが注されている。中でも、「チョコレート」を食材とした 3D プリンタが盛んに開発され、市場に現れるようになってきている。しかしそれらはほとんどが、単純な形状を積み上げるだけにとどまるものであり、複数素材の使用や、複雑な形状の造形ができるものはないのが現状である。

本研究では、チョコレートの精細な 3D 造形を可能とする 3D プリンタの開発を目指す。そのためには、チョコレートの食材(原料、添加剤)、チョコレート吐出の方法、吐出の条件(速度、温度、造形後の冷却など)を詳細に検証する。

## 2. 装置の説明

本研究では、プラスチックを造形材料とする熱溶融式(FDM) 3D プリンター(Creality3D 社製「Ender3 Pro」)をベースとし、食品吐出用に改造した。一連の流れを以下に示す。

まず、Ender3 の Extruder をシリンジ型ノズル(FUTURA ELETTRONICA<sup>®</sup>社)に取り替えた。全体の写真を図 1 に示す。

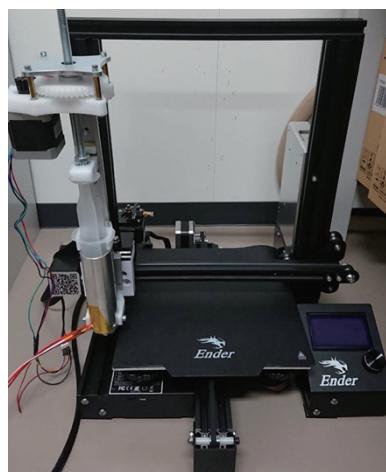


図 1. Ender3 にシリンジ型ノズルを取り付けた全体の写真

次に Ender3Pro 内のファームウェアを Marlin に書き換え,Extruder の温度が高温に達しなくとも吐出が可能となるようにした.3D プリンタの制御には無料のソフトウェアである「Prontierface」を用いた.

### 3. 造形方法

今回の研究では C&Ckikuya の「アリバ 72%クーベルチュールチョコレート」を用いた.チョコレートを容量 60mL のシリジンに入れ,これを 50°C のお湯で湯煎し,Ender3 にセットした.3D プリントのためのスライサソフトは「Simplify3D」を用いた. 造形は室温下で行ない,造形物の冷却には,xuuyuu 社の水冷式ペルチェ素子クーラーを用いた.



図 2. Xuuyuu 社のペルチェ素子クーラー

このクーラーからの冷却空気を造形物に斜め 45° の角度から造形中当て続けることで,冷却を行った.

### 3. 造形結果

今回 Simplify3D で設定した造形条件を表 1 に示す.

表 1. 造形条件

ノズルの直径 [mm]	0.90
乗数 [-]	1.05
レイヤー厚 [mm]	0.40
プリントスピード [mm/min]	600
X/Y 軸移動速度 [mm/min]	600
Z 軸移動速度 [mm/min]	800
インフィル [%]	100

また,今回 10×10×10mm の立方体を印刷した. 造形結果を図 2 に示す.



図 3. 10×10×10mm の立方体の造形結果

図 2 より, 造形物はかなり歪な形となっていることが分かる.

次に 20×20×10mm の直方体を 6 個離して造形し, 冷却方法の改善を図った. 造形結果を図 4 に示す. なお, 造形条件はインフィルのみ 50% に変更した.

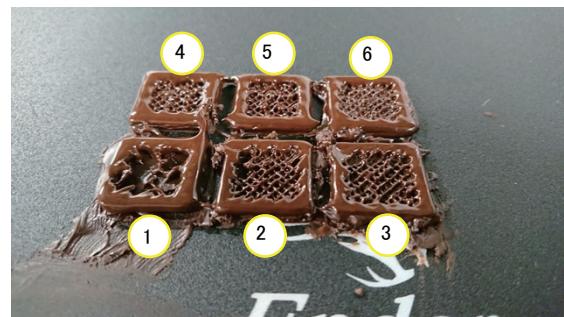


図 4. 20×20×10mm の直方体の造形結果

図 4 中, 番号①～⑥は各層の印刷時にノズルが動く順番を示す. 6つすべて同じ形状を印刷したが, 造形物はそれぞれ異なる形をしており, ペルチェ素子クーラーに近い①～③は形が大きく崩れていた. ④～⑥は比較的形状を保っていた.

### 4. 考察

今回の結果では, まず 10×10×10mm の立方体の造形物の形はかなり崩れてしまい, 思うような造形ができなかった. 考えられる原因として, チョコレート材料の吐出後の冷却が十分ではなく, すぐには凝固しないまま, 積層を続けたためであると考えられる. またクーラーの風を一定の方向からのみ当て過ぎたため, 風圧で吐出後の材料が歪んでしまったと考えられる. また, クーラー内の結露によって多くの水滴が発生し, これが造形中のステージ上にこぼれ落ちてしまったため, 冷却装置の改良も必要であることが分かった. さらに, 選定したチョコレートの凝固性も悪かったことが歪んだ原因と考えられるので, チョコレート材料のテンパリング温度を意識して, 造形温度(シリジンの設定保持温度)を検証する必要がある.

6つの直方体の印刷実験では, 冷風の当たる位置によって造形物の形が異なることが分かった. また, 時間が経つにつれて吐出量が減少したため, シリジンの保温

方法や Simplify3D での造形条件を細かく検証する必要がある。

## 5. 結言

今回、オープンソース型の3D プリンタを改造し、チョコレート食材の吐出を可能とするプリンタを製作することができた。しかし造形結果は思わしくなく、その原因は冷却方法、材料の組成や造形温度、吐出条件の設定にあると思われる。精細なチョコレートの造形が可能な装置の開発のためには、今後これらの要因をひとつずつ検証していくことが必要である。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費

JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI

JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA

JPMJOP1614、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO)によって支援を受けたものである。

## 参考文献

1. Yuya Suzuki, Kensuke Takagishi, Shinjiro Umetsu  
“High accuracy printing of high viscosity food materials by using Electrostatic Ink Jet 3D printer”(2016)  
<http://www.jslst.org/documents/Conference/2016/pdf/3P2-D03.pdf>



## RepRap SWIM-ER を用いたゲル食品サンプル

Soft food samples printed with Gel 3D printer “RepRap SWIM-ER”

亀岡 将成<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディ ナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>, 王 忠奎<sup>3</sup>, 平井 慎一<sup>4</sup>

Masanari KAMEOKA<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>, Zhongkui WANG<sup>3</sup>, Shinichi HIRAI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>3</sup> 立命館大学総合科学技術研究機構

<sup>4</sup> 立命館大学ロボティクス学科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

<sup>3</sup> Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

<sup>4</sup> Department of Robotics, Ritsumeikan University

### 【要約】

本研究では、3D ゲルプリンタを用いて、食品を把持する産業用ロボットの開発に有用な、やわらかい食品サンプルの造形手法を開発する。3D ゲルプリンタは我々の研究室で開発された、紫外光で硬化するゲルモノマー溶液の液面を紫外線レーザーで照射、走査して固化する方式のものである。異なる2種類の組成をもつゲルを用いて、食品サンプルの造形を試した。造形速度や紫外線吸収剤の量を調整することで、食品サンプルの精細な造形に成功した。またそれぞれのゲル造形物の含水率測定、圧縮試験を行い、各組成のゲルの物性を調べた。

キーワード: 食品サンプル, 3D ゲルプリンタ

### 【Abstract】

In this study, we develop a method to form a soft food sample using a gel 3D printer, which is useful for the development of an industrial robot to hold food. The 3D gel printer, developed in our laboratory, uses an ultraviolet laser to irradiate and scan the surface of a gel monomer solution, which is hardened by ultraviolet light. Gels with two different compositions were used to shape food samples. By adjusting the molding speed and the amount of the UV absorber, we succeeded in producing fine food samples. In addition, the physical properties of the gels were investigated by measuring the moisture content of each gel and conducting a compression test.

Keywords: Food samples, 3D gel printer

### 1. はじめに

近年、日本をはじめとする先進国において、労働人口の減少に伴い、代替労働力としてのロボットの開発が進んでいる。その中で、食品産業用ロボットは、ときに野菜や海産物のように柔らかく、硬さの分布を持つものを扱うため、それらを把持する能力が要求されている。<sup>[1]</sup>しかし食品は形状、物性に大きな不均一性があること、また実験のたびに食品のロスが出ることなどから、把持能力の開発において、本物の食品を対象として扱うことは問題が多い。したがってデザインされた形状、物性を持った柔らかい食品サンプルを、再現性良く製作する技術が求められる。また柔らかく、かつ実際の食品の質感を模倣できる材料のひとつとして、高分子ゲル材料の導入が期待されている。そこで、我々はハイドロゲルの3次元造形によって、食品サンプルの製作を試み、造形物の外観や物性について調査する。

### 2. RepRap SWIM-ER による造形手法



Fig. 1 Gel 3D Printer “RepRap SWIM-ER”

”RepRap SWIM-ER”とは、”Replicating Rapid prototype”と”Soft and Wet Intelligent Matter Easy Realizer”の略である。RepRapとは、通常プラスチックを

Table 1 Composition of ICN gel

Monomer [Mol/L]	Polymer [Mol/L]	Cross-linker [Mol/L]	Initiator [Mol/L]	Absorber [wt%]
DMAAm	HPC	Karenz	TPO	AS-150
4. 0	2. 0 x 10 <sup>-2</sup>	2. 0 x 10 <sup>-2</sup>	1. 0 x 10 <sup>-2</sup>	1. 0 x 10 <sup>-1</sup>

Table 2 Composition of PDN gel

1st gel			2nd gel			
Monomer [Mol/L]	Cross-linker [Mol/L]	Initiator [Mol/L]	Monomer [Mol/L]	Cross-linker [Mol/L]	Initiator [Mol/L]	Absorber [wt%]
NaAMPS	MBAA	$\alpha$ -keto	DMAAm	MBAA	$\alpha$ -keto	AS-150
1. 0	9. 0 x 10 <sup>-2</sup>	1. 0 x 10 <sup>-3</sup>	3. 5	1. 8 x 10 <sup>-2</sup>	7. 0 x 10 <sup>-3</sup>	1. 0 x 10 <sup>-1</sup>

材料とするオープンソース型の3Dプリンタの通称であるが、本装置が RepRap 型の3D プリンタをベースとしているためにこの名称が付けられた。SWIM-ER は古川研究室で開発された3D ゲルプリンタの名称であり、紫外光により化学架橋、硬化するゲルモノマー溶液の液面を、紫外レーザーで照射、走査することで 3 次元構造を造形する。架橋前のゲルモノマー溶液の組成により、様々な特性のゲルを造形することができる。図 1 に RepRap SWIM-ER の外観を示す。

本実験では ICN (Inter-Crosslinking Network structure) ゲル、PDN (Particle Double Network) ゲルの二種類のゲルを用いた。この理由として、これらのゲル材料は前述の RepRap SWIM-ER の単純な 3D モデルの造形可能であることが明らかにされているが、物性が異なるため、食品の造形に適した材料であるかを見極める必要があるからである。ICN ゲルは、複数の高分子が相互架橋することで 3 次元の網目を形成している。PDN ゲルは、硬くて脆い高分子ゲルの顆粒内に、柔らかいゲルを構成する高分子が入り込んだネットワークを形成している。

表1に ICN ゲルの組成を示す。モノマーとして DMAAm (*N, N*-Dimethyl acrylamide), ポリマーとして HPC(Hydroxypropyl Cellulose), 架橋剤として KarenzMOI-EG(2-(2-methacryloyloxyethoxyethylisocyanate), 光重合開始剤として波長 405 nm に吸収を持つ TPO(Diphenyl(2, 4, 6-trimethyl benzoyl)phosphine Oxide), 印刷精度向上のための吸収剤として AS-150(Benzenesulfonic acid, 2, 2'-(1, 2-ethenediyil)bis[5-[4-methoxy-6-(phenylamino)-1, 3, 5-triazin-2-yl]amino]-, sodium salt (1:2)), 精製水を使用した。

表2に PDN ゲルの組成を示す。ゲルのモノマー溶液 NaAMPS (2-Acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid sodium salt solution), 架橋剤として MBAA (*N, N'*-methylene-bisacrylamide), 開始剤に  $\alpha$ -keto( $\alpha$ -ketoglutaric Acid) を入れる。柔らかいゲルのモノマー溶液の組成は DMAAm, 架橋剤として MBAA, 開始剤として TPO, 吸収剤 AS150, 精製水を使用した。



Fig. 2 Food formed samples by RepRap SWIM-ER  
(Prawn, Octopus leg, Jellyfish)

### 3. 造形物の評価手法

造形物の評価方法として含水率測定と圧縮試験を行った。含水率測定は RepRap SWIM-ER で直径 12mm, 厚さ 3mm の円柱形のゲルを造形し、これを 2 日間純水に浸して完全に膨潤させたものを使用し、加熱乾燥式水分計を用いて含水率を算出した。

圧縮試験では、含水率測定時と同様の円柱を ICN ゲル、PDN ゲルでそれぞれ 10 個ずつ造形し、力学試験機(島津製作所 AGS-X)を用いて、膨潤前、膨潤後のゲル試料の圧縮試験を 5 回ずつ行った。ヤング率をそれぞれ求めた後、それらの平均値を結果として採用した。

### 4. 結果及び考察

まず初めにエビ、タコ足、クラゲの 3 種類の食品模倣ゲルを造形した。それぞれ ICN で作成したものを図 2 に示す。図 2 の左図に示すゲルエビモデルは体の曲線を再現することができたが、図 2 の中央図に示すタコ足は吸盤の表面形状が微細な凹凸をもっていることが 3 次元造形の難易度を上げており、印刷条件(印刷速度、Z ピッチ幅)を調整することで、吸盤をきれいに造形することができた。図 2 の右図に示すクラゲの造形では、丸みを帯びた曲面部と細い触手部の造形難易度を上げることが明らかとなり、吸収剤の添加量や印刷速度を調整することで造形が可能になった。PDN ゲルを用いて同じ形状を造形した場合も、ICN ゲルの造形と同様の印刷結果が得られたため、材料による難易度および外観に大きな差が生じることはないことが判明した。

Table 3 Breaking load and Young's modulus

ICN gel			
Sample name	Breaking Stress[MPa]	Breaking Strain[-]	Young's modulus[kPa]
Unswelled gel	-	-	12. 86±2. 96
Swelled gel	0. 28±0. 07	0. 83±0. 08	4. 24±1. 47
PDN gel			
Sample name	Breaking Stress[MPa]	Breaking Strain[-]	Young's modulus[kPa]
Unswelled gel	0. 24 ±0. 05	0. 58 ±0. 22	79. 29 ±59. 60
Swelled gel	0. 16 ±0. 03	0. 55 ±0. 23	25. 36 ±13. 63

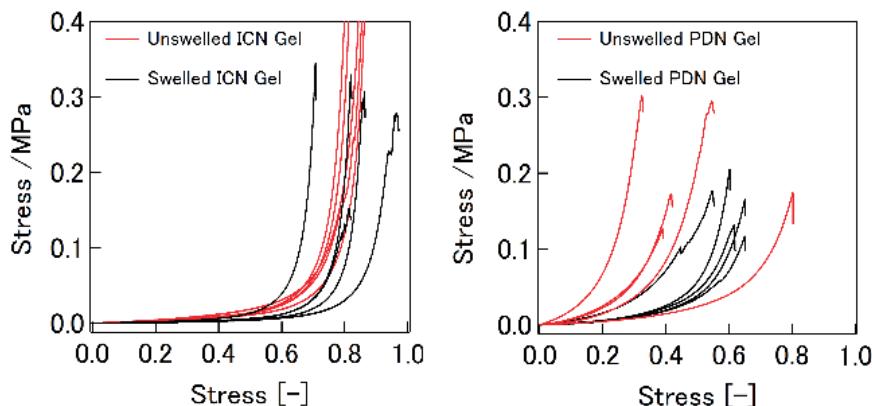


Fig. 3 Compression test results

RepRap SWIM-ER で造形された ICN, PDN ゲルの含水率は、それぞれ 98. 8, 92. 9%であった。いずれも高い含水率を持ち、ICN ゲルが PDN ゲルよりも含水率が高いことが確認された。図3に RepRap-SWIMER で造形した ICN, PDN ゲルの圧縮試験結果を示し、表 3 に圧縮試験から得られた各ゲル試料の破断応力、ヤング率を示す。ICN ゲルは PDN に比べ低いヤング率を示しているが、破断強度が高く、柔らかいゲルであることがわかる。また ICN, PDN ゲルいずれにおいても、膨潤後の方が低いヤング率、破断応力を示した。膨潤前の ICN ゲル造形物は、装置の荷重限界である 1000 N で圧縮しても破断させることができなかった。

## 5. 結論

食品に似せた形状の造形を 3D ゲルプリンタ”RepRap SWIM-ER”を用いて行った。造形速度や吸収剤の添加量などの印刷条件を調整することで、造形精度の向上が確認され、エビ、タコ、クラゲの造形に成功した。3D プリントした ICN, PDN ゲルの含水率測定と圧縮試験を行い、膨潤後のゲルは柔らかく、90%以上水分を含むことが確認された。また ICN ゲルの方が PDN ゲルより柔らかくて、よく伸びることが分かった。

今後は実際の食品の物性を測定し、含水率やヤング率、破断強度の目安を作成することで、RepRap

SWIM-ER による本物の食品と同じ物性を持つ食品ゲルサンプル造形を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO)によって支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1]平井 慎一, ”食品ハンドリング用ロボットハンド” (July 3, 2017)  
[\(Retrieved on September 17, 2020\)](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/56/10/56_787/_pdf/-char/ja)



# 代替食品における3D フードプリンターの活用

Utilization of food 3D printer for substitutional food

倉持 丘帆<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Takaho KURAMOCHI<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

本研究では、食用コオロギを粉末化したコオロギパウダーを加えたクッキー生地を材料として、スクリュー押し出し式の3Dフードプリンターで造形を行い、造形物の形状評価を行った。その結果、クッキー生地の調製において、加えるバターの量によって、造形後の生地から油分がにじみ出る現象が起きることが分かった。バターの量を減らすことでの現象は抑えられるが、吐出の挙動に問題があり、造形がうまくできないことが分かった。装置の押し出し条件だけでなく、クッキー組成の調整も重要であることが分かった。

キーワード: 3D フードプリンター, コオロギパウダー, クッキー, バター

## 【Abstract】

In this study, the cookie dough containing powdered edible crickets was molded by a screw-type extrusion 3D food printer, and the shapes of the 3D printed cookie were evaluated. As a result, it was found that, in the preparation of the cookie dough, depending on the amount of butter added, oily fluid oozes out of the dough after it has been printed. Although this phenomenon can be suppressed by decreasing the amount of butter, it was found that the dough does not behave properly due to the behavior of the dough. We found that in addition to the printing conditions, composition of the dough was also important.

Keywords: 3D food printer, cricket powder, cookies, butter

## 1. 序論

将来、世界の人口爆発に伴う食糧危機、特に、食肉に代表されるタンパク質源の枯渇が懸念されている。食肉に代用させる食糧として昆虫食が挙げられる。昆虫由来のタンパク質濃度は、昆虫を乾燥させ粉末状にした状態で 50%から 70%と非常に高い数値となっている[1]。また昆虫は家畜と比較して高い飼料変換効率を示し、温室効果ガスの排出量が比較的少ないので、環境に対しての負荷をはるかに軽減できることから、昆虫食文化の普及が、この問題を解決する手段として期待されている。しかし日本で昆虫食を普及させる場合の最大の問題は、見た目による忌避感である。

本研究では、この忌避感を低減させるため、昆虫を乾燥させて一旦パウダー状にし、他の基材と混ぜ、これを3D フードプリンターによって見た目が別の形に造形する手法の開発を行う。昆虫成分だけではなく、混ぜる基材に関しても、食材を選定し、3D フードプリンターで造形が可能な組成を検討する。

## 2. 実験

### 2.1 試料

造形に使用する2種類のクッキー生地を作成した。薄力粉 40g, 砂糖 20g, コオロギパウダー 20g, 卵黄 1個にそれぞれ 30g, 40g のバターを使用した。また、コオロギパウダー(図 1)は、ヨーロッパイエコオロギ(株式会社アルオーエヌ社)を使用した。実験では室温 25°C ± 1°C で行い、造形時には材料の加熱、冷却は行わなかった。



Fig. 1. コオロギパウダー

### 2.2 3D フードプリンター

本実験で用いた3D フードプリンターは、世紀社(米沢市)製のFP-2400である(図 2)。FP-2400 は電源 BOX, スクリュー駆動部, スクリュー部, X-Y テーブルから構成

されており、造形最大サイズは  $90 \times 90 \times 60\text{mm}$ 、ノズルの内径は 2mm である。造形にはスライサー・ソフト (Simplify3D)、制御ソフト (pronterface) を使用した。ノズル移動速度 5mm/s の条件で造形を行った。

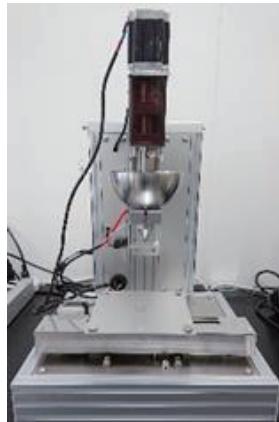


Fig 2. スクリュー式 3D フードプリンター FP-2400

### 2.3 実験方法

$30 \times 30 \times 10\text{ mm}$  の試験片データを作成し、2.1 で調製したクッキー生地 2 種類を材料として、FP-2400 を用いて生地を吐出し、造形を行った。その後、 $170^\circ\text{C}$ での予熱を行ったオーブンに造形物を入れ、 $170^\circ\text{C}$ で 15 分間加熱し、試験片を焼成した。

### 3. 結果

3D フードプリンターによるクッキー生地の造形物と、それをオーブンで焼成した後の状態を図 3, 4 に示す。図 3において、バターを 40g 使用したクッキー生地の造形物は、造形では成功しているが、油分がにじみでていることが確認できた。また、焼成すると約 2 倍に体積が膨張したことが確認できた。図 4において、バターを 40g から 30g に減量したこと、造形後、生地からの油のにじみが少なかったことが確認できた。しかし積層中に生地が定着せず、ノズルの動きに合わせて材料が引きずられるような現象が確認され、造形物の形が崩れてしまった。したがって、材料に含まれるバターの量によって、油分のにじみだしや造形の挙動に変化がみられることが分かった。



Fig 3. バター40g を含むクッキー生地の造形後と焼成後



Fig 4. バター30g を含むクッキー生地の造形後と焼成後

### 4. 結言

コオロギパウダーを用いたクッキーの造形が可能であることを確認したが、材料に含まれるバターの量で造形精度に影響が出ることが分かった。

### 5. 今後の展望

本実験より、精巧な形状のクッキー生地の造形のためには、生地の組成の検討が必要であると考えられる。今回は、非常に少ないサンプル数での試行であったので、今後試験回数を増やし、生地の組成と造形の関係性を調査する必要がある。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO) によって支援を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] Food Chemistry volume 311 “Edible insects: An alternative of nutritional, functional and bioactive compounds”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856419308574> (Retrieved on September 17, 2020)

# Functgraph の応用と機能生成の考察

Application of Functgraph and consideration of function generation

黒木 優人, 渡邊 恵太

Yuto KUROKI, Keita WATANABE

明治大学 先端数理科学研究科

Meiji University, Graduate School of Advanced Mathematical Sciences

## 【要約】

我々は、3D プリンタに搭載しているアクチュエータを利用し、人が介入せずに部品をプリントやサポート除去、組み立ておよびビルドプレート上でアクチュエートを実現する Functgraph を研究している。本手法は 3D プリンタが立体物を造形するだけでなく、機能生成まで可能にする装置としての可能性を示した。一方で、これまで示したアプリケーション例は限定的であった。そこで本研究では、本手法の性質や特徴をさらに深めるためにアプリケーションを探索する。本稿では、本手法を用いたサンドイッチの製造装置の生成を試作し、特に切る・重ねるといった機能の実現性について考察する。

キーワード: 3D プリンティング, ファブリケーション, FDM3D プリンタ, ロボティクス

## 【Abstract】

We have been developing Functgraph, a system using actuators installed in 3D printers to print, de-support, assemble and actuate parts on a build plate without human intervention. The system has showed a possibility of 3D printer as a function generator. However, there had only been limited examples of applications, so more advanced applications were needed to be considered. In this paper, we made a sandwich manufacturing device as a more advanced application example with Functgraph and considered the effectivity of Functgraph based on this application prototype.

Keywords: 3D printing, Fabrication, FDM 3D Printer, Robotics

## 1. はじめに

熱溶解積層方式(FDM)3D プリンタは、XYZ の3軸にそれぞれモータを持つヘッドからフィラメントを半液状にして押し出してオブジェクトを積層する。我々は、3D プリンタに搭載されているアクチュエータを利用し、人が介入せずにオブジェクトをプリントからサポート除去、組み立ておよびビルドプレート上でのアクチュエートを実現する Functgraph を研究している[1][2]。本来、3D プリンタはプリントするためだけの装置として利用するが、本手法はプリントしたオブジェクトを組み立てからアクチュエートまですることで、機能生成を可能とする装置としての可能性を示した。一方、これまで示したアプリケーションは限定的であり、本手法で生成できる・できない機能についての議論が不十分であった。

そこで本研究では、本手法の性質や特徴をさらに深めるためにアプリケーションを探索する。本稿では、本手法を用いてサンドイッチを作るアプリケーションを試作し、設計する上で生じる制約を明確にし、切るや重ねなどの機能の実現性について考察する。

## 2. Functgraph とその課題

Functgraph とは、3D プリンタが output したオブジェクトを組み立てたりアクチュエートすることで、様々な機能を生成することを可能にした研究である。本手法でヘッドにアタッチメントを取り付け、組み立てやアクチュエートを可能にするためのエンドエフェクタとその他5つのプリント手法を開発し、3つのアプリケーションを試作した。しかし、試作したアプリケーションでは Functgraph の可能性を十分に示すことができず、提案手法の性質や特

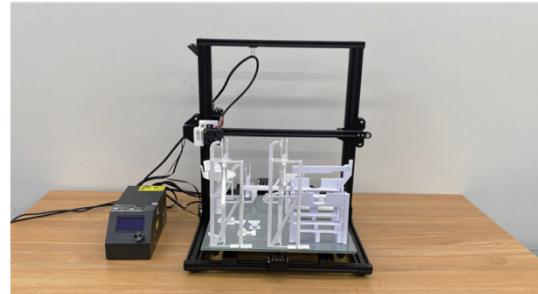


図 1 設計に基づき人の介入なしに自己生成したサンドイッチを加工環境、パン、きゅうりの材料を乗せてサンドイッチまでの加工を自動で行う。

徵について議論が足りない課題が残った。

## 3. サンドイッチ加工生成機の生成と試作

### 3.1. 応用対象の探索と決定

本研究では Functgraph のアプリケーションとしてサンドイッチ加工生成環境を試作する。今回、サンドイッチ加工生成を対象としたのは、人の作業として料理は比較的複雑であり、食事は日常不可欠な活動のためである。サンドイッチはその中でも、制約や工程の少なさ、食材の自由さや実現性などから決定した。今回のサンドイッチはハムときゅうりを2枚のパンで挟み、最後に2つに切り分ける加工をおこなう。

### 3.2. サンドイッチ加工装置の概要

Functgraph の手法に基づき、エンドエフェクタの取付可能にした 3D プリンタ上で、自己生成したエンドエフェクタを用いて、サンドイッチを加工するための環境を自己生成する。図1が自己生成されたサンドイッチ加工環

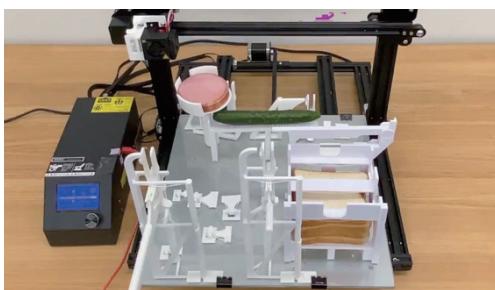


図 2 食材をセットした後

境である。ここに図2のように、所定の場所にパン、ハム、きゅうりを配置する。その後は次の順番に動作し、サンドイッチの加工生成を行う。

- 1, パンを一枚取り、料理場に置く
- 2, ハムを一枚取り、パンの上にのせる
- 3, きゅうりを輪切りにし、ハムの上にのせる
- 4, パンを1枚取り、きゅうりの上にのせる
- 5, 半分に切る

これらの工程の中で共通する目的を持つ動作を機能として捉える。1と2は「移動」、3と5は「切る」、4は「重ねる(のせる)」の3つの機能によってサンドイッチが完成する。同じ機能でも対象物が違えばオブジェクトは変わるために個々に設計する必要がある。

### 3.3. 応用対象の設計実装

組み立てる物はハムとパンをそれぞれ運ぶタイプのエンドエフェクタ、きゅうりとサンドイッチをそれぞれ切るタイプのエンドエフェクタの計4つである。形状に違いはあるがエンドエフェクタの構造と組み立て方は全て同じであるため、ここではサンドイッチを切るエンドエフェクタを例に組み立てについて説明する。

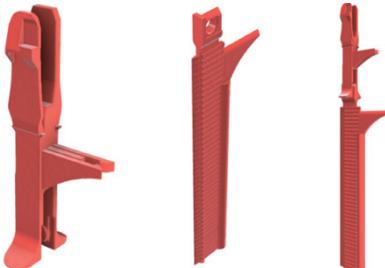


図 3 サンドイッチを切るエンドエフェクタ、左2つは右のように繋がり、真ん中のパーツを直角にすることで完成する。

エンドエフェクタは図3中央のようなパンを切る刃のパートとアタッチメントに取り付けるための図3左のパート(以下、ジョイントと呼ぶ)の2つのパートから構成される。まずヘッドのアタッチメントにジョイントを取り付け、その後に刃のパートと合体し引き上げて図3右の様にする。刃のパートを水平にするために引っ掛けながらヘッドが弧を描くように動くことでジョイントに固定され、エンドフ

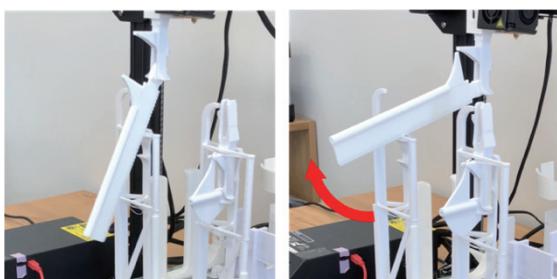


図 4 矢印の陽光にナイフを起こして組み立てる

エクタは完成する(図4)。

2つのパートで設計した理由は運ぶタイプと切るタイプで異なる。運ぶタイプでは、ビルドプレートから引き上げる際に形状によって引き上げる力が足りない。最も軽い力で引き上げられ、プリント可能な方向で造形したためである。切るタイプでは、一体だと刃が下方になりプリントができないことと、刃の部分となるべく鋭くプリントするために立てるようにプリントした。

#### 3.3.1. パンのエンドエフェクタ

組み立て後は図5右の赤丸に囲われた部分に置く。エンドエフェクタのパンが乗る部分の裏側には溝があり、赤枠部分にはエンドエフェクタがずれないように溝にはまる様な突起がある。



図 5 左:パンを運ぶエンドエフェクタ。右:赤い丸の部分にエンドエフェクタを保管する場所。

#### 3.3.2. ハムのエンドエフェクタ

重ねられたハムの間にエンドエフェクタが差し込むように2本の棒の先端は鋭利で上に乗る(図6左)。ハムは棒と棒に橋渡しした状態で乗るため、棒同士の間の部分のハムを押し込むことで落とせる。図6右のようにエンドエフェクタを外せるオブジェクトがあり、組み立て後はここに保管され再利用ができる。

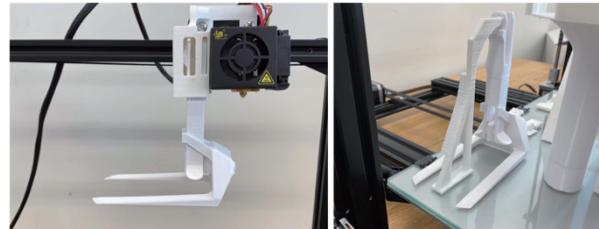


図 6 ハムを運ぶエンドエフェクタ。右:エンドエフェクタを外して保管する場所。

#### 3.3.3. きゅうりのエンドエフェクタ

きゅうりを切るとき転がらないようにするために、きゅうりを置く台と刃はV字の形状である(図7左)。保管するオブジェクトには組み立て後の形でエンドエフェクタを付け外しできる構造があるため再利用ができる(図7右)。

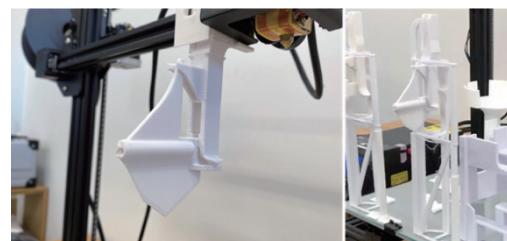


図 7 左:きゅうりを切るエンドエフェクタ。右:エンドエフェクタを外して保管する場所。

#### 3.3.4. サンドイッチを切るエンドエフェクタ

サンドイッチを切るには平たい刃では切れないとメノコギリのようにギザギザの形状で設計した(図8左)。保管するオブジェクトはきゅうりと同じである(図8右)。

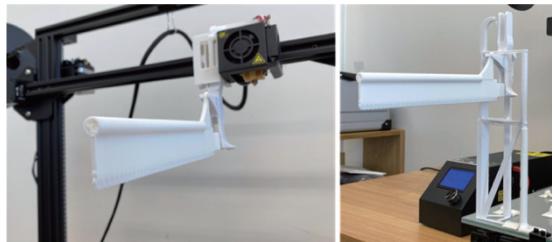


図 8 左:パンを切るエンドエフェクタ、右:エンドエフェクタを取り外して保管している様子

#### 4. サンドイッチ加工生成機の作動結果

##### 4.1. パンの移動

パンを取るエンドエフェクタを取り(図9左上), 下から一枚取った後(図9右上), パンを乗せたまま置かれる(図9左下). その場できゅうりやハムを乗せた後,再度パンを取るエンドエフェクタを取り, 図9右下のようにパンを取った位置の上にある台にのせる. 使い終わったら元の位置に戻す(図9左上).

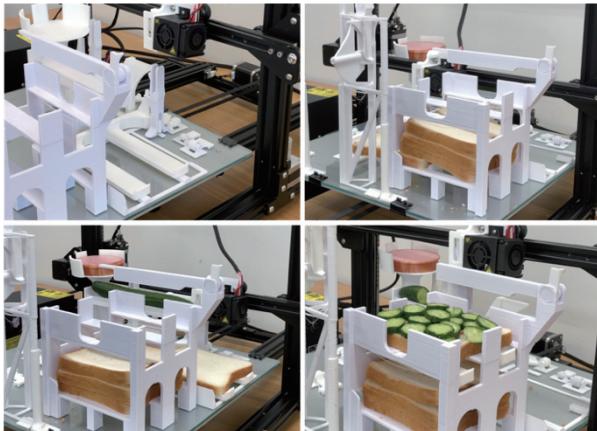


図 9 パンの移動の一連の様子. 左上, 右上, 左下, 右下の順でアクチュエートし, 新たに作るときは左上に戻る.

##### 4.2. ハムの移動

ハムを上から1枚取った後(図10左), 移動してハムを落とす(図10右). 落とした後は元の場所にエンドエフェクタを戻す(図6右).



図 10 左:ハムを一枚差し込んで上から取っている様子. 右:ハムをパンの上に乗せた様子.

##### 4.3. きゅうりを切る

きゅうりを一枚切った後, 切られた薄い方のきゅうりを



図 11 左:きゅうりに刃を入れている様子. 右:きゅうりをサンドイッチに乗せている様子.

サンドイッチにのせる必要がある. きゅうりをのせている台はV字なため薄いきゅうりは転がらずにその場に留まり, 切った直後にサンドイッチの方向にエンドエフェクタを動かすだけできゅうりはサンドイッチの上に落ちる. 切り終わった後エンドエフェクタは図7右に戻される.

##### 4.4. サンドイッチを切る

サンドイッチを切る台はパンを設置しているオブジェクトと一緒にである. 切る途中で具がずれないように囲いがある. エンドエフェクタの刃はサンドイッチに対して垂直で前後に動かしながら徐々に下に移動する. 台にはエンドエフェクタの刃が入る溝があり, 一番下まで切ればサンドイッチが切れる. 完了後は図8右に戻される.

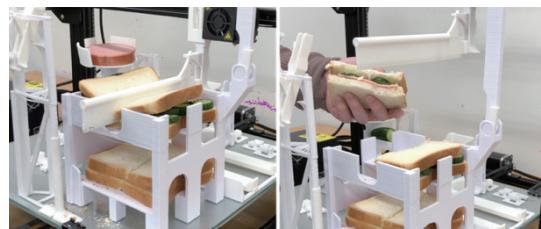


図 12 サンドイッチを切っている様子.

##### 4.5. パンを重ねる

具材をパンに乗せ終えた後は切る台に運ぶ. パンを移動するエンドエフェクタを取り付けた後, 台にある棒を倒すことでパンを落とせる構造が出来上がる. パンを取った後, 倒した棒にパンを当てながらエンドエフェクタを動かすことでパンが重ねられる(図13左). その後はエンドエフェクタを戻し, サンドイッチを切るエンドエフェクタを取り付け, 先ほど倒した棒を再び立てることでサンドイッチを切ることができるようになる.



図 13 パンを乗せている様子.

##### 4.6. 完成したサンドイッチについて

目的通りのサンドイッチを完成することができた. 断面が本来の包丁で切るよりも荒いことやきゅうりは輪切りではなく斜め薄切りの方が良いなど改善点は多少あるものの, 食べる分には問題なく美味しいただけた.



図 14 完成したサンドイッチ

#### 5. 応用対象の考察

試作したアプリケーションを元に機能の考察をする.

##### 5.1. 移動

###### 5.1.1 対象物の把握

プレート上のどこに何があるかを3Dプリンタは把握で

きず、ヘッドの経路は途中で変更できないため、アプリケーションが正常に機能しているか関係なく動き続ける。そのためプレート上のものを移動する時、どこに何があるかを正確に把握でき、運び途中で落とさず確実に対象物を取る/離すことができる設計が求められる。ヘッドにセンサを取り付けて検知したりカメラで監視するなどプレート上を把握する機材を附加することで、障害発生時に再試行するなどアプリケーションとして成功する確率が向上する。

### 5.1.2. 物を取る/離す

エンドエフェクタの設計だけでなくプレート上のオブジェクトと共に動作することで、対象物を取る/離す機能を設計する必要がある。人間の場合は重なったパンを取る時一番上から掴んで取れるが、Functgraph の場合エンドエフェクタ自身が把持したり吸着することは困難である。そのためプレート上のオブジェクトと相対的にエンドエフェクタを動かすことで物を取る/離すを実現しなくてはならず、オブジェクトの肥大化や設計の複雑化などが起こる。エンドエフェクタに動力与える様な新たなアクチュエータを取り付けて規格化し、それに合わせてエンドエフェクタの設計することで、これらの課題を解決できる可能性がある。

### 5.2. 切る

#### 5.2.1. 刃の精度

試作したアプリケーションでは一方から圧力を前後に動かすことで生じる摩擦によってサンドイッチやきゅうりを切断した。切る対象によって刃の鋭さが求められるが、現在の FDM3D プリンタの造形精度では不十分である。今後の造形精度の向上を期待したいが、包丁の様に造形してから研ぐことで鋭くしたり、せん断など切り方を変えることも考えられる。

#### 5.2.2. 切られた側の位置の把握

物を切った後に形状が変わって予測がつかない動きをする場合がある。例えばきゅうりを薄く切った時、切られたきゅうりが転がったり倒れたりすることがある。試作したアプリケーションでは薄いきゅうりが転がらず倒れてもパンの上に乗せられる様にきゅうりの台を V 字にした。この様に切るに限らず物が変形することにより生じる動きも予測した設計が必要になる。

#### 5.2.3. 同時に複数の動作をする

三次元に動くヘッドは1つしかないため、複数の動作を同時にすることは不可能である。例えばサンドイッチは道具がバラバラにならないように抑えながら切る必要があるが、切るエンドエフェクタを装着するとサンドイッチを抑えることはできない。そこでサンドイッチの周りに囲いをつけることで道具がはみ出ないように設計した。このように、プレート上のオブジェクトの形状で複数の動作を発生させない設計が必要である。これに対し、ヘッドが2つあれば設計が簡素化できたり作業効率やプリント速度の向上が期待できる。

### 5.3. 重ねる

正確に重ねるにはエンドエフェクタが重ねる対象物がずれない様に持つか、ずれたとしてもオブジェクト側に補正する機構や形状を含めて設計する必要がある。また、移動の節で述べたようなヘッドにセンサとアクチュエータがあれば正確に重ねることも期待できる。

## 6. 議論

今回の応用例から Functgraph の可能性について議論する。

### 6.1. プレートの狭さ

ヘッドの導線を確保しなくてはならないため、オブジェクト同士で空間を設ける必要がある。試作したアプリケーションではパンを設置する場所の上にサンドイッチを切る場所を設けるなどコンパクトに設計したが、プレートが広ければ広いほど導線が確保しやすくオブジェクトも簡素化しやすくなる。

### 6.2. 3D プリンタのトルク

使用した 3D プリンタはプリントだけをする使い方を前提としているため、アプリケーションのアクチュエートをするには各モータのパワーでは不十分な場合がある。

### 6.3. Functgraph としての未来

一般的な 3D プリンタは、食器やケースなど形状そのものが機能として意味を持つ道具やフィギュアの様な見た目に価値がある造形物など、静的なオブジェクトを印刷することは得意である。これは現状の 3D プリンタで創り出している価値は「モノ」重視であると考える。筆者は 3D プリンタで「コト」を創り出す装置として振舞うことで 3D プリンタとしての価値は広がり、新たな日常に繋がると考える。本研究でもサンドイッチを作るために包丁やまな板などモノを作るのではなく、サンドイッチを作るためのオブジェクト群で目的を叶えるためコトとして生成した。このようにコトをベースとして使うことで 3D プリンタの使用目的に変化が起こると期待する。また、スマートフォンのアプリストアのようにユーザーはダウンロードしたデータを再生することで、ユーザーは実世界で様々な恩恵を受ける。同じコトを生成するアプリケーションでも開発者によって様々に差別化できる。例えば同じサンドイッチを作るとしても、今回試作したアプリケーションではハムときゅうりを具材としたが、卵やカツを具材としたサンドイッチを作るなど違いを生み出せる。この様に、Functgraph によって 3D プリンタはスマートフォンの様な実世界におけるプラットフォームとして使われる。

## 7. おわりに

サンドイッチのアプリケーションを試作し、機能を元にした考察と Functgraph の可能性を考察した。今後はサンドイッチ以外のアプリケーションを試作し、引き続き Functgraph の性質や特徴を深めていく。

## 参考文献

- Shohei Katakura, Yuto Kuroki, Keita Watanabe. A 3D Printer Head as a Robotic Manipulator. Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Pages535-548 DOI:<https://doi.org/10.1145/3332165.334785>
- Shohei Katakura and Keita Watanabe. 2018. PrintMotion: Actuating Printed Objects Using Actuators Equipped in a 3D Printer. In The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings (UIST '18 Adjunct). ACM, New York, NY, USA, 137–139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3266037.3271627>

# COVID-19 下における 3D プリントによるフェイスシールド製造のムーブメントの調査

Survey of 3D Printed Face Shield Manufacturing Movements under COVID-19

青木 まゆみ<sup>1</sup>, 常盤 拓司<sup>1</sup>, 宮川 祥子<sup>1</sup>, 吉岡 純希<sup>1</sup>, 道用 大介<sup>2</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>

Mayumi AOKI, Takuji TOKIWA, Shoko MIYAGAWA, Junki YOSHIOKA, Daisuke DOYO, Hiroya TANAKA

<sup>1</sup>慶應義塾大学, <sup>2</sup>神奈川大学

<sup>1</sup>Keio University, <sup>2</sup> Kanagawa University

## 【要約】

本調査では、新型コロナウイルス感染症流行下の日本国内において取り組まれた 3D プリンタを用いたフェイスシールド製作活動について調査し、14 万を超えるフェイスシールドが製作されたことが分かった。このムーブメントには二つのフェイスシールド 3D モデルの無償公開とデジタル製造のユーザーや技術者の存在が寄与したものと考えられ、生産は中小企業が大きな担い手となった。更にデータの改変についても着目すると、フェイスシールドの不足という医療的危機に素早く対応するために「生産性」が最も重視されており、次いでより使い易くという「機能性」についての改変がなされていることが分かった。

キーワード:3D プリンタ, 3D データ, モデリング, ビジネスマodel, 流通

## 【Abstract】

This survey examined the 3D printer-based faceshield production activities undertaken in Japan during the COVID-19 epidemic and found that over 140,000 faceshields were produced. It is believed that the free release of two faceshield 3D models and the presence of digital manufacturing users and technicians contributed to this movement, with small and medium-sized companies playing a major role in production. Furthermore, in terms of data modification, it was found that "productivity" was the most important factor in responding quickly to the medical crisis of the face shield shortage, followed by modification of "functionality" to make the face shield easier to use.

Keywords:3D printer, 3D data, modeling, business model

## 1. 序論

本調査では、新型コロナウイルス感染症流行下の日本国内において取り組まれた 3D プリンタを用いたフェイスシールド製作活動の調査について報告する。新型コロナウイルス感染症が世界的に流行したこと、世界規模でサプライチェーンの分断が生じた。新型コロナウイルス感染症対策の最前線となった医療現場では、この分断の影響を受け、感染症対策のための医療用資材の不足が発生した。このような状況を打開する取り組みとして、世界的に 3D プリンタを用いてフェイスシールドを製作し、病院等必要とするところに提供する活動が広がりを見せた。この取組の全体像を把握することは、3D プリンタを始めとするデジタル製造のもつ適量生産の可能性を理解する助けになると考えられる。

## 2. 方法

調査は2段階に分けて実施した。第一段階では全体像を把握すること目的に、Google Form によるウェブアンケート形式で実施[1]した(以降この調査をサーベイ調査と呼ぶ)。2020 年 6 月 8 日から 7 月 23 日まで実施し、118 件の回答を得た。

第二段階では、第一段階で得られた結果をもとに、フェイスシールドの 3D データがどのように改変されてい

ったかに着目し、調査を行った(以降この調査を深掘り調査と呼ぶ)。一次アンケート(サーベイ調査)でデータを改変またはオリジナルで作成したとの回答者を対象に、調査票への記入および、電話、オンライン会議システム等を用いたインタビューを行った。調査は 7 月 9 日から開始し、9 月 16 日の時点で 17 件の回答を得た。なお、第一段階の調査の完了を待たずに第二段階の調査を開始したのは、期間の早期に提出されたアンケート結果を予備的に分析した結果、改変について特徴的な回答が見られたことと、調査対象者が、フェイスシールド製作の取り組みを終えてから時間が経つと、記憶が薄れてしまう可能性があったことから、第一段階の完了を待たずに実施することにしたためである。

## 3. サーベイ調査結果

### 3.1 製造者数の推移

今回の調査で、3D プリントで製作されたフェイスシールドは 142,085 個(2020 年 9 月 17 日時点)であった。

医療資材の不足は 3 月頃から発生していたが、4 月に入ると東京都での COVID-19 関連の入院者数が 500 名を超えた[2]、フェイスシールドをはじめとする医療用資材の不足が周知されるようになった。これに呼応する形で全国の 3D プリンタを始めとするデジタル製造の技術

者とユーザーがフェイスシールドを作成し、医療機関へ届ける取り組みが増加している(表1)。

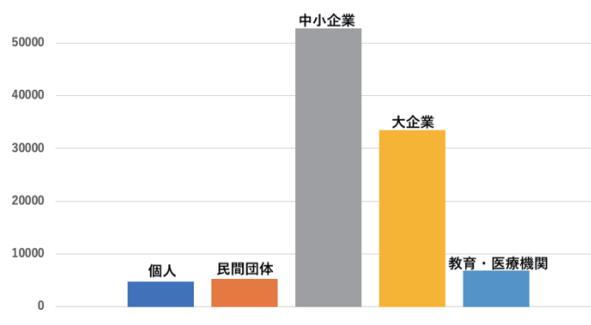
この増加の背景には、大阪大学大学院 医学系研究科 特任教授の中島清一氏を中心とした产学官連携機関「プロジェクト ENGINE」にてフェイスシールド 3D データが 4 月 2 日に無償データとして公開[3]、神奈川大学 経営学部 準教授の道用大介氏が 3 月 31 日に Github 上で無償データを公開[4]したことが大きく寄与したものと考える。本項では大阪大学のデータを阪大モデル、神奈川大学のデータを Doyo モデルと呼ぶ。

3月	9	5月上旬	20
4月上旬	15	5月中旬	9
4月中旬	28	5月下旬	1
4月下旬	25	6月	2

表 1. フェイスシールド作成開始日(人)

### 3.2 製造者の種類

最終的に14万を超えるフェイスシールドが作成されたが、その生産を最も支えたのは中小企業であった(図1)。しかし、この活動の初期において、ムーブメントを牽引したのは、民間団体として区分されているうちの、ファブラボに代表されるファブ施設であった。3 月中に製作を開始したと回答した 9 名の内、3 名は日本国内のファブラボ(鎌倉、浜松、品川)としてフェイスシールドの作成に取り組んでいる。このファブ施設の取り組みが全国のマイカーズを巻き込んだと考えられる。



### 3.3 製造量

本章の冒頭でも述べたが、今回の調査で、3D プリントで製作されたフェイスシールドは 142,085 個であった。

アンケートに回答した個人、企業団体等の製造数は分散していた。

~50 個	~100 個	~200 個	~500 個	~1000 個
22	23	22	23	14
~2000 個	~5000 個	~10000 個	10001 個~	
5	4	1	3	

表 2. 総製作数別/回答者数

1万を超える製作を行なった会社が3社ある  
この3社での製作数が92500個に及ぶ

製造数が 1 万個を超える 3 社のうちの 1 社「株式会社ジャパン・メディカル・カンパニー」は医療領域関連企業で、3 月から製造を開始し、その製造数は 2020 年 9 月現在 5 万個に及んでいる。インタビューでは、医療現場のフェイスシールド不足の海外情報を東京慈恵会医科大学 大木教授からの指導で知り、阪大モデル、Doyo モデルの登場以前から、大木教授とフェイスシールド の 3D データを共同開発し、製造に着手したと回答している。残り2社は社外で製作された3D データを使用(一部改変)して使用し製造を行ったと回答している。

### 3.4 製造量の推移

3.2 製作者の種類において報告した製作者のカテゴリ毎の製作数の時系列の分布を図 4 に示す。製造数の急激な増加は、2度あった。一度目は、4月第 1 週を境とする急激な増加である。この時期は、阪大モデル、Doyo モデルの公開時期と重なっている。二度目緊急事態宣言以降で、中小企業の製造数の増加に加えて、大企業の製造が始まった時期である。

### 3.5 利用モデル

3D プリンタでフェイスシールドを製造する際に阪大モデルと Doyo モデルが用いられたことは先に述べた。アンケート結果では、阪大モデルと Doyo モデルそれぞれを改編したモデルまでを含めると、全取り組みの 3/4 を占めている(図 2)。

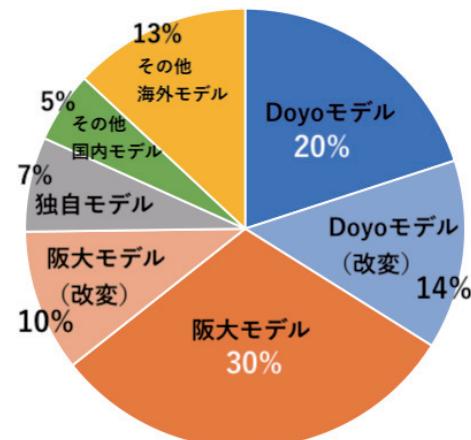


図 2 利用モデルの分類



図 3. (左)阪大モデル (右)Doyo モデル

阪大モデル写真提供:吉田真也様

Doyo モデル写真撮影:吉岡純希

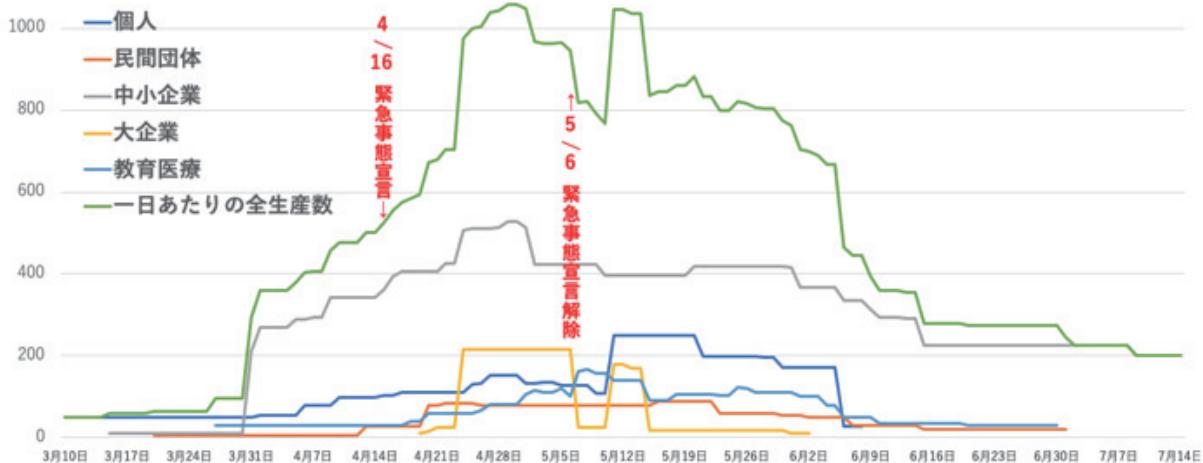


図 4. 製作者カテゴリ別フェイスシールド製作の時系列分布

#### 4. 深掘り調査結果

##### 4.1 データ改変の分類

Doyo モデルと阪大モデルを個別に見ると、Doyo モデルを採用した 39 名の内 41% に当たる 16 名が Doyo モデルを改変し、利用している。阪大モデルを採用した 47 名の内 25% に当たる 12 名が阪大モデルを改変して利用している(図 2)。Doyo モデルと阪大モデルで、改変しての利用率に差があった。これは著者の内観だが、Doyo モデルが Github 上でデータが公開されたためではないかと考えている。Github は、ソフトウェアのソースコードを共有し、コラボレーションで改良するためのプラットフォームであることから、公開された 3D データについてもこのプラットフォームの目的から演繹的に改良することを促した可能性が高い。

また、データ改変を行なった回答者からの追加調査とインタビューからどの点に着目してのデータ改変かを以下の 4 つの改変項目と元データからの改変率と合わせて 5 つの指標(表 3)で各 5 段階に分けて分類した。回答件数は 17 件である。

機能性	強度や使い易さなどの機能の工夫	50
意匠性	デザイン性など	7
装着性	装着感	41
生産性	製作速度や製作数の重視	54
改変率	元のデータからの改変度	-

表 3. データ改変指標分類(総ポイント数)

データの改変項目を分類すると、「生産性」が 54 と最も重視されているとなった。これは、フェイスシールドの不足に対応するために、生産スピードが求められたためだと考えられる。生産性を上げるためにデータ改変としては、細くする(軽量化のメリットもあり)、一度にプリントできる数を増やすといった回答が多く見られた(例:図 5)。

次いで重視された改変項目「機能」の工夫としては、プリッジ部分への透明シートの装着性を高める工夫が多く見られた(例:図 6)。

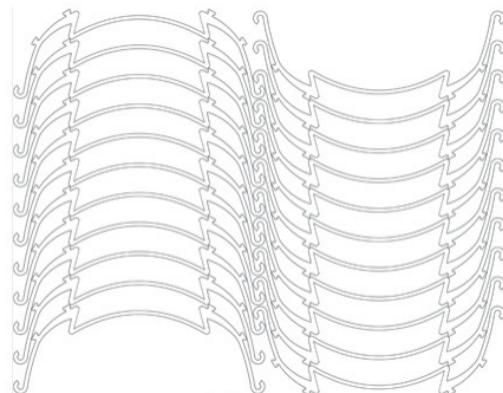


図 5. データ改変例

Doyo モデルを一度にプリントできる数を増やすためオリジナルより幅を広げて並べている(図版提供:高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター 佐藤伸彦様 平木雅彦様)

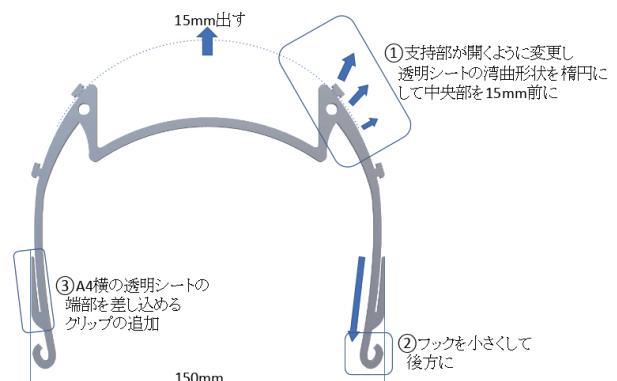


図 6. データ改変例

Doyo モデルからクリップの追加など 3 ケ所の機能的な改変を行なっている(図版提供:日本工業大学 先進工学部 ロボティクス学科 櫛橋康博様)

このように、フェイスシールドを供給するために、生産性は最優先とされたが、改変にあたり機能性の工夫も重視されていたことが本調査で分かった。一方、デザインやカラーなどの意匠性については、優先されていないことが明らかであった(表3)。

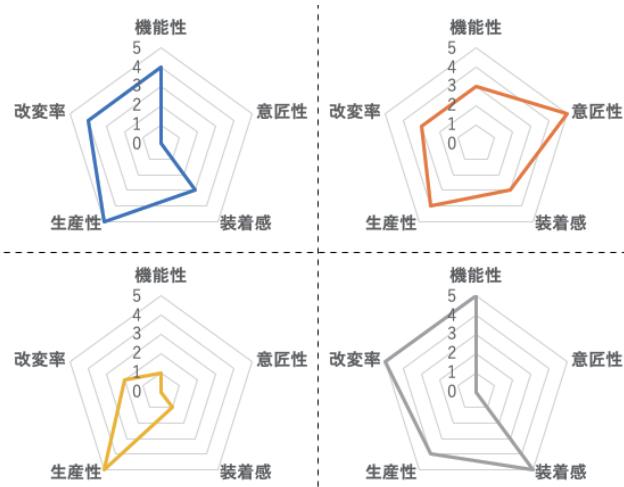


図 7.データ改変指標チャート

17 件の回答から 4 件の指標チャートを例示する  
全体的に生産性に着目した改変が多いことが分かる

また、元データからの改変率と四つの改変項目に関しての有意な関連性は見られなかった。

## 5. 結論

本調査で、3D プリンタによるフェイスシールドの作成は 14 万を超える数が製作され、医療現場のフェイスシールドの不足に大きな貢献をしたと考えられる。

また、この事態への初動では個人やファブラボといった民間団体がムーブメントを牽引し、その後そのムーブメントに応えた中小企業が製作の下支えをしたことがデータから見えた。

製造においては不足を補うために何より「生産性」が重視されているが、同時に「機能性」を高める試みがなされてもいたことは、ものづくりの土壤の成熟を感じさせた。

現在、ファーストインパクトともいべきこの3D プリンタによるメーカーズムーブメントは落ち着きを見せているが、課題も明らかになってきている。それは、医療従事者でないものが製作することによる、医療的観点の不足である。

これらの問題を解決するべく「FabSafeHub」[5]などのプロジェクトも始動しているが、今後はこのような医療的知見や情報の適時発信とその共有が重要になると考える。

## 謝辞

[COVID-19 における 3D プリントフェイスシールド製造に関するアンケート調査]にご回答いただいた皆様

## ※順不同

株式会社キャステム様 / ほわっと様 / 株式会社モノミラ様 / Face Shield Japan、SAKURA Tempesta 様 / 北海道北見工業高等学校様 / 株式会社モード・アンド・アソシエイツ様 / 神戸市立明石工業高等専門学校様 / 筑波大学スポーツ R&D コア様 / 株式会社 DAIMEI ECS DCP チーム様 / FabLab 長野様 / 地球科学可視化技術研究所様 / 陣内和宏(FabLab Saga)様 / 渡辺達也様 / 千葉政明様 / 小松隆史(小松精機工作所)様 / 片山浩晶(株式会社ストラタシスジャパン)様 / 八木裕香子(三木歯科医院)様 / 小野正晴(DiGITAL ARTISAN)様 / 服部修一(服部時計店)様 / 加茂春菜様 / 木村朋道様 / 黒田悠生(株式会社八木熊)様 / 三枝千洋(北海道臨床宗教師協会(仮称))様 / 花本様 / 後藤尚久(アンプローズ アンドカンパニー株式会社)様 / 竹村真郷(ファブラボ浜松)様 / 濱中直樹(ファブラボ品川)様 / 監物真樹(PC レスキュー)様 / 春見明子(岐阜県立東濃特別支援学校)様 / 小嶋隆則((株)小嶋技研)様 / 鐘居和政(ファブラボ世田谷)様 / 神子妙子様 / 小林豊(イノベート須坂)様 / 吉田真也(SHINYA YOSHIDA DESIGN)様 / 河野史明(有限会社ディーエムシー)様 / 佐藤諒弥(東京工業大学附属科学技術高等学校)様 / 上田康夫(北海道大学)様 / 坂口豊(坂口歯科)様 / 山内康広(有限会社メタルテック)様 / 藤原多喜夫(株式会社ヒューテック)様 / Yutaka ISHIZUKA(Dyshow industrie)様 / 松島茂樹(3dマイスター)様 / 畠間隆司(武藤工業株式会社 3DP 事業部)様 / 土井浩二((株)リコー AM 事業センター)様 / 金海博(大阪焼肉 海南亭)様 / 阿久津洋巳(新潟リハビリテーション大学)様 / 岩元清英(FaceBook 3D PRINT FACE SHIELD)様 / 徳井亜加根(国立障害者リハビリテーションセンター学院 義肢装具学科)様 / 長尾博文(岡山県立興陽高等学校)様 / 榎橋康博(日本工業大学 先進工学部 ロボティクス学科)様 / 山口直也(株式会社北日本金型工業 総務人事経理課)様 / 井上博臣(三井住友海上火災保険株式会社 関西損害サポート第一部)様 / 木村正(宮城県登米総合産業高等学校)様 / 星野浩通(新潟リハビリテーション大学)様 / ナリタタツヤ(Tinker.jp)様 / 津坂富浩(日本オールラック研究所)様 / 霜村暉(株式会社 revot)様 / 古川貴一(株式会社ミマキエンジニアリング)様 / 望田勇人様 / 平木雅彦(高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター)様 / 伊藤正人(Atelier AM)様 / 後藤歩(ヘンナモノ工房)様 / 齋藤隆((株)シェアデザイン)様 / 長谷川晴基(長岡工業高等専門学校 ロボティクス部)様 / 道用大介(神奈川大学)様 / 渡辺ゆうか(ファブラボ鎌倉)様 / 木村裕之(特定非営利活動法人まなひろ)様 / 渡辺治(FabLab 関内/フリーランス(建築 CG 制作))様 / 澤口剛(富士工業株式会社 技術部)様 / 橋本大智(株式会社 tHiN'nk.)様 / 松岡幹人(ティーシーエム合同会社)様 / 依田健一(D アカデミー株式会社)様 / 塚原 敏彦(Studio A-Dim)様 / 大澤猛(エヌシーアイ販売株式会社)様 / 森澤友和(The DECK)様 / 清水隆志(宇都宮大学)様 / 植西美侑(立命館大学 法学部 法学科)様 / 吉岡純希(慶應義塾大学 SFC 研究所/株式会社 NODE MEDICAL)様 / 渡辺洋一郎(ファブラボ広島安芸高田)様 / 宮本誠(株式会社みやもと 代表取締役社長)様 / 下田亮(チーム藤沢)様 / 吉澤文様 / 脇本智正(エスラボ株式会社)様 / 中原健司(タカノ株式会社)様 / 畠間隆司(武藤工業(株) 3DP 事業部)様 / 西謙一(NES株式会社)様 / 大野秀晃(株式会社ジャパン・メディカル・カンパニー)様 / 池田武史(i.Design Studio)様 / 若林祐次(株式会社アーティス)様

式会社アトラス)様 / 佐々木隆嗣(㈱アビスト 3Dプリント事業部)様  
/ 富永哲欣(小平あたりで CivicTech)様 / 岸竜也(株式会社キシテック 代表取締役)様 / 澤田安彦(Carbon 事業推進部)様 / 関信吾(株式会社アスペクト 営業部)様 / 松田晋幸(山口県産業技術センター)様 / 中澤啓明(有限会社中澤鋳造所)様 / 前田隼輝(徳島大学理工学部理工学科機械科学コース)様 / 桑原明伸(徳島大学技術支援部 常三島技術部門)様 / 八木岡亮(茨城県立土浦産業技術専門学院)様 / 木曾康全(カラタニエンジニアリング株式会社)様

## 参考文献

1. COVID-19 における 3D プリントフェイスシールド製造に関するアンケート調査  
<https://coi.sfc.keio.ac.jp/faceshield.html>
2. 東京都 新型コロナウイルス感染症対策サイト  
<https://stopcovid19.metro.tokyo.lg.jp/cards/number-of-hospitalized>
3. 医療従事者の命を守る「フルフェイスシールド」約 10 万個を量産・無償配布するクラウドファンディングを開始～手持ちのクリアファイルを取り付けることで、フェイスシールドとして使用できるフレーム部分を製造・配布～  
<http://www.med.osaka-u.ac.jp/archives/21961>
4. Github – doyodoyo / faceshield  
<https://github.com/doyodoyo/faceshield>
5. FabSafeHub  
<https://fabsafehub.org/>



# 3D デジタル装具の社会実装に向けて

## Social Realization of 3D Digital Prosthetics and Orthotics Providing System

上田 雄一<sup>1,2</sup>, 森田 淳<sup>1</sup>, 光部 貴士<sup>1</sup>

Yuichi UEDA<sup>1,2</sup>, Jun MORITA<sup>1</sup>, Takashi KOBE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSR 株式会社, <sup>2</sup>ラピセラ株式会社

<sup>1</sup>JSR Corporation, <sup>2</sup>Rapithela Corporation

### 【要約】

義肢装具の業界では患者一人一人に合わせた個別化製造が当然ながら、今なおアナログ製造が主という実態にある。CAD/CAM システムや 3D プリンタなどのデジタル技術が登場した後も、その導入ハードルの高さから普及するには至っていない。そこで筆者らは、3D デジタル技術を義肢装具士が“使える”サービスとして「eLabo™」を開発し、ラピセラ株式会社を通じて全国の義肢装具士へのサービス提供をスタートした。「eLabo™」サービスによる、誰でもどこでも自分に合った義肢装具が手に入る社会の実現について紹介する。

キーワード: 社会実装, 3D, 設計システム, 個別化製造, インターフェイス

### 【Abstract】

In the prosthetics and orthotics (PO) field, manufacturing is personalized for each patient, but still analog until today. Even after digital technologies such as CAD/CAM and 3D printer has launched, they have not become common yet due to installation issue. We developed “eLabo™” system that PO can really “use” the 3D technologies, and started providing service to PO nationwide through Rapithela Corporation. Hoping that a society in which suitable prosthetics and orthotics can reach to anyone in anywhere, will be realized by the “eLabo™” service.

Keywords: Social realization, 3D, Design system, Personal Fabrication, Interface

### 1. 序論

義肢装具は、多種多様な症例を持つ一人一人の患者に対して、国家資格を有する義肢装具士が一点一点手作りする必要がある。現場では石膏などによるアナログ製造が今なお変わることなく継続されており、限られた人数の義肢装具士で需要に対する供給が追い付かなくなったりつつある昨今、デジタル化による定量化・効率化が求められている。ところが、CAD/CAM システムや 3D プリンタなどのデジタル技術が登場しても、その導入ハードルの高さからごく一部での使用に留まっており、普及する見通しが立っていないのが実情である。

そこで筆者らは、義肢装具士が 3D 技術を“使う”ためのサービスとして「eLabo™」システムを開発し、新規設立したラピセラ株式会社を通じてサービス提供を開始した。これは義肢装具士を“支援する”サービスであり、義肢装具士が患者に義肢装具を提供する体系は従来と変わらない(図 1)。

「eLabo™」サービスの対象は装具としてのインソールから始めて義肢装具全般へと展開し、業界のプラットフォームサービスを目指す。全国の義肢装具士が「eLabo™」による 3D デジタル装具を扱えるようになることで、より多くの患者に(量)、より良い義肢装具(質)を提供できる社会を目指す。

### 2. システム開発

「eLabo™」サービスは大きく 2 つのシステムから成つ

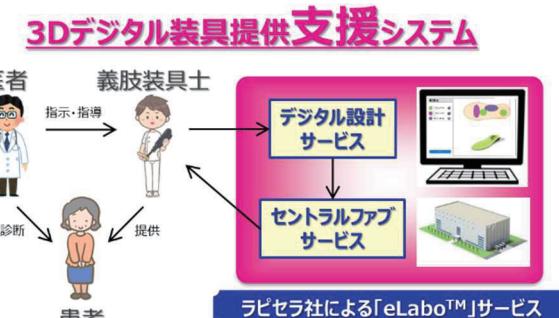


図 1. 「eLabo™」サービスの体系

ている。患者の足データからインソールをデザインする設計システムと、デザインされたインソールデータを 3D プリンタで具現化する造形システムである。

設計システムはいわゆる 3D-CAD だが、3D デジタルに不慣れな義肢装具士であっても“使える”ようにイン

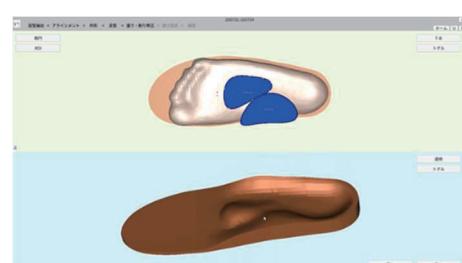


図 2. 痾装具士が“使える”インターフェイス

ターフェイスを設計している(図 2). 組み込んでいる技術の詳細については、『SC-02 外形形状と局所物性を自由に制御可能な、3D 設計・造形一貫型システムの開発』にて報告する。

義肢装具士が設計システムで3D デザインしたインソールは、その通りの形状で具現化されて義肢装具士の手元に届く必要がある。それを可能にするのが造形システムであり、設計システムとの連携が不可欠となる。

尚、両システムには、高い設計自由度(高解像度)、それを正確に造形可能であること(高精度)、そして実用可能な耐久性を有していることが求められる。ラピセラでは、これらを満たす 2 種類の高性能 3D プリンタ(図 3)を導入し、軟性/硬性義肢装具製造への対応を可能にしている。



図 3. ラピセラが保有する 3D プリンタ  
(左:Carbon 社 L1, 右:HP 社 MJF5200)

### 3. サービスコンセプト

「eLabo™」サービスの最も重要なコンセプトは、義肢装具士が“使える”ことである。新たな 3D 技術の導入はハードルが高いと前述したが、具体的な課題は、①習得時間、②コスト(イニシャル、ランニング)、③納期、そして④修正対応である。一般的な3D-CADソフト、3D プリンタ、また造形を請負うサービスビューロなどでは、これらの課題を全て解決することはできなかった(表 1)。

毎日臨床の現場で多種多様な患者の対応をする義肢装具士にとって、たださえ足りない時間の中で新たな技術導入に労力をかける余裕はなく、いま目の前にいる患者に自分ができる範囲で最大限の対応をする以外に選択肢がなかったというのが、義肢装具業界の実態である。

	設計	造形	設計+造形	設計+造形
3D-CADソフト	3Dプリンタ	サービスビューロ	「eLabo™」	
習得時間	× 自己習得必要	× 自己習得必要	○ 一任可能	○ 従来法に沿った ガイダンスあり
イニシャルコスト	△ 無料版では 機能制限あり	× 購入必要	○ 設備投資不要	○ 無料アプリ
ランニングコスト	△ 未使用でも ライセンス料必要	△ 未使用でも 維持費必要	○ Pay by Use	○ Pay by Use
納期	○ 自分のタイミング	○ 自分のタイミング	× 数週間	○ 最短3日
修正対応	△ 自分で作り直し	△ 自分で作り直し	×	○ ラピセラが対応

表 1. 他サービスとの比較

そこで「eLabo™」サービスにおいては、義肢装具士が“使える”をコンセプトに、各課題を解決する仕組みを

構築した。

まずクライアント側において、①習得時間ゼロでも“使える”ように、義肢装具士が頭の中で暗黙知として設計してきたプロセスを形式化し、アプリ UI にガイド機能を盛り込むことで、義肢装具士が従来法通りの流れで感覚的にインソールを 3D デザイン可能にした。②-1 イニシャルコストをゼロにするため、「eLabo™」アプリの利用は無料とした。すなわち、自分のノート PC やタブレット端末に「eLabo™」アプリをダウンロード & ユーザー登録すれば、3D デジタルインソールが設計し放題となる。全国の義肢装具士が使用できるようにアプリはクラウド型とし、電波の送受信が難しい医療現場での利用を想定してオフラインモードも搭載した。医療現場において、医師や患者と義肢装具士がリアルタイムに設計を確認できることの意義は非常に大きい(図 4)。



図 4. 「eLabo™」サービスイメージ

一方のバックエンド側において、②-2 ランニングコストは、セントラルファブ方式により 3D プリンタの稼働率を上げることで削減した。③納期と④修正は義肢装具の現場において必達項目であり、「eLabo™」では設計システムと造形システムの性能と連携性を高めることで対応している。

「eLabo™」を義肢装具士が真に“使える”サービスにするためには、義肢装具士の協力が必要不可欠である。そこで JSR は義肢装具メーカーの大手で 3D デジタル技術に対して先進的な理解を持つ東名プレース株式会社とタッグを組み、J/V を設立してシステム開発を進めた。それがラピセラ株式会社であり、「eLabo™」サービスもラピセラから全国の義肢装具士に提供される。

### 4. 結論

筆者らは、義肢装具士が 3D デジタル技術を“使う”ためのサービスとして「eLabo™」を開発した。まずは装具としてのインソールからスタートし、義肢装具全般のプラットフォーム・サービスを目指す。これにより、義肢装具の質(機能・品質)と量(提供可能量)を飛躍的に向上させ、誰でもどこでも自分に合った義肢装具が手に入る社会を実現したい。

# 低成本な3D ゲルプリンターで造形したゲルの物性評価

Physical Properties of Gels Formed by a Low-Cost 3D Gel Printer

横江 一真<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Kazuma YOKOE<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

我々は3D ゲルプリンターの社会実装を進めるべく、我々が独自に開発した低成本な3D ゲルプリンター”RepRap SWIM-ER”を企業の方々に貸し出し、ユーザーとして実際に利用してもらうゲルアンバサダープロジェクトを進めている。しかし、これまでどのような硬さのゲルを造形できるのか、明確にされていなかった。そのため貸し出しを行う前に、RepRap SWIM-ER でどのような硬さのゲルが作れるのか明確にし、ユーザーに知らせていく必要がある。今回は積算光量を変えた ICN ゲルの圧縮試験を行った。結果、積算光量を増やすことによって、ヤング率、最大応力ともに増加することが分かった。

キーワード:3D ゲルプリンター, RepRap, ICN ゲル, 積算光量

## 【Abstract】

We are now working on the Gel Ambassador Project to promote the social implementation of 3D gel printer by lending the low-cost 3D gel printer “RepRap SWIM-ER” to companies and letting them use it. Therefore, it is necessary to clarify what kind of hardness the gel can be made with the RepRap SWIM-ER before lending it to companies. In this study, the compression test of the ICN gel was conducted. As a result, it was found that both Young's modulus and maximum stress increased with increasing the accumulated light intensity.

Keywords:3D gel printer, RepRap, ICN gels, accumulated light

## 1. 序論

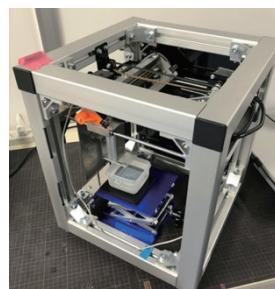
ゲルは高含水率、低摩擦、生体適合性の特性を持ち、医療への応用や工業材料としての利用が期待されている。しかし、ゲルは柔らかい物性のため、従来の切削や注型による加工は困難であった。

複雑な形状のゲルの造形を可能にするため、古川研究室では3D ゲルプリンター“SWIM-ER”が開発された[1]。SWIM-ER はバスタブ式の光造形3D プリンターで、バスタブ内のゲル溶液に UV レーザーを照射し、照射された部分をゲル化させるという造形方法である。これにより、ゲルは高い精度での3D 造形が可能になった。しかし、この装置は大変高価であり、全ての研究機関や企業が所有できるわけではない。

この問題を解決するために、“RepRap”という概念を用いた。RepRap とは“Replicating Rapid Prototyper”的略称で自己複製が可能な高速試作機を意味している。この概念を用いて、部品は低価格かつインターネット上、でも購入できるものを使用し、SWIM-ER の造形方法を再現した3D ゲルプリンター”RepRap SWIM-ER”を開発した[2]。図1に装置の外観と造形中の画像を示す。

さらに、現在古川研究室では、3D ゲルプリンターを社会実装していく、ゲルアンバサダープロジェクトが進められている。ゲルアンバサダープロジェクトとは、RepRap SWIM-ER を企業の方々に貸し出しを行い、実際に使ってもらうことで、3D ゲルプリンターの新たな活用先の発見を目的とするプロジェクトである。そのため RepRap SWIM-ER でどのような硬さのゲルが再現できるのか、明確にしていく必要がある。今回は、この RepRap SWIM-ER で造形したゲルの物性を測定した。

(a)



(b)

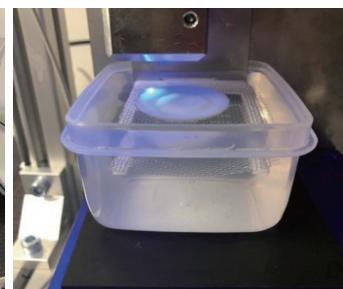


図1.(a)RepRap SWIM-ER と(b)造形中の画像

## 2. 実験

### 2.1 材料

ゲル材料としては、Inter-Crosslinking Network structure Gels (ICN ゲル)を使用した。モノマーとして N,N-Dimethyl acrylamide(DMAAm), ポリマーとして Hydroxypropyl Cellulose(HPC), 架橋材として MOI-EG(Karenz), 光重合開始剤として Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide(TPO), 吸収剤として Kayaphor(AS150)を用いてゲル溶液を作製した。表1に組成を示す。

表1.ICN ゲルの組成

モノマー	ポリマー	架橋材	開始材	吸収材
DMAAm	HPC	Karenz	TPO	AS150
4[mol/L]	0.02[mol/L]	0.02[mol/L]	0.01[mol/L]	0.2[wt%]

### 2.2 造形と圧縮試験

3D ゲルプリンターRepRap SWIM-ER を用いて、作製したゲル溶液での造形をした。今回は、直径 10mm、高さ 8mm の円柱を造形した。

3D ゲルプリンターで造形されたゲルの物性値は、積算光量に依存する。積算光量  $W$  は式(1)で表すことができる。

$$W = \frac{I \times n}{v \times D} \quad (1)$$

$I$  はゲル造形時のレーザーの光量、 $n$  は走査回数、 $v$  は光源の走査速度、 $D$  はレーザーのスポット径を表す。今回の造形では、レーザーの光量 10[mW]、光源の走査速度 20[mm/sec]、スポット径 1.0[mm]を固定し、走査回数を 1, 3, 5 回と変化させゲルの造形をした。造形後、造形物を純水で 24 時間膨潤させ、物性を測定した。物性の測定にはオリエンテック製卓上型材料試験機 STA-1150 を使って、速度 3mm/min で圧縮試験を行った。

## 3. 結果と考察

造形直後のゲルの写真を図2に示す。走査回数が1回のゲルは比較的透明であるが、走査回数が増えるたびに白くなっているのが分かる。また、走査回数が1回の時よりも5回の方が、円柱の直径が一回り大きくなっているのが見て取れる。実際に円柱の直径を測定してみると走査回数が1回目の時は 10.1mm、3 回の時は 11.2mm、5 回目の時は 12.3mm となった。これは、照射したレーザーの光が散乱し、ゲル化する部分が広がったことが予想される。

ひずみが 0.1 までのヤング率を表2に、走査回数を変化させたときの応力-ひずみ線図を図3に示す。表2と図3より、走査回数を増やすことにより、ゲルの最大応力、ヤング率が共に増加していることがわかる。これは積算光量が多いと、光重合反応が進み、架橋密度が高くなつたためと考えられる。

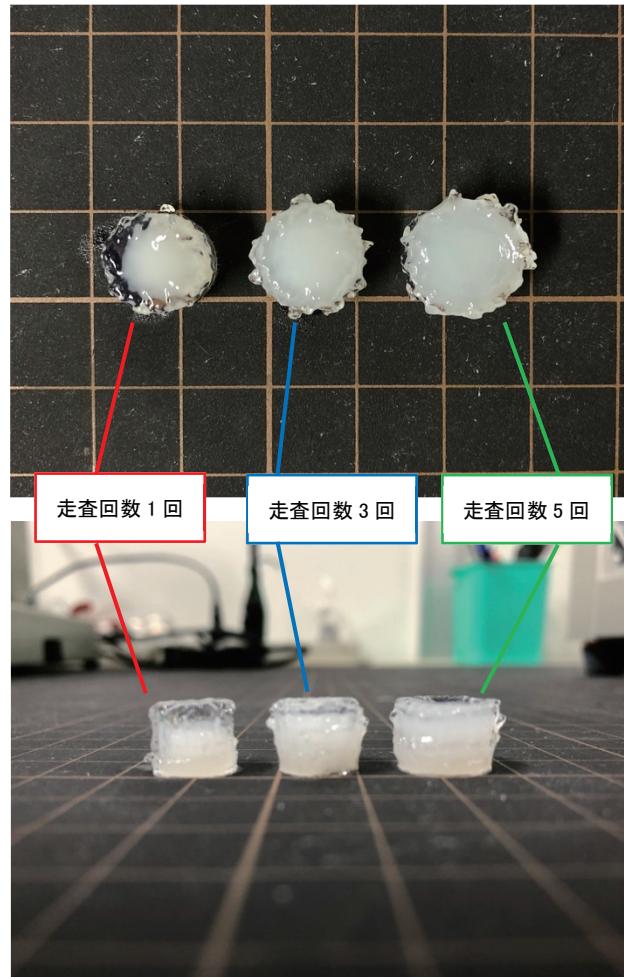


図2.造形後の円柱ゲル

表2.走査回数を変化させた時のヤング率

走査回数	1	3	5
ヤング率[kPa]	4.65	6.83	12.3

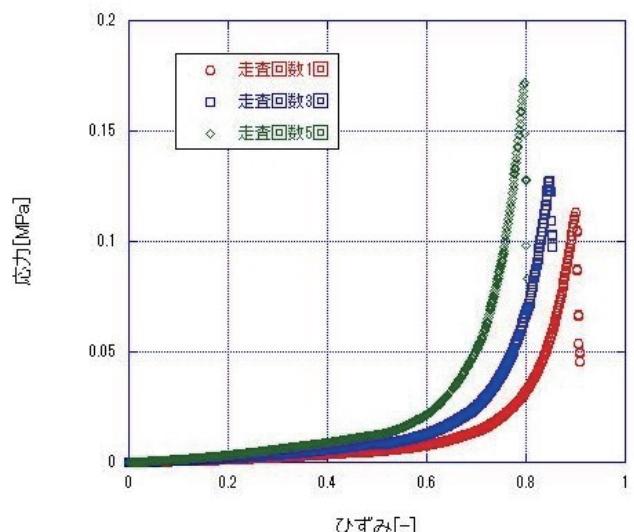


図3.走査回数を変化させたときの応力-ひずみ線図

#### 4. 結言

RepRap SWIM-ER のレーザー走査回数を増やすことによって、ゲルのヤング率が上がることが確認できた。今後は、任意の硬さを造形できるように様々なゲルを RepRap SWIM-ER で造形したい。さらに、造形データと造形物の間に寸法の誤差があつたため、ゲルアンバサダープロジェクトで得たユーザーの使用感を参考にしながら、装置の改良を進めていく。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO) によって支援を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

1. Muroi,H., Hidema, R., Gong, J., Furukawa, H., JSME, Vol.7, No.2, Special Issue 2012 pp.163–168(2013)
2. Azusa Saito, Kei Sato, Samiul Basher, Masaru Kawakami and Hidemitsu Furukawa “RapRap SWIM-ER: low cost open-source 3D gel printer” Proc. SPIE 10597(2018)



# こどもたちの目を3D デジタルものづくりに！ 業界を挙げたファミリーマーケティング実践の提案

Let's bring together the power of the 3D printer industry

and turn children's interests into 3D digital fabrication, by a method called family marketing

三野 晃一

Koichi Sanno

一般社団法人 障害者・高齢者3D プリンタ・ファクトリー

General Incorporated Association Disabled / Elderly 3D Printer Factory

## 【要約】

本提案は、5年後、10 年後を見据えた3D デジタルものづくり人材の育成を図るために、小中学生を対象とした啓発・普及活動の実践を、「官」に頼ることなく3D プリンタ・造形材料・3DCAD ソフト等の業界を挙げて取り組むことを提案するものである。現状では小中学校の教育現場においてプログラミング教育が指導要領に明記されている中で、「3D プリンタ」「3D デジタルものづくり」についてはほとんど触れられていないことに強い危機感を覚え、本会にて広く提案し実現させたい。その取り組む手法は、調査・実践研究・技術教育等ではなく、啓発・普及事業として成果を生み出すファミリーマーケティングの手法を取り入れて行いたい。

キーワード:3D プリンタ,3DCAD,3D デジタルものづくり,小学校教育,マーケティング

## 1. 啓発・普及事業の概要

- (1)こどもと家族と先生のためのポータルサイト「キッズ3D プリンタ FUN(仮称)」を立ち上げ、情報発信やインタラクティブなサービスを提供する。
- (2)3D プリンタ・造形材料・3DCAD ソフト等各社の Web サイトや情報サイトに点在する製品パッケージ、サービス、講座、オンラインイベントなどの情報の中から「子どもたちのための情報」を集め、解説し、情報を組み合わせ独自の視点で情報を生み出す。
- (3)小学校での3D デジタルものづくりカリキュラムづくりサポートサービスを行う。
- (3)D プリンタ・造形材料・3DCAD ソフト等各社とのファミリー、教育機関向け合同キャンペーンを行い、プログラミング・ロボット・AI 活用教育と3D デジタルものづくり分野の違いや運動などで子どもへの有用性をアピールし、啓発・普及を進める。

年版では、「第 1 部 特集 IoT・ビッグデータ・AI～ネットワークとデータが創造する新たな価値～」の(3)と取り扱い順位が下がったが「デジタルファブリケーション」として記載があった。しかし、2020(令和2)年版では、「第 1 部」の特集テーマが「5G が促すデジタル変革と新たな日常の構築」となり、「3D プリンタ」「デジタルファブリケーション」「ファブラボ」の記載そのものがなくなっている。  
＜社会的背景3:全国の Fab Lab が初の前年比 25% 減少＞

fabcross が 2019 年に調査したレポートによると、同年で全国に 168 施設が存在。前年比で実数として 28 力所も減少している。原因是民間施設が採算性から、公的予算が入っている施設では、利用者・集客数が目標以下であったことから撤退している。

＜社会的背景4：新型コロナウィルス感染症禍における 3D プリンティングの活躍＞

1～3 はマイナス要因として、それを打開するための啓発・普及活動という位置付けだが、2020 年 3 月以降での新型コロナ感染症蔓延の時期に、3D プリンタ製のフェイスシールドが様々な研究機関や団体、個人でも 3D データ化され、そのデータを無償で共有・配布。または 3D プリントして寄贈などの運動が広まったことから、2013、2014 年頃の第一次デスクトップ・プリンタブーム以来、久方振りに 3D プリンタが注目を得た。

この追い風も含めて、まさに社会的背景として「今、この時代」に必要とされている分野であり、啓発・普及のタイミングに来ている。

## 2. 本提案の社会的背景(危機感の要因とプラス要素)

- ＜社会的背景1:プログラミング教育の影響＞  
小学生で 2020 年から、中学生で 2021 年からプログラミング教育が授業の中に組み込まれることから、「ロボット」や「AI」とも絡んで魅力的・刺激的なカリキュラムとなり、「3D デジタルものづくり」の存在そのものの認知が先送りになる可能性が大きい。
- ＜社会的背景2:国の重点施策から外れている＞  
総務省「情報通信白書」の場合、2013(H25) 年版では「第 1 部 特集『スマート ICT』」の戦略的活用でいかに日本に元気と成長をもたらすか」の「トピック」として「ファブラボについて」が取り上げられていたが、2016(H28)

### 3.本提案の実体験背景:2013年からのフィールドワークで発見・実感した3Dデジタルものづくりの醍醐味

当法人は2017年10月に設立登記したが、前身の活動は2013年、香川県高松市の障害者就労支援B型事業所に、おそらく全国初となる3Dプリンタを導入したことから始まった。障害当事者の「こんなものがあったらいいのに」を3Dプリントで次々とカタチにして行った。それぞれのケースごとに多様な「あたまの中にあるアイデアをカタチにする」実体験を積んで行った。

<中2車いす女子の連続改善アイデアで、電動車いすの操作レバーを可愛く創作>



図1. 試作を繰り返したモデルを並べて笑顔の障がい当事者

実感したこと:「バックするのに指でひっかけるフックが欲しい。」「前に押すために自分の指に合った窪みが欲しい」次々と出て来る障害当事者のアイデアをモデリングに反映して行く中で、『一人ひとりの個別のニーズに対応することは、機能だけでなく、楽しさも個別に付加できる』ことを体感。

レバーをクマのキャラクター化することで学校でも評判になり、母親から「まさか車いすのレバーくらいで、娘が笑顔になるなんて」との感謝の言葉を受ける。

<電動車いす女子が3DCAD 始めて数か月でオリジナルアイテム創作>



図2. 設置場所(左)とケラレくん(右)

発見したこと:医師にも作業療法士・理学療法士・介護ヘルパー等にも、このカタチがどのように使われるかまったく想像もつかなかったが、彼女は「ひとの手を借りずに生活する」ためにどうしても欲しかったグッズ。覚えたての簡単なモデリングで生み出した。

“ものづくりが専門家から素人・一般の人に”と記述されたメーカー革命そのものを目の当たりにした。彼女は「ケラレくん」とネーミングしたが、さて、これは何に使うのか?

<「100のミライエ星座を発明しよう！」オリジナル手描き絵を大募集>



図3. 「100 のミライエ星座を発明しよう」募集広告

プラネタリウムがメインの施設である香川県にある高松こども未来館のオープニングイベントに採択された企画「たかまつミライエ こども3DプリンタFes」での公募イベント「100のミライエ星座を発明しよう！」を実施。

実感したこと:100人のこどもたちから集まった「こんな星座があつたらいい」というアイデアを10数人のモデルで手分けして3Dデータ化し、100個の星座出力をを行い展示。1か月の展示期間後、下記の展示セットを当選者にプレゼントした。平凡なものから、思いもかけないカタチ、3Dプリントでうまく再現できにくいカタチなど、小学生を中心とした子どもたちの多様なセンスの幅の広さを改めて実感した。



図4. 下から「こどもの手描き絵原画」中「モデリング画像」上「3Dプリントした3D星座」

<小1~6年生が混在する31人の「縦割り学級」創造活動として、児童主導で『3Dプリンタで人の役に立つものをつくる』カリキュラムを担当教諭と協働中。

(2020.07.07~2021.03.20)>

香川大学附属高松小学校の教諭からファクトリーWebサイトから問合せ・協力依頼があり、終日縦割創造活動の日である7月7日からスタート。

ファクトリー高松メンバー2名が学級を訪問。東京メンバー2名がオンラインで参加して進行した。



図5. 高松＝東京を結んでオンラインで子どもたちと質疑応答。



図6. ショートアニメ「3D プリンタが描く未来の動画  
the future of 3D Printer innovation」を子どもたちが鑑賞

3D プリンタが実際に稼働している様子を初めて見た子どもたちに、次に、何の説明も行わず、2012 年にスペインバルセロナの博物館が制作し YouTube に公開している 4 分のショートアニメ「3D プリンタが描く未来の動画～the future of 3D Printer innovation」を見せた。

4分が終わるとすぐに「もう 1 回見たい」との声が多数上がり、リピート。

そして、その場でアニメを見た感想文を書いてもらつた。

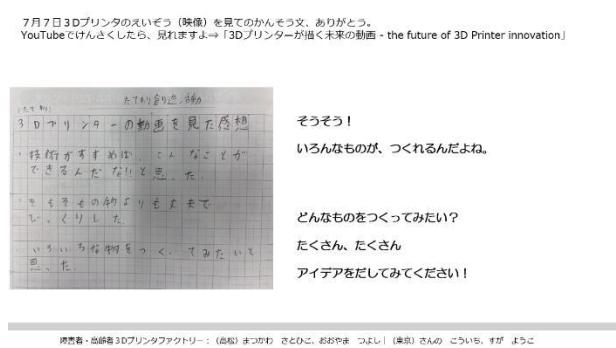


図7. 子どもの感想文を読んで、共感と問い合わせ返信を記入

現在、その 31 人一人ひとりの感想に、次に興味が繋がるように返信メッセージを書き込んでいる。

この後、サンプル数は 31 と少ないが、感想の内容について分類し、なんらかの傾向や特長の有無を調べて行きたい。

#### 4. こどもと家族と先生のためのポータルサイト「キッズ3D プリンタ FUN(仮称)」とファミリーマーケティングとは

以上述べて来た現在の社会的背景と、2013 年からのファクトリー活動を通して出会った障害者、一般の方、子どもたちから得ることがきた発見や実感を元に、今回の啓発・普及事業の提案を行いたい。

本事業は、二つのマーケティング課題をクリアする事業です。

##### <3D プリンタ業界のマーケティング課題>

- ・3D プリンタメーカー等、各社ごとに教育機関向け製品パッケージやサービスを設けている企業は多いが、費用対効果の面や人手不足などの面から充分に取り組みが出来ていない。

- ・1社単独で行うコンテストやキャンペーンでは、なかなか思うような応募数、集客を得ることができない。

##### <こどもを取り巻く環境のマーケティング課題>

- ・小学校教員が 3D プリンタをテーマとした活動を取り入れようとしても、相談先が分からない。1 メーカーに相談すると、そのメーカーの機器購入が前提となるなどリスクがある。

- ・小学生のこどもが自発的に 3D プリンタを指名するケースはレアであると思われ、家族・親族からの誘導や例示があって初めてこどもと一緒に取り組むことになる。このことから、親世代・祖父母世代への情報発信が必要となる。

##### <二つの課題を解決する手法としてのファミリーマーケティング>

- ・こどもと家族と先生のためのポータルサイト「キッズ3D プリンタ FUN(仮称)」は、3D プリンタ業界全体への注目を集めための業界協働事業と位置付ける。

- ・ポータルサイトへの集客マーケティングが次の 3 つのルートごとにキーワードを変え、サービス内容の説明も主語述語を変えコピー開発を行う。

- ・シニア世代向け訴求・・ものづくりの楽しさを孫と一緒に。

- ・親世代向け訴求・・プログラミング、ロボット、AI などの最新技術を製品化・実用化するすべてのタイミングで必要なのが「そのモノのかたち」。3D デジタルものづくりの知識、技術を子どもの頃から習得することで、その後の職業の選択・ワークライフバランスが最適化されることの訴求。

- ・こどもへの訴求・・あたまの中のアイデアや「こんなものができるかな」ということが、自分で具現化できる楽しさ、ワクワク感、自己肯定案、人の役に立つ実感を得ることができると訴求。

## 5. 結論：今後のアクションプラン

(1) 本提案に興味を持った企業・個人とオンライングループ「キッズ3D(仮)」を構成し、本提案をたたき台として啓発・普及事業プランをプラッシュアップする。

(2) グループメンバーから、それぞれ提案する企業・団体・研究機関・現状の3D関連サイトにプランの説明を行う。

(3) 上記の過程で事業規模、年間運営内容などを固め年間予算案を作成する。

(4) 事業構想が整いつつある中で、資金調達を進める。

(5) 半年以内のポータルサイト開設を目指す。

以上が、今回の提案です。

子どもの教育環境の中で、3Dデジタルものづくりが取り残されないために、国の施策や行政にまで落とし�込まれるの待つのではなく民間の力を結集して、子ども・家族・教育機関に向けて情報発信を始めたいと考えています。

# インクジェット型AMにおける積層界面の光学的性質

Optical properties of stacked interface in inkjet type AM

山崎 淳<sup>1</sup>, 古宇田 光<sup>1</sup>, 松本 宗久<sup>2</sup>, 菊地 健一<sup>3</sup>

Jun YAMAZAKI, Hikaru KOUTA, Munehisa MATSUMOTO and Kenichi KIKUCHI

<sup>1</sup>東京大学, <sup>2</sup>高エネルギー加速器研究機構, <sup>3</sup>丸紅情報システムズ株式会社

The University of Tokyo, High Energy Accelerator Research Organization, MARUBENI INFORMATION SYSTEMS CO., LTD.

## 【Extended Abstract】

### 1.背景・研究手法

インクジェット型のAM(Additive Manufacturing;一般的には3D printerと呼ばれる)を使い透明樹脂材で3D造形すると、積層面に対して垂直軸に3D造形品を見た場合には透明に見える反面(図.1 左上図)、積層面に直交する他の二面に垂直な方向から3D造形品を見た場合、曇って見える現象が起こることが一般的に知られている(図.1 右上図)。この現象のため、透明樹脂内部の構造体が鮮明に見えないので、3D造形品の視覚的な表現が大きく制限されてしまうという問題が発生している。この現象を回避する3D造形方法として、3D造形品をAMの積層基板平面から傾けて行う方法がある<sup>1),2)</sup>。例えば立方体の3D造形品をこの基板から、水平垂直軸にそれぞれ45度傾けて積層させると各面に対して垂直に見た場合、透明樹脂内部の構造体が鮮明に見えることは、既に報告済みである(図.1 下図)<sup>2)</sup>。

この曇り現象について光学原理に基づいて調べたので本発表で報告する。この現象の支配的な原因を調べるために、He-Neレーザとセナルモン光学系を基本構成として、回折現象、複屈折(光弾性)、スネルの法則・フレネルの公式を使い透過・多重反射などの効果を調べた。その結果、この現象は屈折率差による多重反射が支配的であることがわかった。次に屈折現象に焦点を当てた光学測定を行った。具体的には、エリプソメトリ<sup>3),4)</sup>による屈折率測定、2D複屈折画像測定を行い、あわせてスネルの法則、フレネルの公式<sup>4)</sup>をもとに実体顕微鏡観察による光路の画像を取得し解析を行った。その結果、3D造形時にバルクと界面の屈折率に差が生じて起こる多重反射が、曇りの主な原因であることがわかった。そのほかに回折現象もあるが、界面と光軸のなす角を大きくした場合、この効果も視覚的には影響されないことがわかった(図.1下図、図.2下図)。

測定から得られた積層界面の光学的性質を理論的に検証するために、回折現象、フレネル公式と光散乱<sup>5)</sup>を取り入れた光線行列解析における光学シミュレーションを行った。光線行列解析は、シンプレクティック条件を満たす行列を利用しているために、光路追跡において誤差の増大を回避することができる。その結果、界面の多重反射を再現できたとともに、3D造形品を透過したレーザ光の分布は、ビームスポットとその周辺に光散乱に起因するレーザ光の分布を再現することができた(図3)。

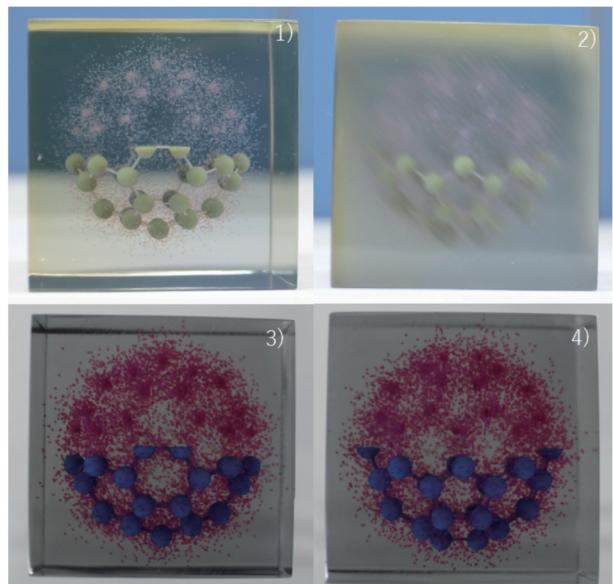


図1. フラーレン( $C_{60}$ )の3D造形品<sup>2)</sup>。上: フラーレン分子構造の電子雲モデル(従来型)。1)は積層方向から見た図で、反対側がはっきり見える。2)は積層方向に垂直な平面から見た図であり、光の多重反射により白濁して見える。下図: フラーレン分子電子雲モデル(改良版)。どの面の垂直方向から見ても鮮明に内部が見えるように3Dプリントを行った。3)は、積層方向から見た3Dプリント図である。4)は、3Dプリントの側面図である。

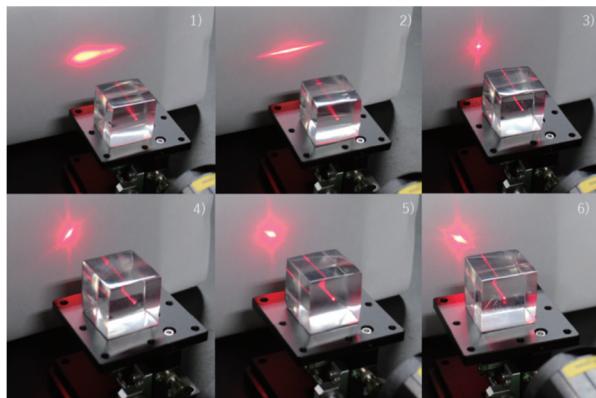


図 2. 透明樹脂の3D 造形品にレーザ光が透過した後の像.  
透明樹脂の3D 造形品にレーザ光をあて透過光の像を示す.  
1)-3)が平行モデル,4)-6)が傾斜モデル. 1)X 軸(プリンタヘッド移動方向)からレーザ光をあてた透過光の像. 2)Y 軸(プリンタヘッドのローラー軸方向)からレーザ光をあてた透過光の像. 3)Z 軸(積層軸)からレーザ光をあてた透過光の像. 4)-6)各面に垂直にレーザ光をあてた透過光の像.

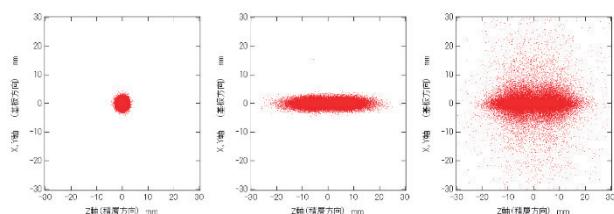


図 3. 透明樹脂の3D 造形品にレーザ光が透過した後の光学シミュレーションの像. 光線行列, フレネル公式と光散乱の効果を入れたシミュレーション結果を示す. 左が初期分布図. 真中図が  $1 \mu\text{m}$  の散乱体(散乱体数 × 散乱長 =  $1.6 \mu\text{m}$ )を仮定した透過光の像. 右図が  $1 \mu\text{m}$  の散乱体(散乱体数 × 散乱長 =  $1600 \mu\text{m}$ )を仮定した透過光の像. サンプルの厚さ, 端面とクリーンまでの距離(Drift)はそれぞれ 30mm とした.

## 2. 結論

本報告の結論として, インクジェット型 AM で3D 造形した積層界面と光軸のなす角が大きいほど, バルク・界面の屈折率差による多重反射の影響を避けることができた. また, 散乱, 複屈折, 回折現象などの効果は, 透過した光の像をゆがめるほどではなかった.

## 3. 謝辞

本技術は, 文部科学省 HPCI 戰略プログラム分野 2 「新物質・エネルギー創成」, ポスト「京」重点課題(7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」, 「元素戦略プロジェクト<拠点形成型>基盤的計算機シミュレーション手法の検討」の研究活動の一環として得られた成果である.

## 参考文献

- 1) J.Yamazaki et.al, Patent application number, Special application 2018-544973(JP) [in Japanese], 16/341,028(US), 11201903186V(SG).
- 2) J.Yamazaki and H.Kouta, “Visualization of physical quantities in space using Addtive Manufacturing and future application of Voxel-based 3D Data Format FAV”, Journal of the Imaging Society of Japan, Imaging Today 240, vol.58 No.4, 397–405, 2019.
- 3) Toshiyasu Tadokoro, “Spectroscopic Ellipsometry : Fundamentals and Applications”, Journal of the Imaging Society of Japan, Imaging Today 193, vol.50 No.5, 439–447, 2019.
- 4) Max Born, Emil Wolf, et al, “Principles of Optics 7<sup>th</sup>”, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- 5) Takamitsu Okumura et al, “Highly-efficient backlight for liquid crystal display having no optical films”, APPLIED PHYSICS LETTERS. vol.83, 2515, 2003.

# 外形形状と局所物性を自由に制御可能な、 3D 設計・造形一貫型システムの開発

Development of an Integrated 3D Design and Fabrication System that can Flexibly Control  
the External Geometry and Local Properties

森田 淳<sup>1</sup>, 中村 和洋<sup>1</sup>, 上田 雄一<sup>2</sup>

Jun MORITA<sup>1</sup>, Kazuhiro NAKAMURA<sup>1</sup>, Yuichi UEDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSR 株式会社 エッジコンピューティング研究所, <sup>2</sup>JSR 株式会社 イノベーション推進部

<sup>1</sup>JSR Corporation, Edge Computing Research Lab., <sup>2</sup> JSR Corporation, Innovation Acceleration Dept.

## 【要約】

近年, 3D プリンタは個別化製造に向けた自由形状の造形のみならず, 構造由来の特異な特性を発現する Architected Material の実現手法としても報告されている。一方, 利用者が実用上の形状に対して Architected Material を直接設計することは, 非常に煩雑な設計プロセスを必要としている。本研究では、ユーザーがデザインした外形形状と局所物性に対し, マイクロラティスのパラメータをシステム側で割り当て, 光造形型 3D プリンタと連携させることで, 「形」と「特性」を 3 次元的にデザイン・出力可能な 3D 設計・造形一貫型システムを開発した。「形」と同時に「特性」を自由に 3D デザインするシステムは, 医療インソールをはじめとして, 個別化製造の加速に貢献するものと考えられる。

キーワード: 3D, アーキテクテッドマテリアル, メタマテリアル, 設計システム, 個別化製造

## 【Abstract】

In this study, we investigated a method for assigning parameters of microlattice to the external geometry and local properties designed, and linking the system to a stereolithographic 3D printer. As a result, we developed a 3D design/fabrication system that can design shapes and properties. This system is expected to accelerate the individualized manufacturing by 3D-designing both shapes and properties.

Keywords: 3D, Architected Material, Metamaterials, Design system, Personal Fabrication

## 1. 序論

3D プリンタを用いたデジタル設計・製造は、設計・製造の分散化が可能[1]であり, ファブラボなどを活用した設計の個別化といった既存ニーズ[2]に加え, ウィズ/アフターコロナの環境下における遠隔設計・製造プロセスへの展開が期待される。特に、医療分野は 3D プリンタを用いることで、個人ニーズに合わせた装具製造が可能になる[3]など、個別化製造のニーズを強く抱えており、成形外科分野などで伝統的な石膏型を用いたプロセスに対し、3D デジタル設計・製造による高速製造が注目を集めている[4]。

しかし、3D プリンタで造形するためのデータは、3D-CAD で一から設計するか、三次元測定データを元に 3D-CAD で修正する必要がある。実測のデータを 3D プリンタ向けに前処理修正するには大きな労力と手間が必要であることが課題である[5]。特に、矯正用などに用いる医療インソールの 3D 製造については、専用ツールがないので 3DCAD を用いた非常に煩雑な設計手法が報告されている[6][7]。というのも、従来医療インソールは、硬さなどの特性の異なる材料の配置組み合わせ[8]によって特性の制御を行ってきたためである。

以上から利用者が実用上の形状に対して、場所ごとに局所的に性質を変え構造を直接設計することは、非

常に煩雑な設計プロセスを必要としており、現実的でない。そのため、ユーザーが「形」と「特性」を 3 次元的にデザイン・出力可能なシステムが個別化製造実現の加速に求められているものと考えられる。

近年では 3D プリンタは自由形状の造形のみならず、負のポアソン比や軸異方性の物理特性など、構造由来の特異な特性を発現する Architected Material を実現する手法としても報告されている。筆者らは、慶應義塾大学 SFC 研究所との共同研究によって、3D プリンタを用いた設計製造システムの開発と社会実装に取り組みを重ねており、弾性エラストマーのマイクロラティスの構造パラメータと物理特性の関係[9]に関する知見を蓄積の上、三次元形状の測定データを元に、Architected Material を用い、インソール形状の内部に対して、要求した硬さの微細周期格子構造(マイクロラティス)を部分的に割り当てるアルゴリズムを開発することで、ユーザーの従来の設計感覚を生かしながら「形状」と「特性」をコントロールしたインソールを製造可能な技術を確立してきた[10]。前記技術をもとにした 3D 設計・造形一貫型システムについて報告を行う。

## 2. コンセプト①: システム全体フロー

インソールを例に、3D 設計・製造をするためのワー

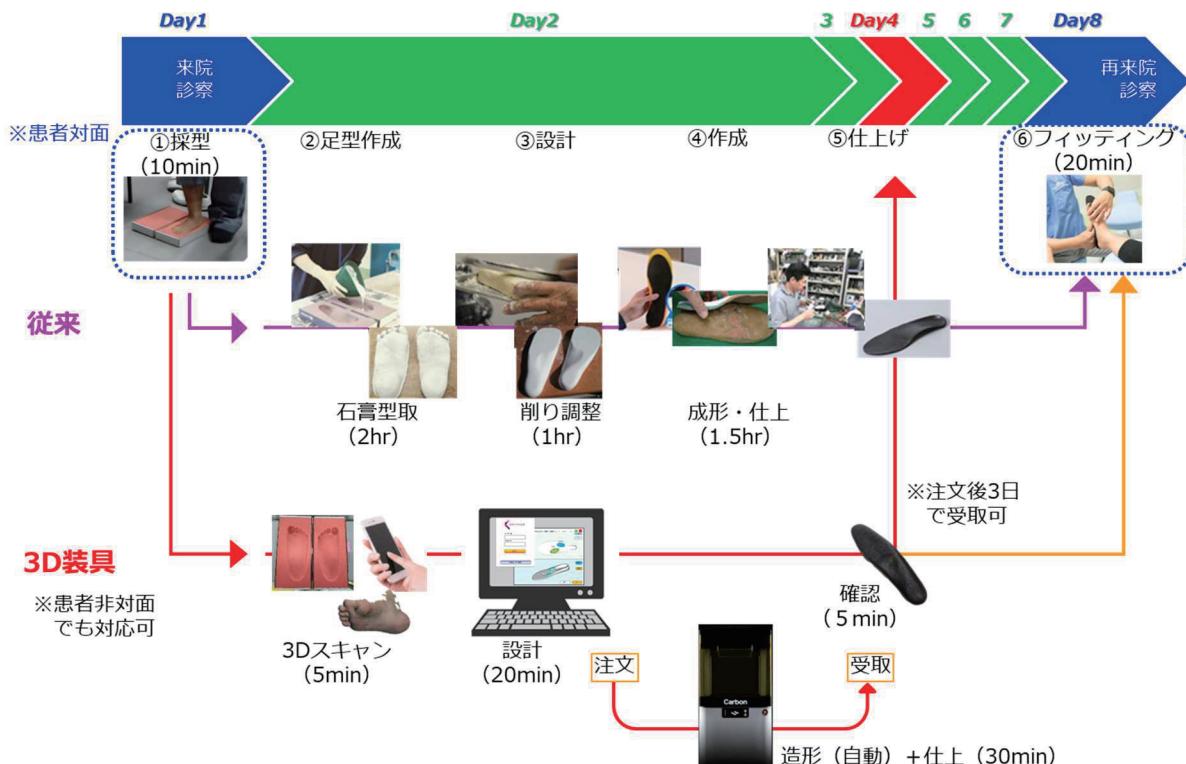


図 1. 従来インソール設計プロセスと 3D 設計による設計プロセス

クフローを図 1 に示す。従来、装具の設計は対面での足形採型ののち、石膏を用いて型取を行ってから複数の材料を組み合わせて手作りで造形を行うという煩雑なプロセスを必要としており、一人あたりの設計・製造可能な数量は限定されたものであった。

そこで、本システム内においては、図 1 中の①に示す「採型」におけるトリッシャム(柔軟なスポンジフォーム)型を用いて、設計者スマートフォンの3D スキャン機能を用いて3D データを作製し、この3D データを用いて web アプリ上でインソールの設計を行い、設計データを集中サーバ上で3D プリンタに合わせた形に変換することで遠隔で設計したデータをもとに自動でインソールの造形が可能となるシステムとして設計した。このシステムにおける技術的な課題は、「医療装具として、「形」と「特性」を自由に設計できること」と「3D 設計に不慣れなユーザーが遠隔で設計可能であること」の2点であり、この2点に関するアプローチについて後述する。

### 3. コンセプト②:「特性」の自由度実現

単一材料を用いた一体造形物に対して、部分的な硬さを自由に付与する手法として、Architected Material に着目した。柔軟なエラストマーを用いた微細周期格子構造(マイクロラティス)の荷重変位曲線は柱太さなどの格子設計パラメータによってコントロールを行うことが可能である。一方で、直接的にラティスによるマクロなインソール形状を設計することは煩雑であり、作業難易度が高い。また、インソールサイズの3D データをラティスで作成しようとした場合、表面積が膨大となるため、数百 MB 以上の容量が必要となる。よって、3 次元データ編集と可視化をエッジ端末で直接行うことは現実的ではない。そこで、図 2 に示すように、最小面積でデザインしたラティスの格子データを準備しておき、設計者がエッジ側で概形でデザインした形状に合わせ、サーバ側で切り出し箇所とラティスの柱太さを変えることで、比較的軽量にエッジ側の処理を行うことが可能なプロセスを設定した。

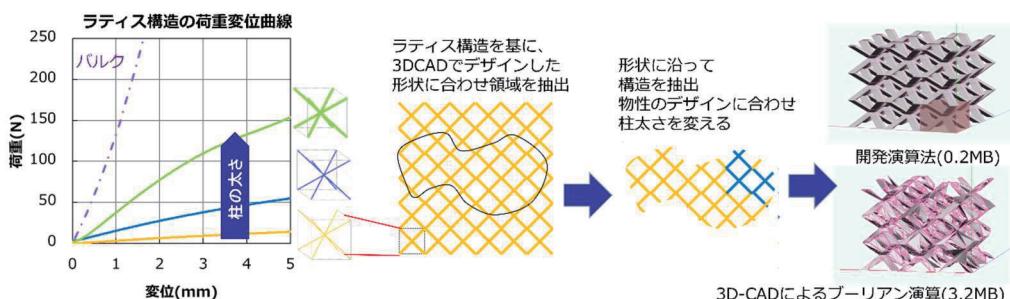


図 2. マイクロラティス割り当てによる特性付与[10]

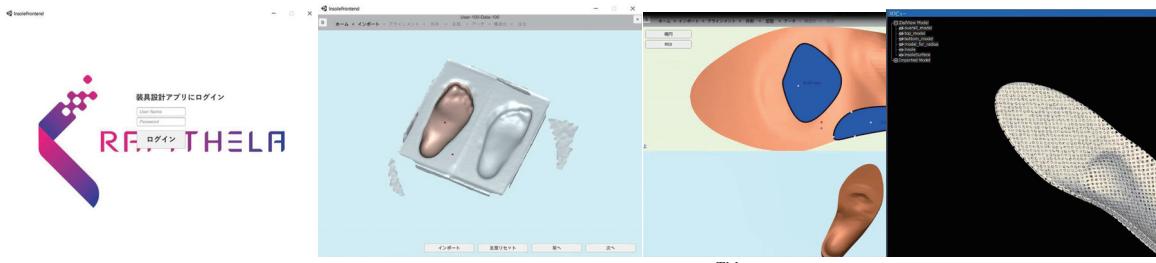


図 3. インソール設計 web アプリ「eLabo™」操作画面

### 3. コンセプト③: 形と特性を設計するユーザーUI

前章で述べたように、概形形状をもとにラティスの柱太さを部分的に変えることで、三次元形状の接続を損なう(造形上の欠陥発生)なく、マイクロラティスによるマクロ形状を生成可能である。3D 設計に不慣れな一般設計者向けのUIとして、採型を行った足形をもとに、2D 制御で表面位置のコントロールと「硬さ」を变量する領域を UI 上で指定でき、サーバ上で3D マイクロラティスによるインソール形状と局所的な硬さをコントロール可能な設計アプリケーションを開発した(図 3)。「eLabo™」で作製したデータをサーバ上で造形スライスデータに変換して3D プリンタへ送信することで、エッジ端末で 3D デザインしたインソールをリモートで製造可能となる。

### 4. 一貫システムを用いた造形テストと作業性

これらコンセプトをまとめた一貫型システム「eLabo™」を用い、硬さをシームレスに变量してインソールを作製した結果を図 4 に示す。同一のウレタンエラストマーから形成した一体インソールの各部位ごとに、設計に従って異なる硬さを付与できていることが確認できた。

また「eLabo™」を用いた際の作業性改善効果を評価した結果を表 1 に示す。各手法において 4 個のインソールを設計した際の各工程作業時間を評価した。従来の医療インソール設計手法に対して、非対面で製品製造が可能かつ大幅に設計者の作業時間を短縮できた。また、「eLabo™」は 3D-CAD の経験がない作業者が作業を行っても作業時間の変化は見られなかった。その

ため、専用の設計ツールを用いた一貫型造形システムを用いることで、既存 3D-CAD を用いた設計手法に比べ、非熟練者でも簡易かつ短時間で設計作業を行うことができると確認できた。

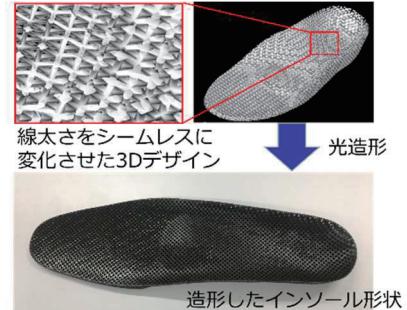


図 3. インソール形状の造形結果[10]

### 5. 結論

足形の三次元データをもとに、設計者が web アプリ上で形状と特性を 2D ベースでデザインした結果を、サーバ上で 3D プリンタ造形用に Architected Material のデータへ変換することで、形状と特性をコントロールした医療インソールの設計・造形が可能な一貫型システム「eLabo™」を開発した。従来の設計手法に対して、「形状」と「特性」を簡易かつ短時間で設計作業を行うことができた。また、非対面で製品製造が可能であることから、ウィズ/アフターコロナの社会環境における遠隔・個別化製造の加速に貢献できるものと考えられる

表 1. インソール形状の造形結果

工程	従来	3D-CAD/CAM	eLabo
①採型 (10min)	トリッシャム	トリッシャム または 足裏スキャン	トリッシャム
②足型作成	石膏型取り (2hr)	3Dスキャン (5min)	3Dスキャン (5min)
③設計	削り調整 (1hr)	CAD/CAM (30min※熟練者) 設計+データ読込	eLaboアプリ (20min) 設計+データ読込
④作成	成形 (1hr) 貼合+切削	切削または成形 (自動)	※委託 造形 (3Dプリンタ)
⑤仕上げ	表面材貼合、研磨 (30min)	表面材貼合、研磨 (30min)	※委託 研磨 (30min)
⑥フィッティング (20min)	フィッティング (再仕上)	フィッティング	フィッティング
実質作業時間 (採型、フィッティング除く)	4時間30分	1時間	30分

## 参考文献

1. 館野寿丈, “アディティブマニファクチャリングによる複雑部品の製作と設計製造の分散化”, システム/制御/情報, 61(3), 2015, pp.95–100
2. 田中浩也, “ファブラボからみる「ソーシャル・ファブリケーション」の可能性”, サービスロジー, 4(1), 2017, pp24–31
3. 浅見豊子, “義肢装具における3Dプリンターの活用” *The Journal of Rehabilitation Medicine*, 54(5), pp392–393, 2017
4. Jorge Barrios-Muriel, Francisco Romero-Sánchez, Francisco Javier Alonso-Sánchez and David Rodríguez Salgado, *Materials*, 13(2), 295, 2020
5. 田中真美, “3Dプリンター用のデータ作成”, 日本義肢装具学会誌, 32(3), pp172–176, 2016
6. Miguel Davia-Aracil, Juan José Hinojo-Pérez, Antonio Jimeno-Morenilla and Higinio Mora-Mora, “3D printing of functional anatomical insoles”, *Computers in Industry*, 95, pp38–53, 2018
7. Zheng Ma, Jiacheng Lin, Xiaoyue Xu, Ziwei Ma, Lei Tang, Changning Sun, Dichen Li, Chaozong Liu, Yongming Zhong and Ling Wang, “Design and 3D printing of adjustable modulus porous structures for customized diabetic foot insole”, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(1), pp57–63, 2019
8. 田中正一, 蜂須賀研二, 緒方甫, 大峯三郎, 舌間秀雄, “中敷材・踵材の衝撃緩衝効果” リハビリテーション医学, 31(8), pp543–550, 1994
9. 森田淳, 光部貴士, 小松敏, 川瀬領治, 仲谷正史, 田中浩也, “弹性ポリマー材料を用いたラティス構造の力学物性と構造パラメータの関係”, 第28回ポリマー材料フォーラム, 2PD36, 2019
10. 森田淳, 小松敏, 光部貴士, 中村和洋, 川瀬領治, 仲谷正史, 田中浩也, “Architected Materialを用いた感性ベースの構造デザイン手法 -カスタムインソールの3Dデジタル設計に向けて-”, デジタルプラクティス, 11(2), pp.434–455, 2020

# ヘリカルハニカム構造体の提案

Proposal for a helical honeycomb structure

譜久原 尚樹

Naoki FUKUHARA

日本アグファ・ゲバルト株式会社

Agfa-Gevaert Japan, Ltd.

## 【Extended Abstract】

### 1. ヘリカルハニカム構造体の提案

六角形の底面が螺旋の軌道を描きながら掃引(スワイープ)し上面に至るような立体を考える

このようにしてできた立体の底面もしくは上面の正六角形で平面充填すると立体同士はお互いが交差せず密着する。

この密着部分である曲面に対してウェイトを付与し新たな立体とすると底面と上面が開口部となった目的の構造体となる。

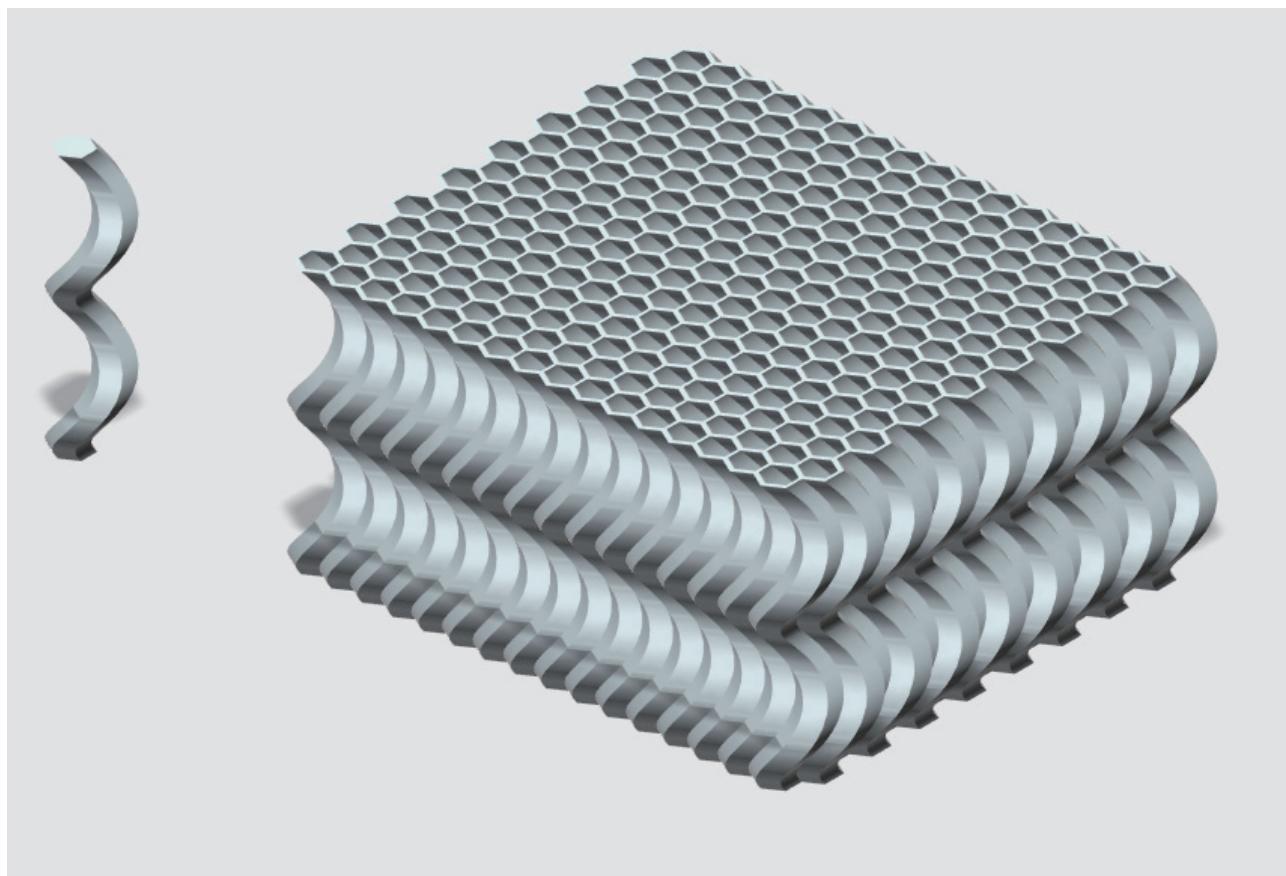


図 1. ヘリカルハニカム構造体例

### 2. 結論

ハニカム構造はハチの巣状のマトリクスを挟み込むふたつの面が接着されることで構造としての強度が発現するが、上記構造はハチの巣セルに蓋をしなくても自立する強度を期待できる。

以下に応用を述べる。

FDM 方式 3D プリンティングにおいて充填に用いられるラティス構造であるインフィルパターンとして六角形輪郭によるタイリングパターンをデフォルトとするものが多く、利用も多い。

積層によって形成されるヘリカルハニカム構造体は、一層分だけ見る限り既存のハニカムインフィルパターンと同じであるため G-Code ジェネレータへの実装は容易であると考えられる。

切削や射出成型では作れない形状だが FDM 方式 3D プリンティングには向いており、インフィルパターンとして用いることで側方からの圧迫に対して抗力を付与できるメリットがある。  
軟質材料でプリントするとクッションとしても適した構造と考えられる。

3D プリンティングによるハニカム構造をクッションとして用いる場合、Z 方向の圧迫に対して XY 方向の変形が予期しないものとなる恐れがある。

ヘリカルハニカム構造体の場合は隣接して接着したコイルスプリング群とみなすことができるので、XY 方向の変形によって逸らされない Z 方向の圧迫ベクトルは垂直に近くなることが期待できる。

フットウェアのクッションとして用いれば着地点を作用点としたときクッション圧縮後の力点のずれを小さくする機能を付与できる。

セルの内壁を肥厚させることでスプリング強度を変化させることができるので、クッションやマットレスに意匠としてのスプリング強度分布を与えることもできる。

上図において掃引の軌道として用いた螺旋は底面が属する平面に投影したとき六角形が内接する円となる大きさを用いた。

この比率で得られるヘリカルハニカム構造体は直射光を通さず螺旋の周期が大きくとると通気性が増大する。光源ハウジングを遮光したいが空気冷却もおこないたいような場合の設計に用いると効果的であると考えられる。セルをいくつかまとめたものでブロックモジュールをデザインするとブロックモジュール同士が接する嵌合面は凹凸が密着するためにズレがない。

通気性のきわめて大きな完全暗室や視覚的遮断パーティションをつくるための壁面構成要素とすることができる。

# Differential Growth Model を用いた建築スケール 3D プリンティングへの 通気性付与

Adding Permeability to Architectural Scale 3D Printing Using Differential Growth Model

名倉 泰生<sup>1</sup>, 青山 新<sup>2</sup>, 河井 萌<sup>3</sup>, 知念 司泰<sup>1</sup>, 松木 南々花<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>

Yasuo NAGURA<sup>1</sup>, Shin AOYAMA<sup>2</sup>, Meg KAWAI<sup>3</sup>, Moriyasu CHINEN<sup>1</sup>, Nanaka MATSUKI<sup>1</sup>, Hiroya TANAKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学環境情報学部, <sup>2</sup>慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科, <sup>3</sup>慶應義塾大学総合政策学部

<sup>1</sup>Faculty of Environment and Information Studies Keio University, <sup>2</sup>Graduate School of Media and Governance Keio University, <sup>3</sup>Faculty of Policy Management Keio University

## 【要約】

本研究は建築スケール 3D プリンタ(以下「建築3D プリンタ」とする)による造形における、設計手法の提案を行うものである。建築 3D プリンタの分野で一般的な、ペースト材を用いた 3D プリンティングに存在する様々な制約に対し、Differential Growth Model による設計手法を開発した。自由形状であっても造形可能なツールパスを低成本で生成した。更に、単位時間に細分化した新たな Gcode(Time-Based Gcode)を開発した。これにより、データ設計段階で硬化不十分となる箇所を検出することが可能となった。

本研究の成果は建築 3D プリンタでの造形を想定した設計のコストを削減するものである。

キーワード: 建築, ペースト, 設計, Gcode, 手法

## 【Abstract】

This study proposes a design method for architectural scale 3D printer (hereinafter referred to as "architectural 3D printer"). We have developed a design method using a differential growth model for architectural 3D printers, which are commonly used in architectural 3D printing, to overcome various constraints that exist in 3D printing with pastes. We developed a toolpath for low-cost fabrication of free-form shapes. Furthermore, a new Time-Based Gcode (Time-Based Gcode), which is subdivided into units of time, is developed. It is possible to detect the points that are not sufficiently hardened at the data design stage.

The results of this research are expected to reduce the cost of designing for architectural 3D printer fabrication.

Keywords: Architecture, Paste, Design, Gcode, Method

## 1. 序論

建築 3D プリンタは多くの場合、セメントや土などの常温硬化ペースト材料を用いる。ペースト材料の 3D プリンティングには、一筆書きでなければならない、一層毎に時間を置かなければならぬといった設計上の制約が生じる。これに対し、Differential Growth Model による設計手法を開発し、自由形状であっても 3D プリント可能なツールパスを低成本で生成した。更に、移動座標と速度を指定する従来 Gcode に対し、単位時間に細分化した新たな Gcode(Time-Based Gcode)を開発した。これにより、任意地点の直下に存在するパスが出力されてからどの程度経過しているかを取得することが容易となり、データ設計段階で硬化不十分となる箇所を検出できる。

## 2. コンセプト

建築 3D プリンタが一般的に用いる常温硬化ペースト材料は、流動性が高く吐出動作を停止した後も自重で吐出が継続してしまう。また、硬化にある程度の時間を要するため、時間を置かずして積層をすると自重で流

れ出し造形が崩れてしまう。こういった特徴から、建築 3D プリンタで出力することを想定した設計に求められる要件は以下の通りである。

- ・一筆書きで造形でき、吐出を中断する必要がないツールパスであること
- ・硬化に必要な時間が経過していない部分の上に積層してはならない

建築 3D プリンティングの制約は上記 2 点以外にも様々な存在するが、ここでは省略する。本研究はこれら 2 点を踏まえ、幾何学的アルゴリズムを用い、Gcode の作成基準となる要素の工夫を行うことで造形可能性の高い設計を行う。

### 3. ArchiFAB NIWA

本研究の成果は当研究室の所有する建築 3D プリンタ「ArchiFAB NIWA」への適用を目指すものである(図 1)。ArchiFAB NIWA は土等を主材料としたワインチケーブル式プリンタで、展開することで 30m<sup>2</sup> の造形を行える。ノズル先端部に距離センサが配置されており、造形面とノズルとの距離を適切に補正する。



図 1.建築 3D プリンタ「ArchiFAB NIWA」

### 4. Differential Growth Model

- ・一筆書きで造形でき、吐出を中断する必要がないツールパスであること

上記要件を満たすため幾何学的アルゴリズムである Differential Growth Model を用いて生成的にツールパスを設計する。Differential Growth Model は、曲線を弛緩させ、弛ませることにより曲線を生成する(図 2)。

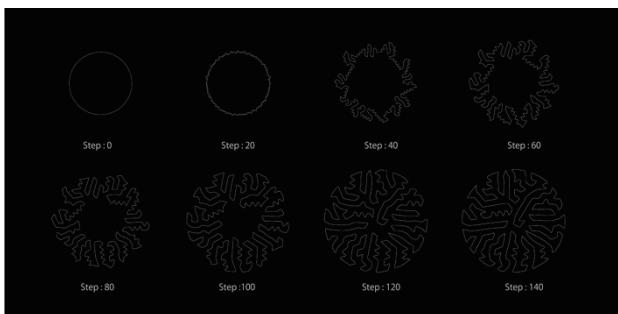


図 2.Differential Growth Model の生成過程

これによって生成された曲線は以下の特徴を持つ。

- ・1 本の線分、若しくは閉じた曲線から生成した場合、結果は必ず一筆書きとなる。
- ・自由形状の面を任意の密度で均一に満たす。

断面形状が単一の平面となる立体形状であればどのようなものであっても一筆書きであり均一なツールパスが設計可能となる(図 3)。



図 3.Differential Growth Model によって設計された造形物

### 5. Time-Based Gcode

- ・硬化に必要な時間が経過していない部分の上に積層してはならない

上記要件を満たすため、単位時間に細分化した新たな Gcode(Time-Based Gcode)を開発した。ツールパス上に無数の評価地点を設定し、その直下に存在する最近傍点を取得する。2 点の造形開始からの経過時間の差分が、硬化に必要な時間以上であるかを判定することを考える。

3D プリンタ(工作機械)の動作を指示する Gcode は目標座標、移動速度、吐出速度などを記述したものである(図 4)。このデータ上での経過時間は、各ツールパスの動作時間の累算となる。ツールパス上の任意の点における経過時間を取得する場合、そのツールパスの始点座標、開始時間、移動速度等から算出する必要がある(図 5)。

Time-Based Gcode は 100 ミリ秒毎の目標位置を記述したものである(図 4)。当研究室の所有する ArchiFAB NIWA の動作速度がおよそ毎分 1000mm であるから、1m の造形距離ごとに 600 地点がデータ上で指定されることとなる。各点の距離は約 1.67mm となり、評価地点としては十分な解像度を有すると考える。直下に存在する最近傍点からの経過時間は、自分が造形開始から何番目に指定されたものであるか、直下の点が同様に何番目であるかの差分に 100 ミリ秒を掛けたものである(図 5)。

これにより各点間の経過時間を算出することが容易となり、大規模な Gcode の解析が可能になる。

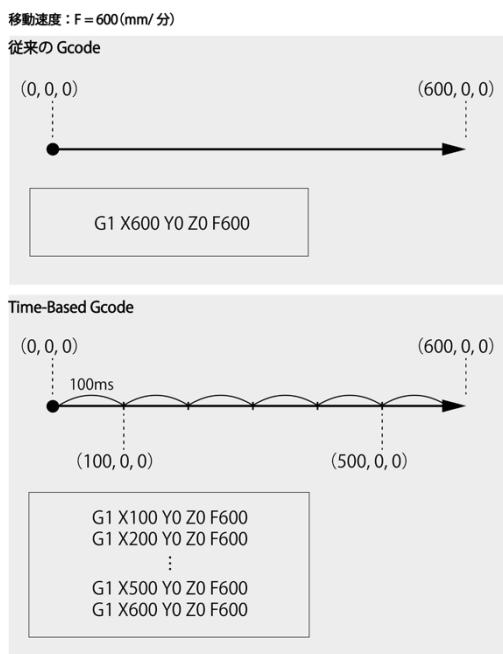


図 4. 従来の Gcode と Time-Based Gcode の比較

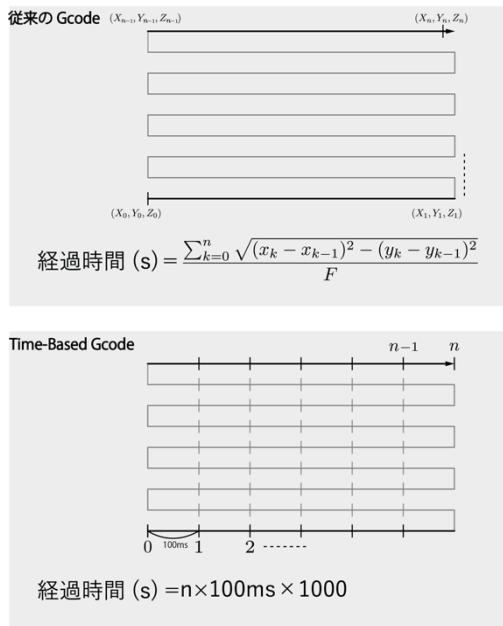


図 5. Time-Based Gcode における経過時間の算出

## 6. 結論

以上 2 手法を組み合わせ、建築 3D プリンタに適合した設計手法を提案した。従来難易度の高かった設計を低コストで実現したことが成果である。更に、Differential Growth Model のパラメータを変更し、構造の粗密を無段階に制御可能となった(図 6)。これにより、今後通気性、保水性、断熱性等を有した構造の設計が可能になると展望している。

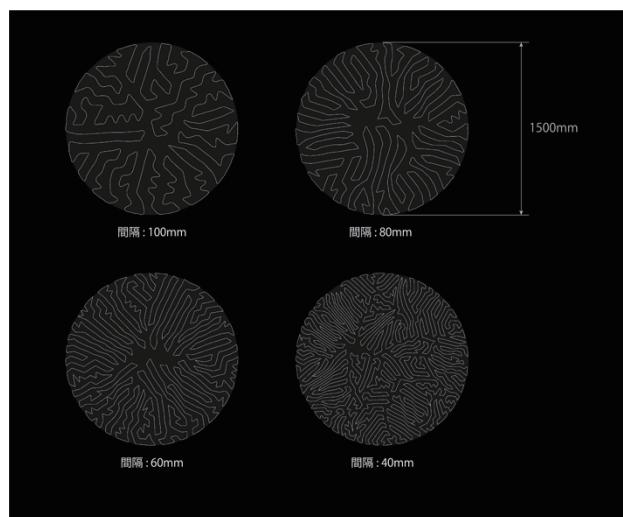


図 6. パラメータによる Differential Growth Model の密度差

## 参考文献

- Pacewicz, Katarzyna & Sobotka, Anna & Gołek, Łukasz. (2018). Characteristic of materials for the 3D printed building constructions by additive printing. MATEC Web of Conferences. 222. 01013. 10.1051/matecconf/201822201013.
- Ma, G., Wang, L., & Ju, Y. (2017). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. Science China Technological Sciences, 61(4), 475–495. doi:10.1007/s11431-016-9077-7
- Freek Bos, Rob Wolfs, Zeeshan Ahmed & Theo Salet (2016) Additive manufacturing of concrete in construction : potentials and challenges of 3D concrete printing, Virtual and Physical Prototyping, 11:3, 209–225, DOI:10.1080/17452759.2016.1209867
- 中村 航, 輿石 直幸, 固化材として酸化マグネシウムを用いた組積耐力壁用非焼成土ブロックに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2017, 82 卷, 740 号, p. 1527–1535, 公開日 2017/10/30



# ボロノイ構造を用いた水の表面張力による 環境呼応パネルの提案

Proposal of environmental responsive panel  
by surface tension of water using Voronoi pattern

河井 萌<sup>1</sup>, 田中 浩也<sup>2</sup>, 大野 定俊<sup>3</sup>, 中島 奈央子<sup>3</sup>

Megu KAWAI<sup>1</sup>, Hiroya TANAKA<sup>2</sup>, Sadatoshi ONO<sup>3</sup>, Naoko NAKASHIMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学 総合政策学部, <sup>2</sup>慶應義塾大学 環境情報学部, <sup>3</sup>株式会社竹中工務店

<sup>1</sup>Faculty of Policy Management, Keio University,

<sup>2</sup>Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

<sup>3</sup>Takenaka corporation

## 【要約】

本研究では、水の表面張力を利用することで、雨天時や散水時に壁を伝い流れ落ちる水滴を網目構造の中にため込むことのできる環境呼応パネルを提案する。出力にはFDM式の3Dプリンタを使用し、パネルの網目にはランダム性のあるボロノイ構造を選んでいる。このパネルに対してパラメータを変えながら水の表面張力による保水性の評価を行う。評価の際は単位面積あたりの母点の数やセルの形状などを変数としてパラメトリックにテストピースを作成・出力し、これに対して同条件で保水性を比較した。また、本研究の成果はボロノイ構造の内部に溜め込まれた水の気化熱によって都市内部の冷却に貢献するものとして期待される。

キーワード: 保水、構造体、ボロノイ、パラメトリックデザイン、SDGs

## 【Abstract】

This research proposes an environmental responsive panel that can store water droplets in the mesh structure by using the surface tension of water. This panel is printed by FDM type 3D printer. Voronoi structure is used for the mesh of the panel. Test pieces are created with the number of cells, and the shape of cells as variables to evaluate the water retention. When the evaluation, the water retention of these test pieces is compared under the same conditions. It is expected that this panel will contribute to lower the temperature in the city by vaporization of water stored in this panel.

Keywords : water retention, structure, voronoi, parametric design, SDGs

## 1. 序論

本研究では、ボロノイ構造を用いて水の表面張力を利用することで、雨天時に水滴を構造内に溜め込むことのできる環境呼応パネルを提案する。出力にはFDM式の3Dプリンタを使用し、マテリアルとして透明度の高いPET-G フィラメントを用いることで、保水し水滴のたまつた状態のパネルに陽光が差し込んだ際に、高い視覚効果を生み出すことが期待される。

本研究ではパネルの保水性について定量的な評価を行った。パネルの保水性は、試験体の構造内に溜め込まれた水分の質量を比較することで評価した。評価は大きく二つに分かれており、保水性を持つ既存素材との比較と、構造をパラメトリックに変化させた試験体を用いた構造変化に伴う保水率変化の比較である。パネルの保水性を定量的に測定することで、今後の評価対象となる吸水性や蒸発性と併せ、都市の中に導入した際に生み出す冷却効果の参考とする。

## 2. 背景

近年顕在化している深刻な都市問題の一つとし

てヒートアイランド現象が挙げられる。ヒートアイランド現象とは都市部の気温が周辺地域よりも高くなる現象で、都市化に伴う人工的被覆の増加による「地表面の温度上昇」が大きな形成要因の一つである。東京都では1994年時点での人工的被覆面積の割合は80パーセントを超えており、「建築物の人工的被覆」「路面の人工的被覆」は現在においても徐々に増え続けている。

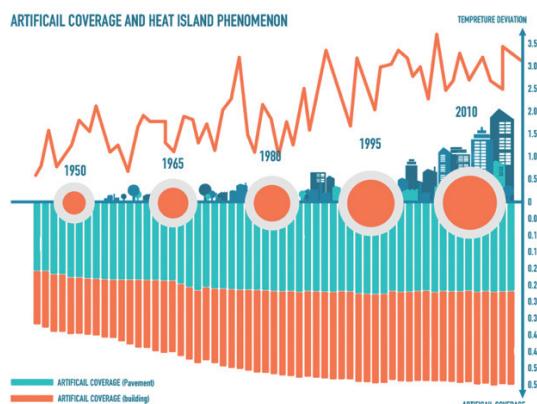


図1. 人工被覆面積率の推移と平均気温の上昇

そこで、人工的に被覆された都市の表面温度の上昇を抑える手段の一つとして保水性を持つパネルを考えた。雨天時に壁を流れ落ちる水滴を溜め込み長時間保水することで、蒸発する際の気化熱によって表面温度を下げるとともに、周辺の気温上昇の抑制を図る。

3D プリンティングの分野において行われている保水性を持つ構造の研究の一つとして Printable Hydroponics : A Digital Fabrication Pipeline for Soilless Plant Cultivation が挙げられる。これは弾力性を持つ SBS と水溶性を持つ PVA を使って印刷し、PVA のみを溶かすことによって得られた多孔質構造を水耕栽培システムとして利用するものである。水に浸すことで構造内に水分を吸い上げ、根を壊すことなく植物を生育させることができる。また、Lay Filaments の開発する GLOWLAY filament は毛細管の開いた多孔構造を持ち、押し出し時に有機構造を形成する。この構造が保水、栄養素貯蔵に貢献し、植物やカビ、地衣類を生育させる。



Printable Hydroponics : A Digital Fabrication Pipeline for Soilless Plant Cultivation



GLOWLAY filament

このように、3D プリント物の構造やフィラメントの構造における保水性の研究は行われているが、制作に工数のかかる微細構造であり、植物の水耕栽培という目的の域を出ない。

そこで本研究では、対象を都市スケールに広げ、都市の冷却効果を狙いつつ、水の表面張力を利用することでボロノイを用いた製作工数の少ない比較的大きな構造の中に保水できるパネルを提案する。

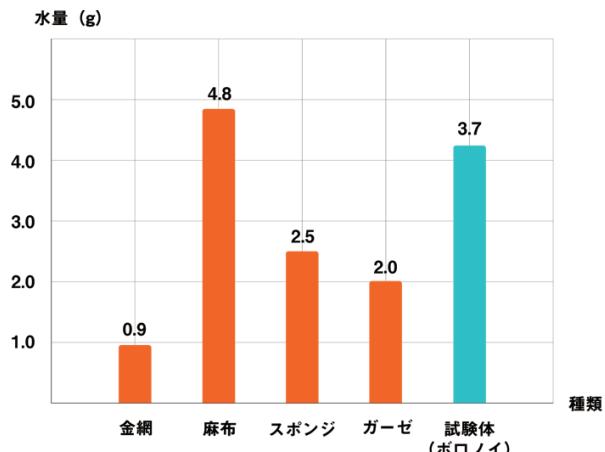
### 3. 手法

まず保水性を持つ既存物との比較として、4 種類の既存物と、ボロノイ構造を持つ試験体の保水性を比較した。既存物は金網、麻布、樹脂スポンジ、綿ガーゼの 4 種類である。これらと PET-G フィラメントを用いて出

力した目の粗さ 100, 50mm 四方のボロノイ試験体を用意し、15 分間水中に浸漬させたのち 1 分間水切りし、保水前後の質量を比較することで構造内に保水された水分量を測定した。この結果を表したのがグラフ 1 である。



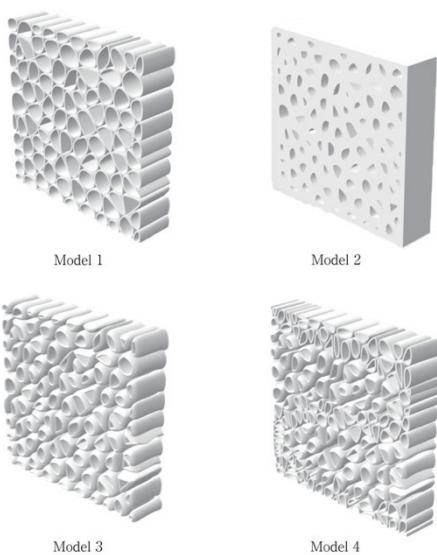
既存物（金網、麻布、スポンジ、ガーゼ）



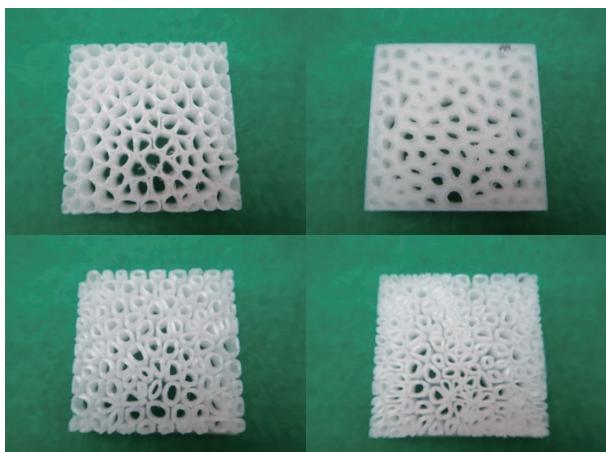
グラフ 1. 既存物との保水性比較

次に構造変化に伴う保水率変化の比較を行った。構造を変化させることで保水率の制御が可能になれば、気候に合わせて場所ごとに必要な保水性を持ったパネルを作成することができる。

ボロノイ構造の持つ部分ごとの保水率への影響を知るために、以下の 4 種類の試験体を作成した。Model 1 は目の粗さ、Model 2 はセル開口部の形状、Model 3 はセル同士の間隙率、Model 4 は大小セルの比率をパラメータとして Model 1 は 5 種類ずつ、その他は 3 種類ずつパラメータを変化させた計 15 個の試験体に対して保水性の比較を行った。以下にその試験体の一例を示した。



4種類のモデル(Model1～4)



試験体の例(Model 1～4)

これらに対して雨を模した試験機(図 2)を用いて水平, 45 度, 垂直の 3 パターンで保水した水分量を計測する実験と, 既存物との比較の際と同様に, 15 個の試験体に対しても 15 分間に浸漬させたのち 1 分間水切りを行い, 保水前後の質量を比較する実験を行った(図 3).



図 2. 雨の試験機

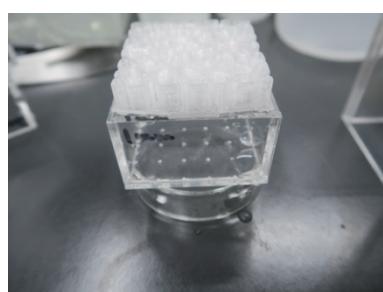


図 3. 水切りを行っている様子

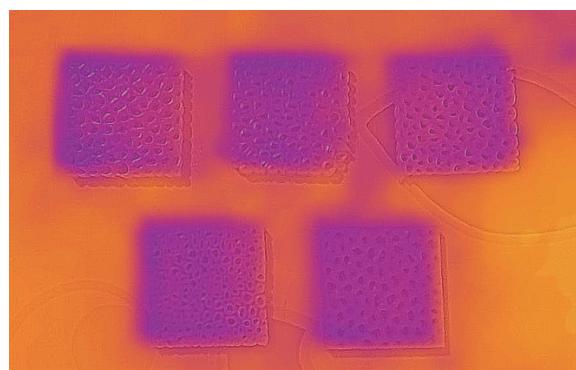
このように構造の部分ごとに形状を変化させて比較することで, それぞれの部位が構造全体の保水性にどのように影響を及ぼしているかを分析した.

#### 4. 結論

本研究では, ボロノイ構造をベースにセルの粗密や形状, 間隙率などをパラメトリックに変化させたテストピースを作成し, 網目構造や多孔構造を持つ既存素材とともにその保水性を比較することで構造変化に伴う保水率の変化を定量的に評価した.

今後の展望として, より精細な既存建材との保水性の比較や, 温度上昇抑制効果の度合い, 蒸発性の値の比較をすることで, 本パネルを都市に導入した際の冷却効果の解析を行う. また, 構造変化による保水率の制御を可能にすることで, 場所や必要性に応じた保水率を持つパネルを都市内部に導入し, ヒートアイランド現象の抑制を図る.

また, 本パネルは壁材のみならず, セルの形状を保ったままパネル自体の形状を場所に応じて変化させることで, 打ち水やスプリンクラー, ドライミストによって散水された水分を保水するサンシェードやガーデンデッキ, 植物を生育する植栽フェンスや土表面における保水材など, 様々な場所への応用が期待できる.



サーモグラフィカメラによる温度上昇抑制効果の調査

#### 参考文献

- 酒井敏 (2013)『都市を冷やすフラクタル日除け-面白くなくちゃ科学じゃない(気象ブックス 037)』, 成山堂書店.
- Yuichiro Takeuchi (2019) 「Printable Hydroponics : A Digital Fabrication Pipeline for Soilless Plant Cultivation」  
<https://tinylab.me/publications/access19ph.pdf>  
(アクセス:2020年9月7日)
- Lay Filaments (2018) 「 GROWLAY 」  
<https://3dprinting.com/news/german-filament-creator-introduces-indoor-farming-material/>. (アクセス:2020年9月7日)
- 住学, 山口博史, 梶山毅, 高松誠, 大原達郎 (2007)「保水性コンクリートに関する研究開発」.  
[https://www.konoike.co.jp/solution/theses/pdf/2007\\_architect\\_03.pdf](https://www.konoike.co.jp/solution/theses/pdf/2007_architect_03.pdf) (アクセス:2020年9月9日)
- 環境省:まちなかの暑さ対策ガイドライン改訂版 (案)  
[http://www.env.go.jp/air/report/h29-01/ref01\\_2901.pdf](http://www.env.go.jp/air/report/h29-01/ref01_2901.pdf) (アクセス:2020年9月11日)



# 機能性タンパク質から味や香りまで、機能性印刷における ピエゾ式インクジェットヘッドの可能性

From functional proteins to taste and smell,  
the potential of piezoelectric inkjet heads in functional printing

齊藤 衛<sup>1</sup>, 板倉 舞<sup>1</sup>, 杉本 雅明<sup>1</sup>

Mamoru SAITO<sup>1</sup>, Mai ITAKURA<sup>1</sup>, Masaaki SUGIMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>エレファンテック株式会社

<sup>1</sup>Elephantech Inc.

## 【要約】

弊社はインクジェット技術を中心とした機能性印刷の可能性拡大に挑戦している。今回の実験を通し、水系インク向けに調整されているピエゾ式インクジェットヘッドで入手しやすいエプソン製インクジェットヘッドが社会に貢献できそぐだと感じる領域について報告する。今回取り上げる液体は、バイオセンサーに使用する機能性タンパク質を溶解させるリン酸緩衝生理食塩水、また身近なものとして、レモン果汁と醤油とした。新しい材料をインクジェットで安定的に吐出しようとすると様々な調整を行うことになるため、その課題も抽出した。本発表ではAM技術としての発展性も紹介する。

キーワード: アディティブマニュファクチャリング、機能性印刷、バイオセンサー、機能性タンパク質

## 【Abstract】

We are trying to expand the possibilities of functional printing based on inkjet technology. This paper reports on the areas in which EPSON's inkjet heads, which are easily available as piezoelectric inkjet heads tailored for water-based inks, are likely to make a contribution to society. We have chosen phosphate-buffered saline to dissolve the functional proteins used in the biosensor, and lemon juice and soy sauce as familiar liquids. Various adjustments are required to ensure the stable discharge of new materials by inkjet, and the issues were extracted. In this presentation, the development of AM technology will be introduced.

Keywords: additive manufacturing, functional printing, Biosensors, functional proteins

## 1.はじめに

エレファンテックは2014年に銀ナノインクを家庭用インクジェットプリンターから吐出し、回路のプロトタイピングを加速するという論文をきっかけに起業した。<sup>(1)</sup> 2020年4月にはAMC(アディティブマニュファクチャリングセンター)を立ち上げ、インクジェット技術を中心とした新しいものづくりに挑戦している。AM技術は資源節約と環境保護にも役立つ持続可能な生産プロセスとして注目されている。<sup>(2)</sup> もともとグラフィック印刷用途向けに開発が進んできた水系のピエゾ式ヘッドは、低粘度領域に合わせたヘッド設計になっている。しかし、産業用途へ展開が進んだインクジェット技術は、インクに様々な機能付与がもたらされたことで高粘度化する方向に進み、それに合わせて産業用インクジェットヘッドは高粘度領域に合わせたヘッド設計へと進化を遂げたと理解している。一方で、AM技術に使用されるインクジェット機能性インクの中でも、水系インクは環境にも優しいため活用の幅が広がっているという背景から、グラフィック用途

で実績のあるヘッドにも活用の可能性が広がったと考えている。そこで我々は、インクジェットヘッドによる機能性印刷の可能性を追求するために、水に近い粘度域の身近な液体を吐出させることにトライした。本報告では、今後成長分野として考えられるヘルスケア分野やFoodTech分野<sup>(3)(4)</sup>で活用されそうな材料として、リン酸緩衝生理食塩水(PBS溶液)、レモン果汁、醤油を取り上げ、吐出性を中心に紹介する。

## 2. 実験装置および実験対象

弊社ではエプソン製R&D用インクジェット装置を使用し、エプソン製PrecisionCoreヘッドにてインク吐出評価を実施している。表1に装置概要を示す。現在主流となっている他社実験機のIJヘッドは吐出可能な粘度域として10mPa・s前後になっていることが多い。つまり、今回使用するヘッドは低粘度領域でも吐出可能であることが強みとなっていると言える。また、表面張力についても水に近い高めの領域まで問題なく扱えるようだ。

表 1 R&amp;D 用インクジェット装置概要

メーカー	セイコーホーリング
プリントヘッド	PrecisionCore
インク粘度の目安	1-10 mPa・s
必要最小インク量	50 mL
観察機能	インク滴の飛行観察
描画機能	100mm 角ステージへの描画
インク種類	水系・溶剤系インク

今回吐出評価に取り上げたインクおよび粘度を表 2 に整理した。粘度はブルックフィールド社製デジタル粘度計 LVDV1M を使用し、実験室環境にて計測した。

PBS 溶液は、バイオセンサー用途として酵素などの機能性タンパク質などを添加し使用する<sup>(5)</sup>ため、今後も活用の場が期待されている。レモン果汁と醤油は身近なものの一例として、味や香りを微小量コントロールすることにより産まれるアイディアを期待して選定した。

表 2 使用した液体

液体名	粘度 [mPa・s]
PBS 溶液	0.99
レモン果汁	1.26
醤油	3.48

### 3. 実験方法(評価方法)

R&D 用インクジェット装置にて、まずはヘッドに対して液体の初期充填を行い、波形や電圧調整を簡易的に実施した。ピエゾ式のインクジェットヘッドは電圧を印加する時間が液体に対して適切でないと正しく飛翔しないので、基本的に波形調整は液体ごとに実施する。また、初期充填時に気泡が抜けきらないと不吐出ノズルが発生するため、注意が必要である。ここでは、8割以上のノズルで正常吐出していれば良しとし、それぞれの液体の特長を抽出した。

#### ・リン酸緩衝生理食塩水(PBS 溶液)

この液体は水と同等の物性であるが、安定して吐出させることができた。図 1 に吐出の様子を載せる。図の上部にノズルが配置され、下方向に液滴が飛行している様子である。5μs 刻みで 7 回分の吐出観察画像を繋ぎ合わせたものである。主滴以外に、ノズルからの吐出直後にテール部のサテライトが 2 滴形成される特長があった。表面張力が高いことが影響しているものと推察される。



図 1. PBS 溶液の飛行状態(5μs 刻み)

#### ・レモン果汁

テルヴィス社製のイタリア産有機レモン・ストレート果汁 100%を使用し吐出させた。レモン果汁は乾燥により吐出性が悪化するという特長があったため、図 2 に放置時間違いでの飛行状態を載せた。5 分放置後では約 17% のノズルで吐出異常が見られた。この状態はノズルクリーニングで回復する。また、1 日放置の試験において、飛行状態が悪化するなどの異常は見られなかった。長期的な使用環境を考慮するなら、リモネンの影響などを調査する必要がある。

図 3 にリトマス紙上に印刷した結果を載せた。本実験において、1 滴の吐出量は約 5pl である。味覚としてレモンの酸っぱさを感じる量は私の体感では 5~10ul 程度であった。つまり、インクジェットヘッドでレモン果汁は 100 万滴吐出することでやっと味覚に現れるということである。繊細な味覚表現や、個人の好みに合わせた安定的な味覚調整がインクジェット技術を用いれば実現できると考えられる。

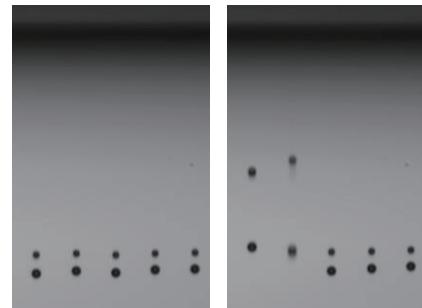


図 2. レモン果汁の飛行状態(放置時間違い)

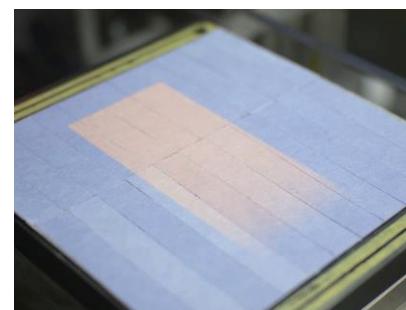


図 3. リトマス紙上に印刷したレモン果汁

## ・醤油

ヤマサ醤油社製のヤマサしょうゆを吐出させた。図4に周波数30kHzでの飛行状態を載せた。醤油は5分放置でも吐出異常が起きることなく、グラフィック印刷用インクに粘度が近い醤油は、吐出性が安定であった印象である。吐出評価中にはとても香ばしい香りがしたことが特長的であった。微量でも香りが立つということは、例えば食欲をコントロールする方法として、インクジェットが活用できる可能性を示唆している。極微量を広い面積に塗布することで、均一に揮発し漂う香りの新しい感覚は様々な用途展開が期待できる。

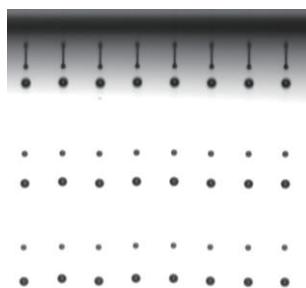


図4. 醤油の飛行状態(周波数30kHz)



図5. 用紙へ印刷した醤油

## 4. 應用事例

応用事例として、PBS溶液をもちいたバイオセンサー<sup>(6)</sup>の試作を進めている。このセンサーにはPBS溶液のみならず、銀インクによる回路パターンやレジスト材もインクジェットにて形成することで、無駄のない製造プロセスが構築できるかを検証する目的がある。将来的には他の材料もインクジェット印刷が可能になるか検討を進めたい。

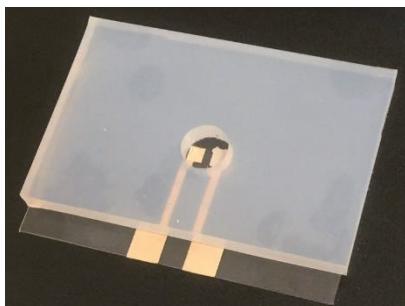


図6. 試作中のバイオセンサー

## 5. おわりに

今回の実験により水系インク向けに設計されたピエゾ式インクジェットヘッドが水、レモン果汁、醤油などの低粘度領域の液体でも比較的容易に吐出できることができた。吐出安定性を確保するためには、波形調整などにより追い込むことも必要になる。今後、市場が拡大していくと想定される分野への展開として、インクジェット技術は大いに期待できると考えている。

## 謝辞

セイコーホーリング株式会社のご協力のもと、本テーマを進めることが出来た。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

1. M.Mehrpooya et al. "The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review", Applied Sciences (2019),3865.
2. Y. Kawahara et al, "Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices", The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013) , Zurich, CH, 2013, pp. 363-372.
3. T. Sawada, "3D フードプリンタの影響と可能性について", Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2019).
4. R. Wakasugi, "Practice of Food Design with New Textures using 3DPrinting", Keio University (2019).
5. K. Nagamine et al, "Printed Organic Transistor-based Biosensors for Non-invasive Sweat Analysis", Analytical Sciences (2020), pp.291-302.
6. K. Nagamine et al, "Noninvasive Sweat-Lactate Biosensor Emplsoying a Hydrogel-Based Touch Pad", Scientific Reports (2019), 9:10102.



# 家庭用プリンターに対するインク粘度調整用ヒーター搭載の試み

Attempt to install a heater for adjusting ink viscosity in a household printer

森 真格<sup>1</sup>, 高橋 啓太<sup>1</sup>, 齊藤 衛<sup>1</sup>, 杉本 雅明<sup>1</sup>

Masyu MORI<sup>1</sup>, Keita TAKAHASHI<sup>1</sup>, Mamoru SAITO<sup>1</sup>, Masaaki SUGIMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>エレファンテック株式会社

<sup>1</sup>Elephantech Inc.

## 【要約】

家庭用プリンターに使用されるインクは、プリントヘッドに対して適切な粘度に調整されている。当然、高粘度のインクをセットしてもそのままでは印刷できない。例えば、PEDOT インクは一般的にグラフィック用インクより粘度が高いため、今まで専用のプリンターを使用する必要があった。しかし、加温によってインク粘度を下げられるならば印刷出来る可能性がある。そこで今回は、家庭用プリンターのインクカートリッジ部にヒーターを設置する改造を施した。これにより、インク粘度をコントロールすることが可能になるため、高粘度のインクも使用できるようになる。

この改造により、家庭や研究機関の実験室環境でも、PEDOT をはじめとした様々なインクをセットしての印刷や試作が可能になる。例えば、透明な電気回路を形成して LED を実装することや、タッチセンサーなどの試作もできるようになる。本検討では、その可能性を調査した。

キーワード:家庭用プリンター, 機能性印刷

## 【Abstract】

The inks used in household printers are adjusted to an appropriate viscosity for the print head. Naturally, even if high viscosity inks are set, they cannot be printed as is. For example, PEDOT ink is generally more viscous than graphic inks, so until now it has had to be used in a special printer. However, if the viscosity of the ink can be lowered by heating it, there is a possibility that it can be printed. Therefore, this time, a heater was installed in the ink cartridge section of the home printer. This makes it possible to control the ink viscosity, so that high viscosity ink can be used.

This modification allows for printing and prototyping of various inks, including PEDOT, in a laboratory environment at home or in a research institute. For example, it will be possible to form transparent electrical circuits and implement LEDs, as well as prototype touch sensors and other devices. In this study, we investigated the possibilities.

Keywords: Household printer, functional printing

## 1. はじめに

家庭用プリンターによく用いられるグラフィック用インクの溶媒は概して水ベースとなり、粘度が低い傾向にある。対して、グラフィック用ではない機能性材料インクは溶媒が溶剤ベースのものが多く、グラフィック用インクに比べて粘度が高い傾向にある。また、家庭用プリンターのプリントヘッドは水ベースの低めの粘度に最適化されているため、粘度の高い機能性インクは吐出が困難である。しかし、熊沢(1974)<sup>(1)</sup>、飴山(1982)<sup>(2)</sup>、田中ら(1983)<sup>(3)</sup>のように、インクジェットヘッドあるいはその近傍の流路を加温することで、インクの粘性をコントロールし印刷する手法は確立されている。同様の改造を家庭用のインクジェットプリンターに施すことによって、粘度の高いインクを吐出することができるようになる試みを行った。本改造が成功すれば、家庭や研究機関の実験室環境でも、幅広い機能性材料の印刷が可能になる。

## 2. 改造手順

プリンターは EPSON 製 PX-S170T を使用した。モノクロインクのみのインクジェットプリンターで A4 サイズまで印刷できる機種である。インクの交換は、カートリッジ

交換ではなく、ボトルにより補充を行う。選定理由は、ボトル補充であるためインクの変更が容易にできること、インクの経路がわかりやすいうこと、ヘッド周りのスペースが広めで改造しやすいことである。

まずはプリンターの構造を把握した。筐体のプラスチックカバーを取り外し、プリントヘッド(以下「ヘッド」)を露出させていく。クリーニング時にインクを回収するボックスから始め、側面のパネルを外していく、筐体上面の蓋状のパネルまで取り外す。(図 1)



図 1. 蓋状のパネルまで取り外した状態

特殊ネジなどは使用されておらず、市販のドライバーで取り外し可能であった。シール等で隠されたネジは存在しなかった。ヘッドがベルトによって稼働する事が確認できるが、この機構では重量物をヘッドキャリッジに搭載するとモーターが脱調してしまう恐れがある。インク加温機構の重量になるべく減らすため、インク加熱用ヒーターの制御機器等は、できる限りプリンター外に設置することにした。

そのままヘッド部の分解に取り掛かる。上蓋を外し、中のインクタンクを取り出す。(図 2, 3)



図 2. ヘッド上部のインクタンク



図 3. 取り外したインクタンク

タンク側面に取り付けられたパネルは着脱が容易で、インク経路に近く、薄いフィルム越しにインクを温められる構造であり、加温効率が良さうなので、このパネルをヒーター設置のベースとして利用することにした。

次にヒーターを制作した。温度制御は、ヒーター部に熱電対を設置し、温度調節器で指定温度を維持することにした。ヒーター及び熱電対は、タンクとパネル間の隙間に設置するため、薄いことが求められる。ヒーターは弊社製品である P-Flex<sup>®</sup>を用いて、15 Ωでパネルと同サイズにて制作した。熱電対は佐藤商事の K 熱サーモカップルシート L を使用し、温度調節器は Panasonic 製 KT4R を使用した。

取り付けの順番としては、パネルにヒーター、熱電対、温度ムラ防止の銅テープの順で貼り付けた(図 4,5)。熱電対はヘッドに近い側に貼り付け、同様にタンク側もヒーター側のフィルム面に銅テープを貼り付けた。加熱の際、パネルが膨張して両者間に隙間ができてしまったため、CPU 用の熱伝導グリスを厚めに塗ってからパネルを元の位置にはめ込むことで対策した(図 6)。

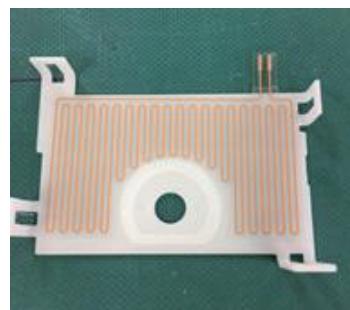


図 4. ヒーターの貼り付け状態

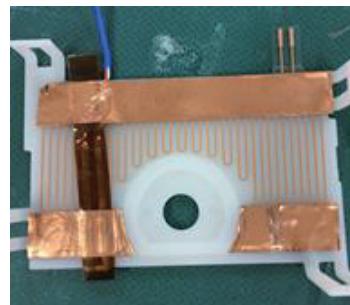


図 5. 热電対と銅テープの貼り付け状態

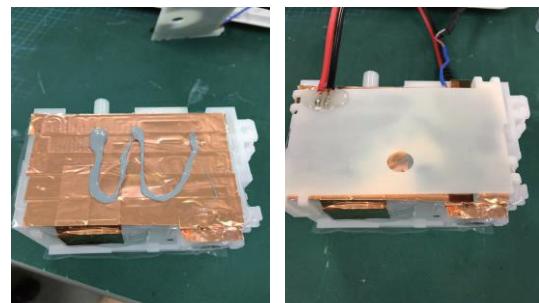


図 6. 热伝導グリスを塗ったヒーター部

ヘッド上蓋は、ケーブル類が干渉するため取り付けないこととした。温度調節器用に筐体を作り、それを結線した。ヒーター部が取り外せるよう、コネクタ等で外せるようにした。ケーブル類は左右から逃すと、筐体カバーに引っかかって不調をきたすので、ケーブルをしっかりと保持するようにヘッド上方からガイドする対策を施した。最後に、ケーブル等の巻き込みがないように留意しながら、戻せる筐体カバーを戻した。



図 7. 筐体カバーを戻した改造機

### 3. 実験

実験用インクは Heraeus 社の Clevios PJet(Oled)を使用した。水性 PEDOT/PSS インクで、選定理由は粘度が 9mPa・s 程度と、PEDOT/PSS インクの中でも比較的低かったからである。

事前に、家庭用インクジェットプリンターがどの程度の粘度のインクに調整されているか計測した。純正の黒色インクは、ブルックフィールド社製デジタル粘度計 LVDV1M で測定したところ、約 4mPa・s(25°C)であることがわかった。

#### ・実験 1

まず初めに、実験用インクの吐出を常温で下記の手順で試行した。

結果は、印刷できなかつた。

- 1-1 インクを通常のインクと同じ手順で充填する
- 1-2 ノズルクリーニングを更に行う
- 1-3 ノズルチェックパターンを数枚印刷する
- 1-4 ベタとグラデーションパターンを印刷する

#### ・実験 2

次に、実験用インクを本改造のもと加温することでインクの粘度を下げ、吐出することに挑戦した。

実験用インクは常温で粘度が 9mPa・s 前後だが、65°Cで粘度が 4mPa・s 以下になるとのデータが有る。そこで、ヒーターの温度を 65°Cに設定し、インクの温度が設定温度になるまで十分に待ってから、実験 1-2 から 1-4までのプロセスを実行した。結果として、本改造を施した効果により、インクの粘度を下げることができたと考えられ、印刷が可能になることが図 8,9 のように示された。

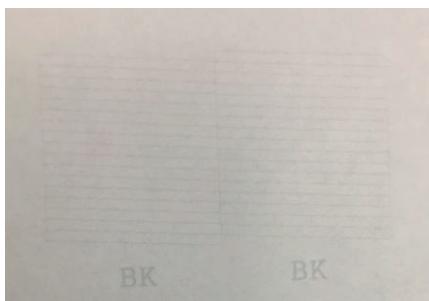


図 8. ノズルチェックパターン



図 9. ベタとグラデーションパターン

その後、より高い温度 80°Cでも印刷が可能であることを確認したが、ヒーターの温度を常温に戻し、翌日にヒーターのスイッチを入れて再度印刷に挑戦したものの、ヘッドが詰まり印刷が不可能になってしまった。ヘッドを分解したところ、ゲル状に変化したインクが流路に蓄積し、詰まりの原因になっていた。



図 10. インク流路内の分解後の様子

#### ・実験 3

実験用インクのゲル化の原因がヘッド内部の接着剤との接触かどうか検証した。ヘッド内部に使用されていた接着剤を削って実験用インクと共に攪拌した物と、何もしていない実験用インクを、それぞれ金属皿に入れて室温で 20 時間放置し、状態の変化を見た。結果としては変化がなく、接着剤の影響ではないと考えた。



図 11. マテコン試験の様子

### 5. まとめ

本検討では、家庭用インクジェットプリンターであつても、温度によるインク粘度の調整を行えば、粘度が高いインクを吐出できるということを示せた。一方で、連続的に安定して機能性インクをプリンターで印刷するには、ヘッド詰まりを起こさないようにする工夫が、その原因究明とともに必要であることもわかった。この結果を発展させて、簡単な家庭用プリンターで幅広い粘度のインクの吐出が可能になれば、UV インクや PEDOT/PSS インクなどを家庭でも手軽に印刷できるようになる。現在では制作に高価な機材が必要なフルカラーの 3D 造形物や透明タッチセンサーレイなど、個人の卓上で印刷できる未来がくるかもしれない。

### 参考文献

1. 東京芝浦電気株式会社、熊沢幸芳、インクジェット用記録ヘッド、特開昭 49-101473, 1974-09-25
2. コニカ株式会社、田中康彦、木村 凱昭、インクジェット記録装置、特開昭 58-155960, 1983-09-16
3. 株式会社リコー、飴山 実、インクジェット記録装置、特開昭 58-212953, 1983-12-10



# 家庭用プリンターに対する UV インク硬化用 LED ランプ搭載の試み

Attempt to install LED lamps for UV ink curing in a household printer

高橋 啓太<sup>1</sup>, 森 真格<sup>1</sup>, 齊藤 衛<sup>1</sup>, 杉本 雅明<sup>1</sup>

Keita TAKAHASHI<sup>1</sup>, Masyu MORI<sup>1</sup>, Mamoru SAITO<sup>1</sup>, Masaaki SUGIMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>エレファンテック株式会社

<sup>1</sup>Elephantech Inc.

## 【要約】

家庭用プリンターはそのほとんどが紙への印刷用途のもので、UV 硬化型インクを扱えるものが無かった。仮に UV 硬化型インクをセットしても硬化用の UV ランプが無いために、着弾直後のインクを素早く硬化させることは不可能であった。今回、家庭用プリンターのプリントヘッド部に UV-LED ランプと水冷式冷却装置を搭載し、UV 硬化型インクを吐出直後に硬化できるような改造を試みた。

この改造に成功すれば、家庭や研究機関の実験室環境でも容易に実験が可能になる。今回はその一例として、改造したプリンターを用いて印刷した UV インクを硬化させることで紙の任意の部分に強度を持たせる実験を行った。本報告では、UV-LED ランプの搭載手順、印刷後の硬化実験の様子を紹介する。

キーワード: 家庭用プリンター、機能性印刷、UV 印刷

## 【Abstract】

Most of the household printers were for printing on paper, and none of them could handle UV-curable inks. Even if UV curable inks were set, it was impossible to cure the inks immediately after they landed on the paper because there were no UV lamps for curing. In this study, we attempted to modify the printhead of a household printer by installing a UV-LED lamp and a water-cooling cooling system to cure the UV-curable ink immediately after it was ejected.

If this modification is successful, it will make it possible to conduct experiments easily at home or in the laboratory environment of a research institute. In this paper, as an example, the modified printer was used to cure the printed UV ink to give strength to an arbitrary part of the paper. In this report, the installation procedure of the UV-LED lamp and the post-printing curing experiment will be introduced.

Keywords: Household printer, Functional printing, UV printing

### 1.はじめに

これまでの家庭用プリンターはそのほとんどが紙に対するグラフィック印刷用途のもので、UV ランプを搭載し UV 硬化型インクを扱える機種はなかった。一方、UV 硬化型インクを扱えるプリンターは大型で高価なものが多々、導入の際のハードルとなっている。本実験の目的は、家庭用プリンターに UV ランプを設置し、UV 硬化型インクの印刷と硬化を行えるように改造することである。

### 2.プリンター本体の改造

最初に、プリンターの改造を行う上で、極力入手が容易なパーツを選定することとした。

本実験ではエプソン製モノクロインクジェットプリンター PX-S170UT に改造を施した。この機種を選定した理由は、インクの供給方法がエコタンクと名付けられた独特なものであり、別種のインクを充填する際も純正カートリッジを入手して加工するといった手間が不要という点が大きい。また、インクタンクがプリンタヘッド直上にあり流路が短く、インクロスが少ないという点もある。

搭載した UV ランプは QINGYING 製の UV-LED で、36V/50W、紫外光の波長は 395nm である。LED を選択した理由としては、小型・薄型・軽量で搭載しやすい点、エネルギー消費率や寿命などで従来使用されていた MH ランプより優秀だという点がある<sup>(1)(2)</sup>。LED の消費電力については既存の UV プリンターで 50W を選択しているのが多かったため同じ値を選定した。しかし、それ以上の詳細なスペックが得られず実際の紫外線照度は不明であったが、改造し検証することにした。紫外光の波長については、すでに入手済みであった UV 硬化インクの硬化波長に合わせて 395nm と決定した。LED の中でこの機種を選択した理由は、要求されるサイズや出力のものが容易に入手可能だったことが挙げられる。

また、LED の発熱対策として PC に搭載される CPU 冷却用のパーツを流用した水冷式冷却装置を搭載した。空冷式では冷却装置用の十分なスペースがプリントヘッド周辺に確保できず、またヘッド部が重くなりすぎて稼働を妨げる懸念が生じたため、放熱器の位置の制限が

緩い水冷式を選択した。水冷式冷却装置は PC 用パーツの入手が容易であり、要求を満たせる放熱器やポンプを選定した。

設置の際は冷却水が循環する冷却ブロックと LED を放熱用接着剤で接着し、冷却ブロックを 3D プリンターで印刷したプリントヘッドとの接続用のパーツに接着した。その様子を図 1 に示す。また、冷却装置の全体図を図 2 に示す。

LED の設置にあたって、プリンタ一本体に対する不可逆的な改造はなるべく控え、また LED や冷却装置の取り外しも容易に行えるように設置場所を検討した。その結果、取り外しが簡単に行えるプリントヘッドのカバーに LED と水冷用ブロックを固定することとした。その様子を図 3 に示す。

本体の改造箇所は LED や冷却水用チューブの稼働を妨げる壁面パネルやフレームの一部を取り外した点のみである。比較画像を図 4、図 5 に示す。

なお、一部の UV 硬化型インクは常温では粘度が高く吐出ができないことがある。このプリンターの場合、約 6mPa·s を超える粘度のインクを扱う際にはヒーターでの加熱等で粘度を低下させる必要がある<sup>(3)</sup>。

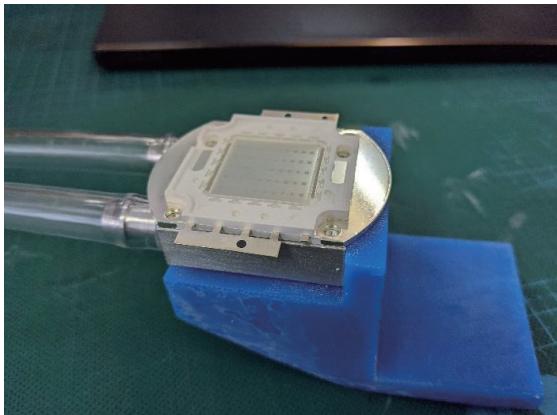


図 1. UV-LED ランプと冷却ブロック



図 2. 水冷式冷却装置の構成

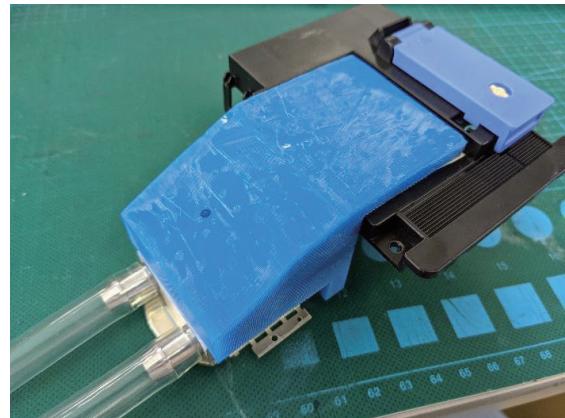


図 3. UV-LED をプリンタヘッドカバーへ装着した様子

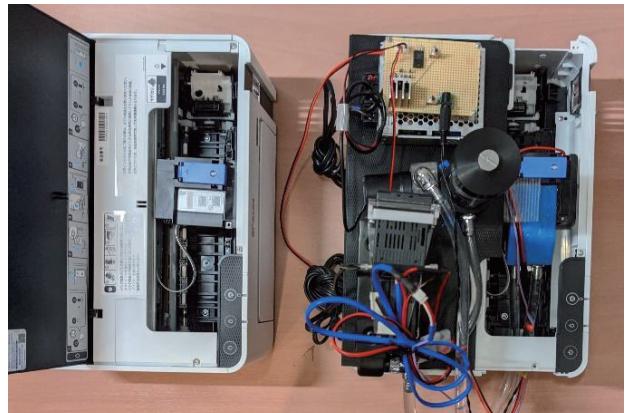


図 4. 改造箇所比較写真・上面 (左: 改造前 / 右: 改造後)

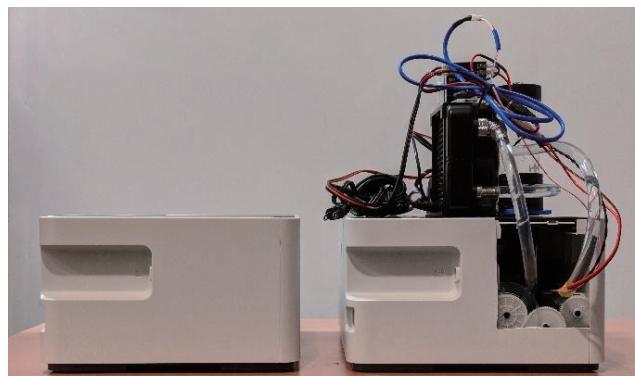


図 5. 改造箇所比較写真・側面 (左: 改造前 / 右: 改造後)

### 3. 実験と結果

本検討において、LED の冷却性能の実験と UV 硬化インクの印刷硬化実験の 2 点を行った。

#### 3.1 LED 冷却実験

##### 3.1.1 実験手順

LED の発熱に対する冷却装置の冷却性能を確認するため、冷却装置を稼働させた場合とさせていない場合について、10 分間 LED を点灯させ LED 部の温度状態を赤外線サーモグラフィ撮影装置で撮影した。

### 3.1.2 結果

実験日の室温は 25°C であった。結果の撮影画像を図 6、図 7、図 8 に示す。冷却装置を稼働させていない場合は連続点灯開始から 5 分後に 60°C を超えたが、その状態から冷却装置を稼働させると 10 秒ほどで 40°C 付近まで低下した。本結果から、冷却性能は十分であることが検証できたが、実用上はさらに小規模の冷却装置でも十分である可能性がある。仮に自然対流の空冷のみで十分であるならばプリンター上部の搭載スペースにも余裕が生まれるため、必要な冷却性能について今後の詳しい検証が必要であると考えている。

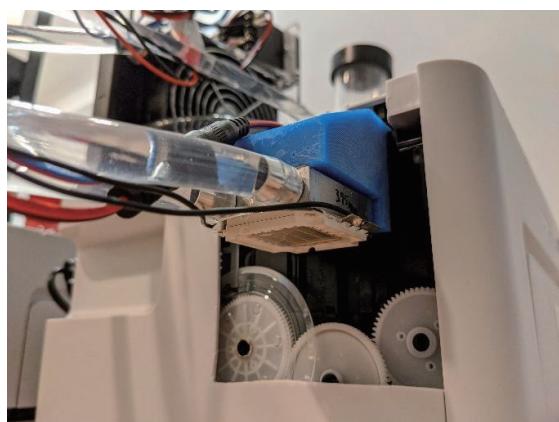


図 6. サーモグラフィ撮影箇所

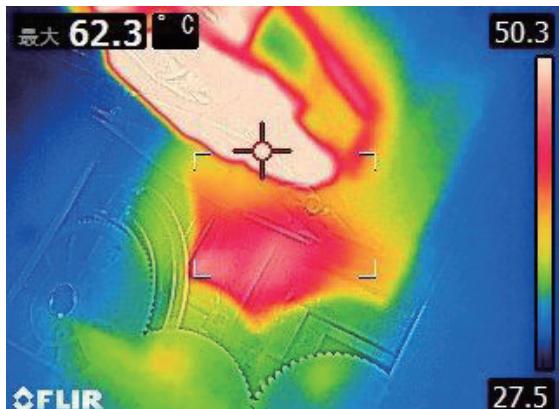


図 7. LED 点灯開始から 5 分後(冷却装置未稼働)

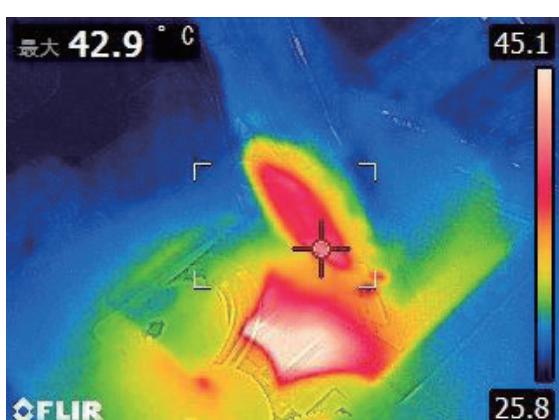


図 8. LED 点灯中(冷却装置稼働開始から 10 秒後)

### 3.2 UV 硬化インク印刷実験

#### 3.2.1 手順

インクジェット用紙と PET フィルムに対して UV 硬化インクの印刷実験を行った。

印刷条件は以下の通りである。

- ・ 印刷品質:きれい
- ・ 印刷紙設定:EPSON スーパーファイン
- ・ その他の設定:初期設定のまま

また、使用した UV 硬化型インクの粘度が約 6mPa·s であったためヒーターを設置<sup>(3)</sup>し、加温して印刷を行うこととした。冷却装置とヒーターを設置したプリンターの様子を図 9 に示す。

#### 3.2.2 結果

印刷中の様子を図 10 に示す。紙への印刷結果を図 11 に、また印刷から 30 分経過後のものを図 12 に、PET フィルムへの印刷の結果を図 13 に示す。

画像にあるように印刷自体には成功し、UV 硬化型インクでも通常のインクジェットプリンターで問題なく印刷できることが分かった。印刷中もヘッド部を稼働させるモーターの脱調など不具合も発生せずに、印刷を終了することができた。しかし、UV ランプを点灯させて印刷してもかかわらず、印刷直後の用紙表面は手で触れて違いが明確にわかるほど硬化した様子はなく、また印刷直後から 30 分後の時間経過でインクが滲むほど液体のままであった。

また、PET フィルムに対する印刷でもパターン印刷されていることが見えるが、こちらも硬化しておらず表面に触るとベタつく程度であった。

これらの結果をまとめると、今回設置した UV-LED ランプではインクの硬化に十分な光量を与えることができないことがわかる。

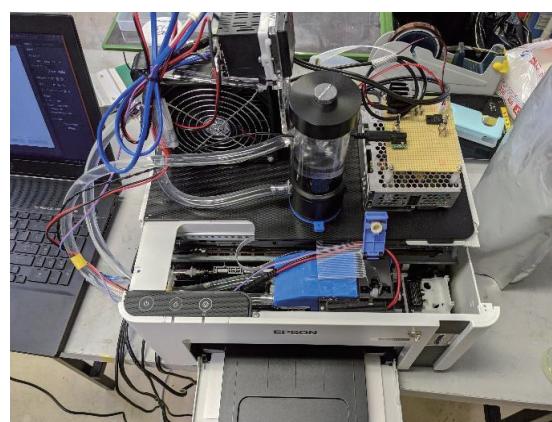


図 9. 冷却装置とヒーターを搭載した様子

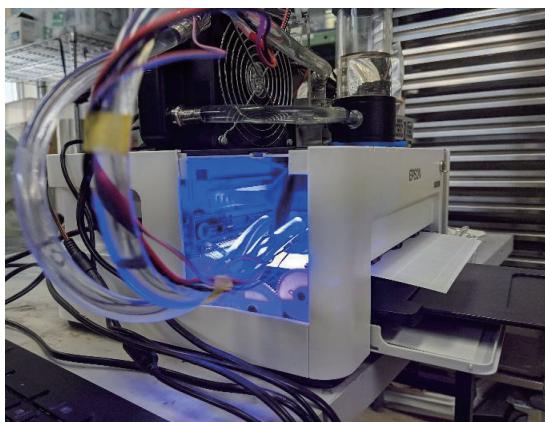


図 10. 印刷中の様子

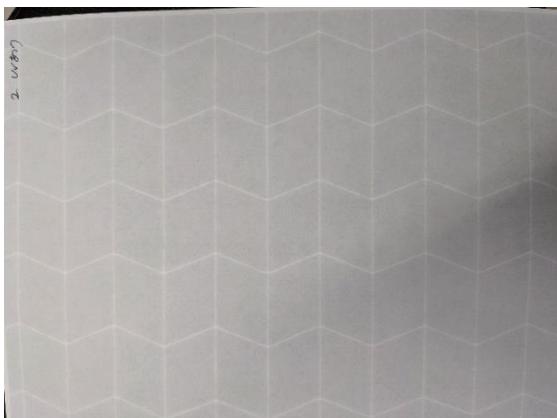


図 11. 紙への印刷結果(印刷直後)



図 12. 紙への印刷結果(印刷から 30 分後)

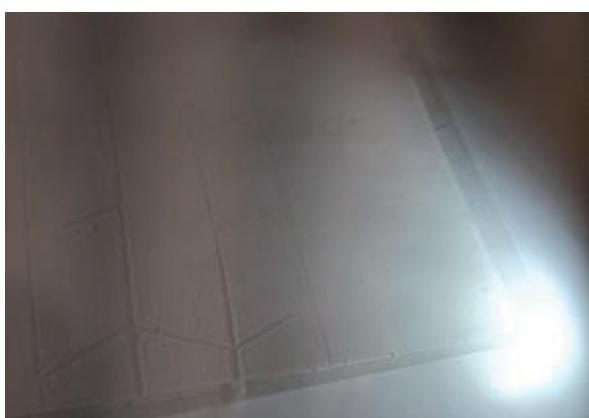


図 13. PET フィルムへの印刷結果

#### 4. 考察

今回使用した UV 硬化型インクと UV-LED ランプの組み合わせでは、硬化させるだけの照射強度と積算光量が足りないことがわかった。今回使用した LED は 40 個が配列されており、1 つ当たり 1W 程度である。インクの硬化に必要な積算光量は、 $500\text{mJ/cm}^2$  であったため、印刷中の時間を考慮しても  $100\text{mW/cm}^2$  程度の照射強度でも十分と考えていたが、結果としては硬化できなかった。理由としては、メディア面までの距離が十分に追い込めていなかったため光量が低下してしまったことや、ピーク照射強度も硬化のためには重要な因子であり、この LED では不足していた可能性が考えられる。

#### 5. 応用事例

UV 硬化型インクと UV-LED の適正化が図れれば、安価な卓上サイズのプリンターで手軽に UV 硬化インクを使った印刷を行えるようになる。素材の一部を硬化させて強度を持たせたり、電子回路のレジストとしての機能を持たせたり様々な用途展開が期待される。また、印刷時の位置合わせも工夫することで、このような卓上印刷機で多重印刷による積層構造を作ることも可能になるかもしれない。

#### 6. 結論

今回の検討では、入手性の良い機材・材料を用いて家庭用プリンターを改造し、UV 硬化型インクの印刷が可能であることが分かった。しかし、今回搭載した UV ランプでは性能が足りず完全硬化はできなかった。完全硬化には、LED を限界までメディアに近づけること、より高出力の UV-LED アレイを搭載すること、インクの光重合開始剤との適正化を図ることが必要である。また、完全硬化させるためには、印刷後に別の UV 照射装置を用いることも検討できる。

#### 参考文献

1. M. Ohnishi et al, "The Development of LED-UV Curing Inkjet Printer UJF-3042 and its Wide Applicable Field", Journal of the Imaging Society of Japan, **51**, pp. 399–406, 2012.
2. A. Tauchi, A. Fujioka, T. mineyama, "Latest Technologies for Ultraviolet Lamp and Modules Corresponding to Various Industrial Applications", TOSHIBA Review, Vol.70 No.11, pp. 20–24, 2015.
3. M. Mori et al, "Attempt to install a heater for adjusting ink viscosity in a household printer", 4DFF 2020 Proceedings, 2020.

# 形状保持・書き換えが可能な面状物体の設計と制御に関する検討

Proposal of design and control of planar objects for repetitive deformation and shape freezing

久保木 仁美, 篠 康明

Hitomi KUBOKI, Yasuaki KAKEHI

東京大学 大学院情報学環・学際情報学府

The Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

## 【要約】

近年デジタルファブリケーション研究の射程は、動きや変化を伴う物体の造形やインターラクションの創出へとさらなる拡張を見せており、造形後の形状変化を可能とする手段として、環境要因に応じて形や体積を変化させる素材を物体に埋め込むという方法がある。これらは物体の表面や内部に自然に機能を埋め込むという点で有効であるが、変化が1度限り、また、繰り返し変形を保つためには外的刺激を加え続ける必要があるなど、制約が多い。そこで本研究では、複数の外的刺激を用いることにより、形状の繰り返し変化を可能とし、さらに変形後、その形状を外的刺激がない状態でも保持できるアクチュエータを提案する。本稿では、構造、製造方法、動作の種類、アプリケーションシナリオの詳細を示す。

キーワード: 形状変化, 形状保持, インフレータブル, テクスチャ

## 【Abstract】

In recent years, the range of digital fabrication research has expanded further to creation of objects and interactions that involves the movement and deformation after fabrication. To enable the "after-deformation", there is a method which embeds active materials whose dimensions and volume change according to environmental factors. The method is effective as the functions are naturally implemented on the surface or inside of the objects. However, there are some restrictions on the repetition of movements. Some objects can change the shape only once, and others need continuous external stimuli for repeated deformations. Therefore, this study proposes an actuator that can repeatedly change the shape by using multiple external stimuli, and can hold the shape after deformation even in the absence of external stimuli. The details of the structure, manufacturing method, operation type, and application scenario are also shown.

Keywords: Shape Changing, Shape Retention, Inflatable, texture

## 1. はじめに

デジタルファブリケーション技術の発展によって、外形のみならず複雑な内部構造や特性の表現、あるいは複数の素材を用いた造形などが可能になってきた。その中でも、4Dプリントなどと呼ばれるように、出力後に用途や状況に応じてさらなる形状変化を許容する物体の造形に注目が集まっている[1]。温度や湿度など周囲の環境の変化に応じて、ものの表面や内部に配された素材が変形を起こす。これらは、物体の中に機械的・電気的な仕掛けを埋め込む必要がないため軽量であったり、物体の柔らかさやしなやかさを保つことができたり、かつ複雑な造形が自律的に組み上がるというメリットを活かして、製造過程の縮小や小さく折りたたむことによる可搬性の向上などの応用領域が探索されている。

課題として考えるのは、従来の環境応答型の手法は、一度変形したら元に戻ることがないという一方向的な変化のみに留まるものが多い。必要な時に必要な形状に変形させ、また元に形に戻して運搬するなど、形状の復元が可能になればその用途は広がるだろう。また、変形のバリエーションについても課題が挙げられる。従来の手法の多くは、初期形状とターゲットとなる形状を決める

のみで、その途中の段階の形状を細かく指定することは難しい。必要に応じて変形の程度を制御することができれば、ものや身体に合わせた変形などがよりスムーズに行えるのではないかと考える。

以上の背景から本稿では環境の温度に応答して形状が変化するものの製造手法の中でも特に、変形途中で必要に応じて変形を止めその形状を保持できる機能、また変形後に形状を元に戻してさらなる書き換えができる機能を有する物体とその変形について提案を行う。

以下はまず関連研究と本研究の位置づけについてまとめ、提案、設計、実装、そしてアプリケーションシナリオについて述べていく。



図1. 変形前(左)と提案手法を用いて保持したオブジェクト(右)

## 2. 関連研究

熱や水分、光などといった外的刺激によって、造形時に素材へプログラムした通りに形状が変化する技術、これらの動作は大きく2種類に分類することができる。

一つ目は、変化の動きが1度きりのものである。A-line[2]では、素材にポリ乳酸樹脂を使用しており、デスクトップ3Dプリンタにて出力される。造形物は熱を加えることで内部応力が働き、出力時に設計した形状へと変形する。また、Totems[3]は、メラニンを封入して作られており、太陽光などの紫外線によって、見た目の色が変化する。いずれも動作は一回きりであり、A-lineについては温めた状態で人の手によって元の形に戻す必要がある。

二つ目は、繰り返しの変形を許容するものである。例えば HygroSkin[4]では、素材に水分によって膨張する素材と変化しない素材を貼り合わせて作られている。これにより、湿度による開閉動作を実現している。この動作は、繰り返し動作することが可能であるが、その動きは周囲の環境に依存しており、変形を保つには水分を与え続けることが必要になる。

上記で述べたように、環境が変わることによる形状変化の動作には制限があるものが多い。変形を許容するために、変形中あるいは変形後に、その形状を固定することができれば、精度の高いインタラクションや目的・ユーザーにあわせた形の書き換えが可能となる。これは機械的制御を用いる点で筆者らの研究とは異なるが、xSlate[6]では、リニアアクチュエータで構成された可変フレームと空気圧によって硬軟が変化する粒子ジャミングを行い、硬度制御可能な可変インターフェースを提案している。ジャミングで面を柔らかくすることで機械的変形を可能にし、面の硬度を上げることで変形後の素材の強度を担保し形状の保持を可能にするという点で考え方方が近い。

今回提案する筆者らの研究では電気や人の手を必要としない、繰り返し変形可能かつ、変形後に外的刺激を取り扱っても形状を保つことができるという点が特徴である。変形のトリガーが異なり、2種類のマテリアルを形状変化と固定に用いることにより、変形後の形状を保持と繰り返しの変形を実現する。

## 3. 提案

上述の通り、今回提案するものは以下の2つの機能を満たす。一つは、変形途中でその変化を止め、以降外部からの刺激を与え続けることなく形状を保持することができる機能である。二つ目は、変形を元に戻し、かつ繰り返しの変形を可能にする機能である。これを、素材自体に機械的・電気的な加工や部品の埋め込みすることなく実現する。

基本構造として、平面の素材に対してパウチを組み合わせる。具体的には変形を担う部分と形状の固定を担う部分の二種類のパウチを配置する。変形部分は、内部

に外的刺激をあたえることによって膨張し、刺激を取り扱うことによって変形が元に戻る素材を内包する。また固定部分には、外的刺激により柔らかくなり、刺激を取り扱うことによって硬くなる素材を内包する。

変形をさせる際には、一旦固定を解除し、変形部分を膨張させることによって形状の変化が可能になる。その後、再び固定することによって、違う形、サーフェスとして形状を書き換えて使用することができる。

図3に、変形用パウチに用いる素材(素材1)と固定用パウチに入れる素材(素材2)の特性の関係をまとめる。素材1および素材2は、温度によって気液あるいは固液相変化を起こす。本手法では素材1の沸点と素材2の融点の違いを利用する。図2のように、素材1と素材2の状態の組み合わせにより、周囲の温度に応じて3つのステートに分けることができる。State1は、素材1が液体かつ素材2が固体の状態。State2は、素材1が液体かつ素材2が液体の状態。State3は、素材1が液体かつ素材2が気体の状態である。図3は温度遷移に伴う状態の変化を示したものである。State3の時、素材2が液体であることと素材1が液体から沸騰し膨張することでパウチの変形が起こる。また、State2のとき、大気圧がないやつより大きくなり変形が元に戻る。このState3へ変形させている状態から、急速にState1へ状態を移すと、素材1が液化する前に素材2が固化することによって変形を止め、その形状を保持することができる。変形の途中でもその形状を保つことができる。

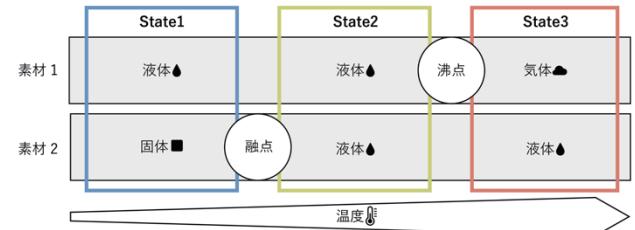


図2. 素材と温度変化

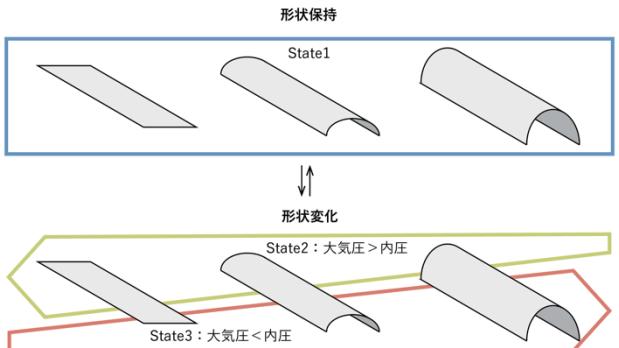


図3. 各 State の状態遷移の様子

(上段は素材2が液化して変形可能な状態、下段は素材2が固化してそれ以上の変形ができず形状を保持する状態)

## 4. 設計と実装

### 4.1 素材の選定

今回の検討では、変形用の素材1にして3M Novec 7100、固定用の素材2としてパラフィンワックスを使用し

たしている。なお、Liquid Pouch Motors[5]の内部には3M Novec 7000が使用されているが、本提案においては、パラフィンワックスとの融点との兼ね合いにより3M Novec 7100を使用した。Novecは通常電子部品の洗浄に使う液体であり、低毒性、引火点なしと安全である。Novec 7100は61度以上で液体から気体へと変化し、パラフィンワックスは60度以上で固体から液体へと変化する。素材1と素材2の状態の組み合わせにより、3つのステートに分けることができる。State1は、素材1が液体かつ素材2が固体の状態。State2は、素材1が液体かつ素材2が液体の状態。State3は、素材1が液体かつ素材2が気体の状態である。

#### 4.2 構造の設計

全体は3層のパウチで構成される。1つ目のパウチには、形状保持の機能のために用いる。2つ目の真ん中のパウチは変形を担う。3つ目のレイヤーのパウチは空気を注入する。この3層のパウチを重ねたものを面状の素材として用いる。詳細は以下に述べていく。

#### 4.3 変形用パウチの検討

本提案の面状素材の設計とファブリケーションの方法として、図3にその手順を示す。はじめに、熱で融着する3枚のフィルムをヒートシーラーないしは、CNC制御されたハンダゴテ[5]を使い、接着する。これによりフィルムで覆われた2つの空間ができた状態になる。この一方に変形用の液体であるNovec7100を入れ、もう一方に固定用の液体であるパラフィンワックスを注射器にて注入する。その後、液体を入れた箇所をヒートシーラーで閉じる。

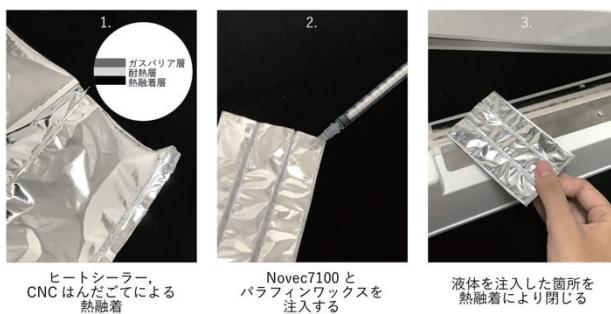


図3. ファブリケーション手順

この際、[5]の先行研究にて、パウチに注入するNovecの量は以下の式で求めることができると報告されている。求める液量を $V_1$ とし、常温常圧の時、絶対温度 $T=273K$ 、動作に必要な空気圧 $P=1013 \times 10^2 + 100 \times 10^{33} Pa$ 、 $RT/P=22.4 \times 10$ 、Novec7100の物性値である $M=200.0548 g/mol$ 、液体の密度 $\rho=1400 kg/m^3$ と、パウチのサイズの横幅 $L_0=0.020 m$ 、縦幅 $D=0.060 m$ を(1)の式に代入し、もとめられる液量は $98.10 \mu ml$ である。

$$V_1 = \frac{M}{\rho} \frac{P}{RT} \frac{L_0^2 D}{\pi} \times 10^{-3} \quad (1)$$

#### 4.4 形状保持用パウチの検討

形状を保持するために、60度以下で固形になる油脂を使用している。少ない量の油脂でより強固に形状を留めるためにガラスファイバーを用いた。用いた手法としては、含浸処理と呼ばれるものである。含浸処理とは隙間のある構造物に樹脂を染み込ませて固める成形方法であり、この処理を施すことによって強度が高く軽量のものになる。図4がガラスファイバーに油脂を浸透させた様子である。

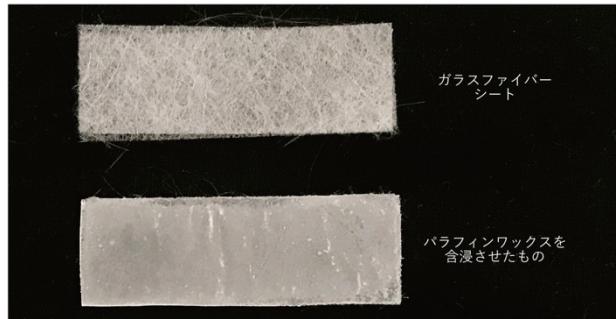


図4. ワックスをファイバーに含浸処理を施したもの

#### 4.5 アクチュエータの成分比率

本提案の形状固定は、気化にともなう堆積膨張によって変形したパウチを、油脂が固定することによって実現している。変形する素材が液化するよりも早く、油脂が固化する必要がある。ここで検討したのは、マテリアル、Novec7100・水の比率である。変形に要した時間を比較したものが以下の表1である。

表1. 横幅20mm 縦幅60mmのパウチにおける  
マテリアルの混合比率・変形所要時間

温度 °C	65							
	混合比率 (Novec: 水)	1:0	1:1	1:2	1:5	1:10	1:20	1:30
所要時間 sec	1.0 以下	1.0 以下	1.3	3.2	5.6	9.4	12.2	15.3

油脂が、同じ条件で溶けるまでにかかった時間が、10.3秒であることより、Novecと水の比率は1:20が適当である。

#### 4.6 空気層の追加による冷却速度の調整

上記のNovecのパウチへの水の添加による気化速度の調整に加えて、今回の設計では一番上の層のパウチに空気を注入する。これは、真ん中の層に注入されているNovecへの熱の伝達を遅らせ、ワックスの相変化との時間差を生むためである。

#### 4.7 結果

実際に実装した結果を図5に示す。常温の状態から61度以上まで加熱し、変形後、様々な温度の空間に充分に置いたものである。写真は常温の状態で撮影した。冷やす速度によって形状の変化の大きさが違うことがわかる。

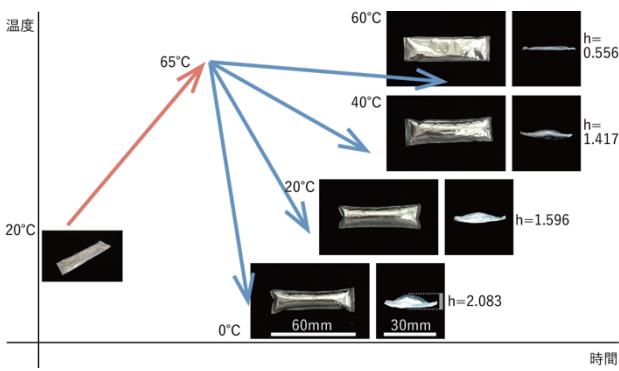


図 5. 実装した素材とその変化の様子

## 5. アプリケーションシナリオ

本提案は、周囲の温度変化によって形状が変化を保存・書き換えをすることができる。形状保持ができると、変形を保ちながらものを別環境へ移動することが可能になる。また書き換えることで、複数のユーザー、目的に対応した提案ができると考える。2つのアプリケーションシナリオを検討している。まず一つ目に、ユーザの体型や好み等に合わせて、モノの形を都度調整したいようなシーンにおける利用である。例えは、ファッショニアアイテムなどを複数人で共有している際に、装着するユーザに応じてその形状を段階的に変更することができる。面形状の素材を活かして、ファッショングへの応用を目指したい。そして2つ目がマルチペーパスの事例の提案である。今回の基礎的な実装では、一様に熱をかけ、また一様に冷却することにより形状の書き換えや保持を試みたが、局所的に加熱・冷却するような手段と組み合わせると、より多様な形状を構成することができる。Shape-Changing Interfacesと呼ばれるような状況や機能に応じて形状を変化させるインターフェースへの応用を目指し、より複雑な形状変更の可能性を探求する。

## 6. 結論

本稿では、新たな形状変化の動き、周囲の温度をコントロールすることで変形を任意の状態で留め、繰り返し変形する、という新しい形状変化を提案した。複数の素材を使うことで、また外的刺激の加え方を制御することで、実現している。

それぞれのパウチに用いる素材は今回の実装で用いたものに留まらず、目的に応じて温度域の違う素材を使用することが可能である。変形させるための素材として、沸点が61度のNovec7100を用いたが、NovecシリーズのNovec7000(沸点34度)やNovec7200(沸点76度)など他の温度域も使用することができる。また、パウチの変形をさせるための素材として、融点が60度のパラフィンワックスを使用したが、ココナッツオイル(融点25度)など温度が違うものを利用することが可能である。したがって、アプリケーション、使用シーンにあわせて異なる温度での駆動ができる。環境を利用した形状変化の実用性向上、応用範囲の拡大に期待ができる。

一方課題として、パウチの温度をコントロールする必要があり、制御の難しさがある。パウチに回路を貼り付けて発生する熱を利用することや、また機会的に制御をすべくペルチェ素子を使用することなど、環境を整えることによって更に詳細に形状を設定することが可能だろう。また、本稿ではパウチの中に数種類の液体とガラスファイバーシートを封入したことにより、Liquid Pouch Motors[5]の紙のように薄く軽くという特性は持ち得ていない。今後、層構造を構成するための素材や製造手法についても改善をすすめ、素材性を活かしつつ複雑な変形が可能なアクチュエータとして検討を進める。

## 謝辞

本研究は、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト(JPMJER1501)の支援を受けた。

## 参考文献

1. F.Momeni et al., A review of 4D printing, Materials & Design, Volume 122, 2017, Pages 42-79,
2. G.Wang et al., A-line: 4D Printing Morphing Linear Composite Structures, CHI '19, Paper No.: 426, Pages 1-12
3. S.Sharma, Totems Designed for Broken Nature: Design Takes on Human Survival, Design Indaba conference, 2018
4. A.Menges, S.Reichert, Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects, ICD, 2012
5. N.Koya et al., Liquid Pouch Motors:紙のインターフェースのための薄く軽く柔軟なアクチュエータ, WISS'18, 2018

# トレーシングペーパーへの防水加工による吸湿変形の制御と表現

A Control Hygroscopic-morphing and Expression of Tracing Paper by Waterproofing

高橋 明日香, 西條 瞳, 渡邊恵太

Asuka TAKAHASHI<sup>1</sup>, Hitomi NISHIJO, Keita WATANABE

明治大学

Meiji University

## 【要約】

トレーシングペーパーは湿気を吸収しやすく、湿気を吸収すると膨張し丸まる吸湿変形特性がある。本研究では、トレーシングペーパーの吸湿変形特性を用いた、動的なディスプレイ表現手法を探査する。トレーシングペーパーの変形は比較的単純であるため、防水加工を施すことによりその変形の制御を試みる。本稿では防水加工を複数パターン施し、湿度との関係性から変形の大きさや丸まり方の違いなどを検証し、制御性やアプリケーション例、そして制御のためのエディタについて議論する。

**キーワード:**トレーシングペーパー, 防水加工, 吸湿変形, ディスプレイ, 表現

## 【Abstract】

Tracing paper has a hygroscopic-morphing characteristic, which means that it absorbs moisture easily and curl up by the expansion of it. In this study, we explore a dynamic display method using the characteristic. Since the morphing of tracing paper has a limited range of expression, we attempt to control it by waterproofing. Here, we examined how the amount of the morphing and the form of curvature change with humidity depending on multiple waterproofing patterns and discuss the controllability, application examples, and the editor to control it.

**Keywords:**tracing paper, waterproofing, hygroscopic-morphing , display, expression

## 1. はじめに

トレーシングペーパーは湿気を非常に吸収しやすい。湿気を吸収すると、吸収しやすい面が膨張し、丸まるように変形する。元々木材纖維製の紙には吸湿・放湿によって伸縮する性質があるが、トレーシングペーパーは一般上質紙に比べてより大きく伸縮する[6]。また、一度変形しても、放湿すればまた同じように変形できる。

この性質により、掌など放湿するものの上に置くだけで、数十秒でトレーシングペーパーを変形させられる(図 1a,b)。これを活用すれば、例えば台紙に切り込みを入れたトレーシングペーパーを貼ることで、掌の上で徐々に立ち上がるポップアップカードを作成できる(図 1c)。また、切り込みの入れ方次第で様々な表現が可能である。しかし、切り込みの入れ方だけでは変形の大きさや速さを変えられないため、表現の幅が不十分である。

本論文では、吸湿量との関係性に関する簡易的な実験を行い、防水加工パターンによって表現の幅を広げる提案と評価を行った。その結果を元に、応用表現やエディタについて議論する。



図 1. (a)掌に置いた直後 (b)約 30 秒後 (c)特性を使った例

## 2. 関連研究

デジタル工作機器の発展とともに、加工する素材に

着目し、造形物に新たな性質を付与するマテリアル研究が盛んである。中でも、Tibbits[5]によって提唱された、時間経過に伴い熱や光などの条件によって形状を変化させる 4DPrinting に関する研究が多く報告されている。

Ge ら[4]は、マルチマテリアル 3D プリンタによって、関節部分に形状記憶ポリマを使用した加熱による自己折り畳みシートを作成した。An[1]らは、熱可塑性樹脂を使い、任意の角度での曲面的な自己折り畳みを可能にした。Yao ら[3]は、相対温度に応じて膨張・収縮する納豆菌の性質を利用したバイオフィルムを提案している。

これらは、2 次元の紙状物体を 3 次元形状に変形させるため、コスト削減やプロトタイピング高速化に繋がるだけでなく、変形の動きを利用して表現メディアにもなり得る。本研究では、マテリアルを紙状に造形せず、紙本来の性質による変形を試み、表現への応用を目指した。

## 3. 吸湿量との関係性調査

トレーシングペーパーの変形と吸湿量の関係性を調査するために、簡易的な実験を行った。吸湿量を直接計測・制御するのは難しいと判断したため、今回は異なる温度の湯の蒸気を当てて実験した。本論文の実験では、全て KOKUYO のインクジェット用トレーシングペーパー( $75\text{g}/\text{m}^2$ )を用いた。

### 3.1. 実験環境・方法

70mm 四方のトレーシングペーパーに、伸縮しやすい向きに立ち上がるよう一辺を残して 50mm 三辺の切

り込みを入れ、外周を 70mm 四方の台紙と貼り合わせた(図 2a). そして、湯を張った鍋の上にガーゼを張り、その上に台紙つきのトレーシングペーパーを置いた(図 2b). 湯の温度は低温調理器で制御し、40°C・45°C・50°C の 3 条件をそれぞれ 3 枚回ずつ、変形の違いを観察した。また、真横から水平に実験中の動画を撮影し、後ほど動画を分析することによって、40 秒間 10 秒ごとの切り込み部分の高さと横幅を計測した(図 2a). 実験中の室温は約 24.1°C で相対湿度は約 57.9% であった。

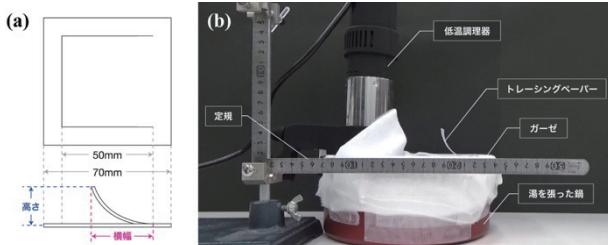


図 2. (a)切り込みと高さ・横幅の関係 (b)実験の様子

### 3.2. 実験結果・考察

湯の温度ごとの平均の高さと横幅を図 3・図 4 に示す。また、湯の温度ごとの詳細なグラフは図 5 に示す。

高さの結果を見ると、湯の温度が高い方が高さも高くなる傾向があった。横幅の結果を見ても、湯の温度が高い方が横幅が小さくなっている。高さと横幅の湯の温度ごとの差を比べると、横幅の方が高さよりも差が大きい。これは、トレーシングペーパーが平らなまま立ち上がりらず、丸まるように立ち上がるため、大きく立ち上がっても高さが出にくいためだと推測する。50°C のときには切り込みの根本を超えて立ち上がり、横幅の値がマイナスになることもあった。また、40°C と 50°C では 40 秒時点、45°C では 30 秒時点で、横幅の値が増加している。観察より、これは最大まで立ち上がった後に少し元に戻る動きをしていたからであった。さらに、実験全体を通して、トレーシングペーパーはひらひらと上下を繰り返しながら変形していたのが特徴的だった。

実験の結果より、湯の温度を調整することで、変形の大きさをある程度制御できることがわかった。また、ひらひらと動きながら変形するため、生物的な表現が可能であると考える。しかし、標準偏差が大きいこと、そしてサンプル数が少ないとこには注意が必要である。

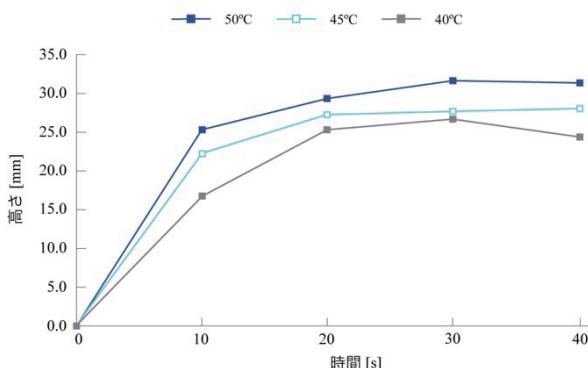


図 3. 湯の温度ごとの高さの推移

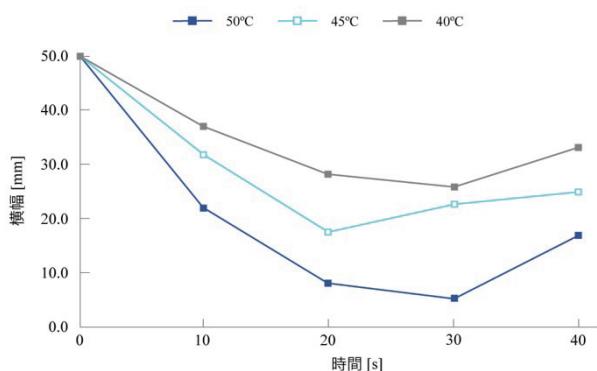


図 4. 湯の温度ごとの横幅の推移

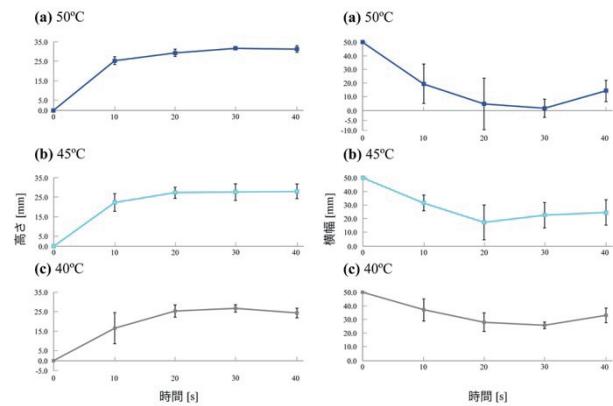


図 5.湯の温度ごとの高さと横幅遷移詳細

### 4. 防水加工

前章の実験により、湯の温度が高いほど切り込みが立ち上がり、大きく変形することがわかった。しかし、複数のトレーシングペーパーの一つ一つの変形の大きさを変えたい場合、それぞれ異なる蒸気を当て分ける必要がある。また、切り込みを入れた部分は全て丸まってしまうため、丸めたくない部分があるような表現は難しい。

そこで、トレーシングペーパーに防水加工を施すことによって吸湿量を減少させ、変形の大きさや丸まり方を変化させる方法を提案する。予備実験として、ドットや波線など様々なパターンを掌の湿気で試した後、大きな差異があった縦縞状の防水加工について、縦縞の幅を変化させることでトレーシングペーパーの変形にどのような変化があるのかを観察する簡易的な実験を行った。

#### 4.1. 実験環境・方法

図 6a のように、防水加工なし、切り込み全面防水加工、1mm おきの縦縞防水加工、5mm おきの縦縞防水加工、10mm おきの縦縞防水加工の全部で 5 パタンのトレーシングペーパーを 3 枚ずつ用意した。トレーシングペーパーや台紙、切り込みのサイズは前章の実験と同様である。防水加工には、和信ペイント株式会社の一般木工作用水性ニスを 2 倍に希釀したものを用い、シリアル通信で制御可能なペンプロッター(AxiDraw V3)にベクターデータを送ることで制御を行った(図 6b)。通常のニス塗り工程に則り、防水加工は 2 度行った。そして、前章の実験と同様の実験装置を用い、低温調理器で

36°C に設定した状態で、各条件の変形の違いを観察した。また、こちらも前章の実験と同様に実験中の動画を撮影し、分析した。実験中の室温は約 22.8°C で相対湿度は約 40.0% であった。

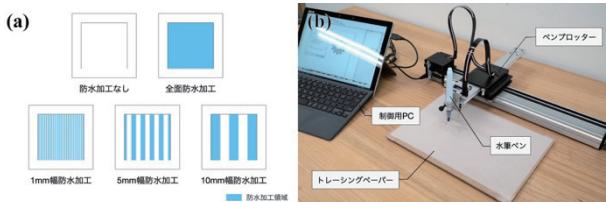


図 6. (a) 防水加工パターン (b) 防水加工の様子

#### 4.2. 実験結果・考察

各パタンでの平均の高さと横幅を図 7・図 8 に示す。また、各パタンの詳細なグラフは図 9 に示す。

高さの結果を見ると、防水加工をしたものの方が、していないものに比べて常に高さが低いままである。変化量で比べると、防水加工をしていないものはグラフが上に凸に近い形だが、防水加工をしたものはグラフが下に凸に近い形をしているものが多い。これは、吸湿量の減少によって変形に背く力が、時間と共に小さくなるためだと推測する。また、30 秒時点までは防水加工幅が広くなるほど値も小さくなるが、40 秒時点では 10mm 幅の値が 5mm 幅の値よりも大きくなっている。これは、防水加工による変形に背く力が小さくなったとき、10mm 幅の方が防水加工をしていない変形しやすい部分の 1 縞分の幅が広いためだと推測する。さらに、1mm 幅と 5mm 幅では防水加工をした総面積は等しいが、高さの値に大きな差があるため、防水加工面積の割合だけでなく、縦縞の幅や間隔が高さに関係していると言える。

横幅の結果を見ると、こちらも防水加工をしたものの方が、していないものに比べて常に横幅の値が大きく変形が小さい。5mm 幅、10mm 幅、全面加工の値の差は常に 3mm 以内に収まっており、高さの結果よりも差が小さい。これは、防水加工による吸湿量減少に加え、防水加工をした部分が硬くなり丸くなりにくくなっていため、防水加工をしていない部分の 1 縞分の幅が狭いほど高さが出やすかったからだと推測する。観察より、特に全面防水加工をしたものは、防水加工をしていないものに比べて、丸まりが小さく真っ直ぐと立ち上がる傾向にあった(図 10)。また、1mm 幅の値は防水加工をした他のものに比べて全体的に値が小さく、変形が大きい。高さの結果と同様に、防水加工面積の割合だけでなく、縦縞の幅や間隔が横幅に関係していると推測するが、5mm 以上の幅ではその傾向が小さかった。

実験の結果より、防水加工をする縦縞の幅や間隔を調整することで、10mm~20mm 程度の高さや横幅の制御ができる可能性がある。また、防水加工によってトレーシングペーパーの丸まりを抑えることができることがわかった。しかし、標準偏差が大きいパタンがあること、そしてサンプル数が少ないとには注意が必要である。

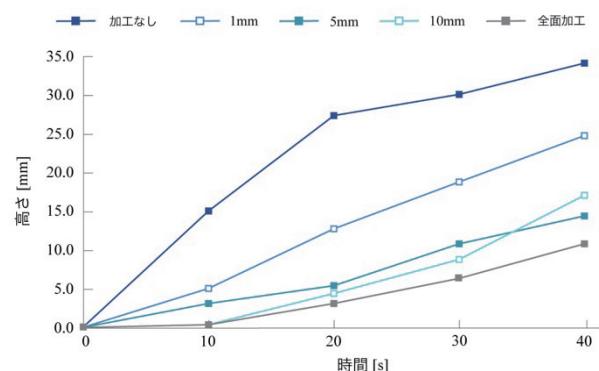


図 7. 防水加工パタンごとの高さの推移

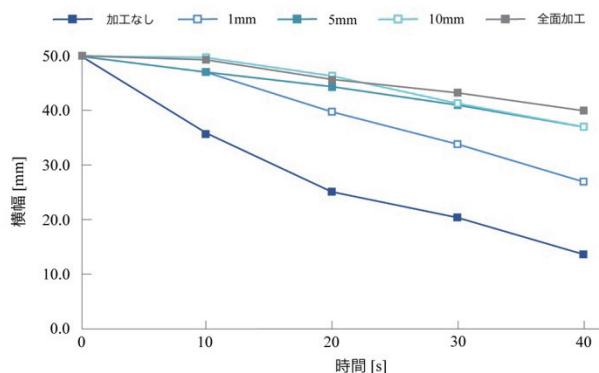


図 8. 防水加工パタンごとの横幅の推移

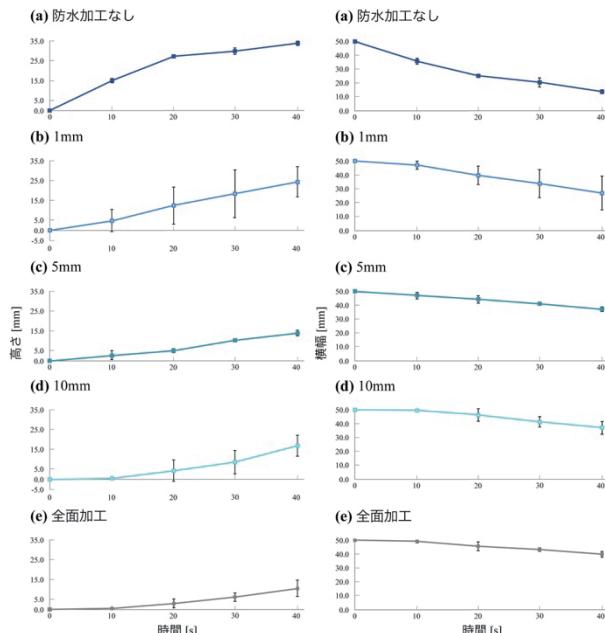


図 9. 防水加工パタンごとの高さと横幅遷移詳細

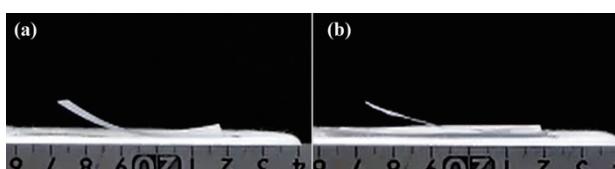


図 10. 丸まり方の違い (a)防水加工なし (b)全面防水加工

## 5. アプリケーション例

トレーシングペーパーの性質や防水加工による特性を活かした表現例を3つ紹介する。以下の例では絶対湿度や温度の制御はしていないが、現在これらを制御して魅せる表現ディスプレイとしての水槽型装置を作成中である。

### 5.1. 防水加工で立ち上がりに時間差をつけた表現

防水加工のパタンで立ち上がりの速さが変わることを利用し、インスタントラーメンの上に置くと、切り込みの立ち上がりで現在の麺の硬さの目安を提示する蓋を作成した。「Normal」には縞状に、「Firm」には全面に防水加工を行った(図 11a)。

### 5.2. 防水加工での変形の違いを利用した表現

防水加工で変形の大きさや丸まり方が変わることを利用して、花弁の部分は丸く大きく変形し、がくの部分は花弁より変形が小さく丸まりが少ない花を作成した。台紙付きのがくの部分に防水加工が施されており、がくの真ん中に上から花弁の中心部を貼り付けた(図 11b)。

### 5.3. 一斉にひらひらと動かす表現

ひらひらと動きながら変形することを利用して、蒸気を当てるごとに静まっていた蝶の群れ(図 10c)が一斉にはためき始める(図 10d)例を作成した。蝶の胴体の部分を台紙にピンで留めている。ディスプレイと組み合わせれば、日中になつたら一斉に動き出すような表現にも応用できる。

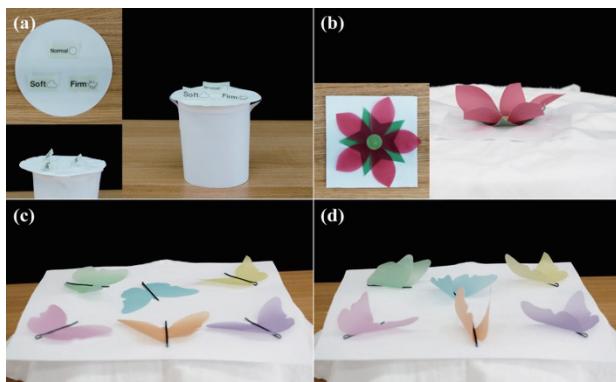


図 11. アプリケーション例

## 6. 議論

### 6.1. 制御性・精度

本論文で実施した簡易的な実験より、ひらひらと揺れながら変形する性質から標準偏差が大きく、厳密な制御には向かないことがわかった。しかし、湯の温度や防水加工パタンによってある程度の制御は可能なため、表現として利用するには問題ないと考える。

また、3章の実験において湯の温度条件を変更していたが、これに伴う変化の要因が絶対湿度なのか、そ

れとも温度なのかが分離できていない。そのため、現在要因を分離するための実験を計画している。

## 6.2. エディタ

パーソナルファブリケーションの文脈において、専門的な知識や手作業での微調整を必要としなくても、誰でも簡単に変形をデザインできるようにする必要がある。そのため、将来的にはスケッチを描いて、シミュレーションしながらパラメータを変更するだけで、設計図が 출력されるようなエディタが必要だと考えている。エディタ作成のためには、変形の要因の分離や詳細なパラメータ探索などが今後の課題となる。

## 7. おわりに

本論文では、トレーシングペーパーの吸湿変形特性に着目し、表現へ活用を目指して吸湿量との関係性調査や、防水加工の提案・評価を行った。また、これを踏まえて応用表現やエディタについて議論した。

今後は、変形の要因の分離をし、吸湿変形特性を表現にどのように応用できるのか、表現メディアとして使用する場合の要件の検討や可能性・限界を継続して模索していく予定である。また、水槽型装置を作成し、魅せる表現ディスプレイに応用することも目標としている。

## 参考文献

1. 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 Yao. 2019. “Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces.” In *Proceedings of CHI’18*, No.260, pp.1-12.
2. E. Reyssat and L. Mahadevan. 2011. “How we paper curls.” *EPL (Europhysics Letters)*, Vol.93, No.5, 54001.
3. Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, and Hiroshi Ishii. 2015. “BioLogic: natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces.” In *Proceedings of CHI’15*, pp.1-10.
4. Qi Ge, Conner K Dunn, H Jerry Qi, and Martin L Dunn. 2014. “Active origami by 4D printing.” *Smart Materials and Structures*, Vol.23, No.9, 094007.
5. Skylar Tibbits. 2013. “The emergence of “4D printing”.” *TED Talk*. Retrieved from [https://www.ted.com/talks/skylar\\_tibbits\\_the\\_emergence\\_of\\_4d\\_printing\(2020/09/14\)](https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing(2020/09/14)).
6. 永井輝夫, 1979, 「トレーシングペーパー」, 『繊維学会誌』, Vol. 35, No.5, pp.140-143.

# ゲルを用いた摺動デバイスの研究

Research on Sliding Devices Using Gel

佐藤 大介<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Daisuke SATO<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

一軸偏心ねじポンプは高粘度流体や固体懸濁液、研磨性の高い泥状液などの定量移送を可能とする。しかし、移送粒子への損傷を抑制する利点を持つが、継続的な摺動による金属の摩耗がポンプ寿命を低下させてしまうことが知られている。金属を代替するポンプ材料の候補として形状記憶ゲルが挙げられる。この形状記憶ゲルは弾性の温度依存性があり、常温時は硬く、高温時に柔らかくなる性質をもつ材料である。本研究は形状記憶ゲル材料による一軸偏心ねじポンプのステータの3次元造形の手法を検討し、移送物質に対するロータとステータとの間に発生する摩擦及びトルク特性を分析する。

キーワード: 3D モデリング、形状記憶ゲル、摺動、容積式ポンプ

## 【Abstract】

Mono pump enables the quantitative transfer of high-viscosity fluids, solid suspensions, and highly abrasive muddy liquids. Although it has the advantage of suppressing damage to the transferred particles, it is known that metal wear due to continuous sliding shortens the pump life. Shape memory gel is a candidate for pump materials that can replace metals. This shape memory gel is elastic and temperature-dependent, and it is hard at room temperature and soft at high temperatures. In this study, we will develop a stator for a mono pump using a shape memory gel material and analyze the correlation between the transferred material and the torque and friction generated during sliding.

Keywords: 3D modeling, shape memory gel, sliding, positive displacement pump

## 1. はじめに

一軸偏心ねじポンプは、移送流体の吐出量を回転数で制御でき、流体粒子への損傷が少ないという利点をもつ。医療分野において小児科用人工心臓の血液移送ポンプに採用しようと研究が進められている。しかし、一軸偏心ねじポンプは移送流体の液温や外部環境の気温に起因するステータの膨張及び収縮が生じる。ステータが大きく膨張すると、内部を摺動するロータとの摩擦が発生してしまい、ロータおよびステータの両方が摩耗してポンプ寿命の低下を引き起こす[1]。堀江らはステータとロータの隙間を設けることでこの課題を克服する手法を報告している[2]。

本研究では、一軸偏心ねじポンプ摺動部での摩擦損失を減少させるため、低摩擦性をもつ高分子ゲル材料に着目する。高分子ゲル材料の一つである形状記憶ゲル[3][4]は常温時に硬く、高温時には柔らかくなる性質をもつ。この形状記憶ゲルを用いることで移送流体の温度で適応的に物性が変化する一軸偏心ねじポンプのステータを開発することが可能である。堀江らを参考にロータとステータの間に隙間を設け、モデリングを行い、隙間にゲル材料をコーティングすることによる摩擦

の抑制方法を検討する。形状記憶ゲルステータを3次元造形する方法はDLP方式3Dプリンタとシリコーン型造形がある。本稿は両者の造形方式による、形状記憶ゲルのステータの造形精度を検証し、移送流体に対するポリ乳酸樹脂製のロータとの回転で生じる摩擦およびトルクを測定することで一軸偏心ねじポンプのゲルステータの有用性について議論する。

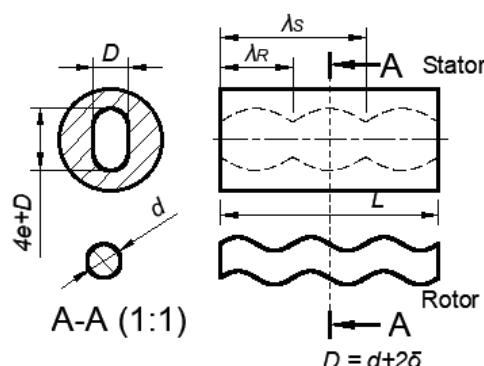


図 1. 一軸偏心ねじポンプのロータ・ステータ

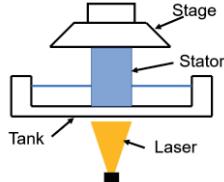


図 2. DLP 方式 3D プリンタの造形の様子

## 2. 一軸偏心ねじポンプの構造・材料

前述のとおり、ステータ材料には形状記憶ゲルを採用する。形状記憶ゲルは温度応答性を用いて形状を記憶させることを可能にした高分子材料であり、ある一定温度に上昇させることにより形状を復元・変形させやすくすることができ、温度を下げることにより形状を保持することができるという特徴をもつ。ステータは内部の寸法が重要であるため、形状記憶ゲルは膨潤しにくい組成を用いて作製した。モノマーである  $N,N'$ -ジメチルアクリルアミド(DMAAm)を 0.7mol/L、アクリル酸オクタデシル(SA)を 0.3mol/L の割合で攪拌させ、架橋剤として  $N,N'$ -メチレンビス(アクリルアミド)(MBAA)を 0.00057mol/L、開始剤としてジフェニル(2,4,6-トリメチルベンゾイル)ホスフィンオキシド(TPO)を 0.0045mol/L、吸収材として AS150 を混合させ精製水を入れず溶液を作製した。

一軸偏心ねじポンプの構成は 1 条の雄ねじにあたるロータと 2 乗の雌ねじにあたるステータからなっており、ステータの中にロータが差し込まれると、その隙間に「キャビティ」という独立した一連の密閉空間が形成される。ロータは自転すると同時にステータ中心に対して偏心量を半径として自転とは逆方向に公転する。キャビティ内に吸い込まれた液体は、密閉された空間ごと、吐出方向へ連続移送されることになる。キャビティの断面積は一定であるため、吐出される量も常に一定となるという特徴を持っている[5]。

図 1 に一般的な一軸偏心ねじポンプのロータおよびステータの概略図を示す。 $d$  はロータ直径、 $D = d + 2\delta$  はステータ内径、 $e$  は偏心量、 $\lambda_R$  はロータピッチ、 $\lambda_s$  はステータピッチ、 $L$  はステータの長さである。本研究で使用するポンプは  $d$  を 7.0 mm、偏心量  $e$  に対する偏心率  $\varepsilon (= e/d)$  を 0.2 とする。ロータピッチ  $\lambda_R$  は 15.0 m m、ステータピッチ  $\lambda_s$  は 30.0，ステータ段数  $s (= L/\lambda_s)$  は 1.5 とした。またロータとステータとの隙間幅  $\delta$  は 0.1mmとする[6]。

ロータは積層式 3D プリンタによるポリ乳酸樹脂を用いて造形を行い、ステータは DLP 方式 3D プリンタ(Phrozen Shuffle)による造形シリコーンゴム(Ecoflex00-30)による型にゲル材料を流し込み UV 硬化させることで造形する、2 種類の造形法を行った。DLP 方式 3D プリンタはタンク内に溶液を入れ、下部からレーザーを照射することによって溶液を硬化させていく造形法であり、造形物はステージに造形されていく。その様子を図 2 に示す。

表 1. 造形結果

Modeling method	3D print		Mold	
	Cure time (s)	30	90	
Side view				
Bottom view				
Top view				

表 2. 測定寸法および相対誤差

	30s	90s	Mold
$D$ [mm]	5.98	6.66	7.26
Bottom	[−16.9 %]	[−7.5 %]	[0.83 %]
$4e+D$ [mm]	11.30	11.41	12.84
Bottom	[−11.7 %]	[−10.9 %]	[0.31 %]
$D$ [mm]	8.87	7.36	7.43
Top	[23.2 %]	[2.2 %]	[3.2 %]
$4e+D$ [mm]	13.46	13.62	12.87
Top	[5.2 %]	[6.4 %]	[0.55 %]
$L$ [mm]	46.62	47.25	45.48
	[3.6 %]	[5.0 %]	[1.1 %]

※ [ ] is relative error

## 3. 結果

### 3.1 寸法精度

Phrozen Shuffle を用いて造形を行った結果と型による造形の結果を表 1 に示す。Phrozen Shuffle の設定はレイヤ厚さを 100  $\mu\text{m}$  とし硬化時間は 30s・90s の 2 パターンを試した。また、計測した寸法および相対誤差を表 2 に示す。

表 1, 2 において 30s のステータを観察するとステージに接着していた面は、設定寸法より一様に寸法が減少しているのに対し、ステージに接着していない面、つまり最後に造形された面は穴の部分が楕円状に広がってしまっていた。また、内部の特徴的なスクリュー状の穴には凹凸が目立ち、ロータを入れ手動で回転させると抵抗感が感じられた。

次に 90s のステータを観察するとステージに接着していた面は、形状こそやや歪になってしまったが寸法は 30s の時ほど減少は見られなかった。最後に造形された面は穴の部分も含め寸法が出ていた。しかし、常温では硬いはずの SMG であるが最後の 1/5 ほどは柔らかく

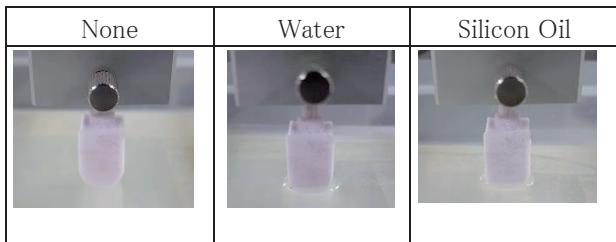


図 3. 測定時の様子

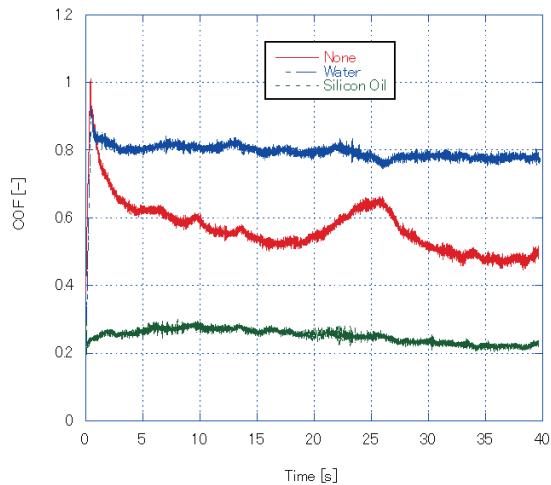


図 4. 測定した摩擦の時間変化

表 3. 動摩擦係数および標準誤差

	None	Water	Silicon oil
Dynamic friction coefficient	0.605	0.791	0.260
Standard error	$5.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$8.6 \times 10^{-3}$

予想していた SMG の硬さを持っていなかった。最後に型でのステータを観察すると、全体的に Phrozen Shuffle で造形したステータと比較し、相対誤差を抑えることができている。内部の穴はロータを違和感なく回すことができていた。上面は UV 照射時に液面側であり、ややへこみが見られた。また、シリコーンゴムの型を積層式 3D プリンタで作製した型で造形したため、積層痕がシリコーンゴムおよびステータにもついていた。3 種類の造形を比較し、トルク試験で用いるステータは型で造形したものとした。

### 3.2 界面流体におけるステータ・ロータ間の摩擦特性

形状記憶ゲルとポリ乳酸樹脂の摩擦を評価するためには摩擦試験機(トライボマスター  $\mu$  V1000)を使用する。板状にした形状記憶ゲルの上に、ポリ乳酸樹脂の治具を押し当て摩擦を測定した。測定条件は移動速度 0.5 mm/s、垂直荷重 300 g、移動距離 20 mm に設定した。

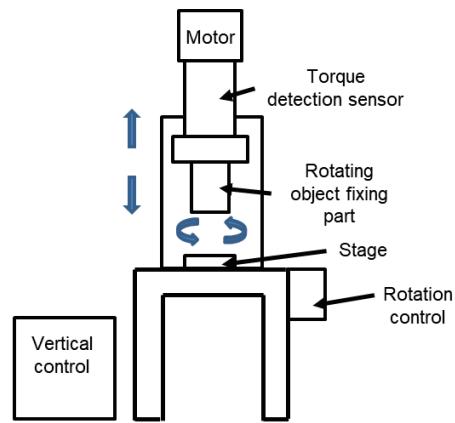


図 5. 上下回転型試験機概要

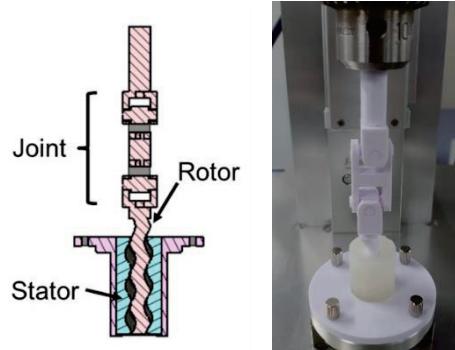


図 6. ロータとステータの3D 断面データ、装置に取り付けた様子

摩擦測定は界面流体がない場合、界面流体として水・シリコンオイルを用いた場合の 3 パターン、それぞれ 5 回測定を行った図 3 に各パターン時の測定の様子を示す。

表 3 にそれぞれ 5 回の平均動摩擦係数および標準誤差を示す。図 4 に測定した摩擦の時間変化のグラフを示す。表 3、図 4 を見ると界面流体なしの場合、動摩擦係数は 0.605 と水の 0.791 場合より低い値を示したが、グラフを見ると静止摩擦が発生した後、摩擦が低下し動摩擦を示している様子が分かる。一方で水とシリコンオイルは静止摩擦と動摩擦の差があまりないように見受けられる。また、シリコンオイルは 3 つの中で動摩擦係数、標準誤差ともに最も低い値を示した。

### 3.3 形状記憶ゲルステータによる摺動トルクの評価

形状記憶ゲルステータとポリ乳酸樹脂製ロータによる一軸偏心ねじポンプの摺動トルクを評価するために上下回転型試験 TL901 を使用する。図 5 に装置概要を示す。回転固定部にジョイントを取り付けたロータを固定し、またステージに固定するための治具を用いてステージにステータを固定する。図 6 に実際の装置に本研究で用いる一軸偏心ねじポンプを取り付けた外観を示す。測定条件としてモータの回転数は 15rpm とし、測定時には流体なしの場合、流体として水、シリコンオイルを使用した場合の 3 パターンを実施した。また、試験はそれぞれ 5 回測定し、平均を求めた。表 4 にトルク試験の

表 4. トルク試験結果

	None	Water	Silicon oil
Torque [N·m]	0.0021	0.0012	0.00063

結果を示す。表 4 を見るとシリコンオイルの値が 0.00063 N·m と 3 つの中では最も低いという結果が得られた。

#### 4. 考察

##### 4.1 寸法精度

30s のステータにおいて、表 2 から分かるように寸法精度が悪い。その理由としては 1 層あたりの硬化時間が短い点が挙げられる。対して 90s のステータでは硬化時間が長く寸法精度も 30s と比較すると高いことが分かる。しかし、90s のステータでは最後の 1/5 ほどは柔らかいという現象が起こった。これはモノマーである DMAAm と SA が分離し、SA が常温で結晶化してしまったのが問題であると考えている。形状記憶ゲルの 3D プリントにおいて最も問題となっているのが、液温の低下による SA の結晶化である。ゲル作製時、本来常温で固体の SA を約 60°C に温め、液体として DMAAm と混合しており、この SA の変化を形状記憶ゲルは利用しているが、造形時間が 30s では約 4 時間、90s では約 10 時間かかる 3D プリントでは液温が低下する十分な時間であると推測できる。

一方で、型のステータではすべての寸法において高い精度を持っていることが分かる。造形時間も約 1 時間と早く、DMAAm と SA が分離する前にゲル化させることができている。しかし、問題点として積層痕が挙げられる。これは積層式 3D プリントを使用した型で、シリコーンゴムの型を作製したためであるため、今後 DLP 方式 3D プリントを使用した型の造形を検討する必要がある。

##### 4.2 界面流体におけるステータ・ロータ間の摩擦特性

表 3、図 4 より動摩擦係数において界面流体なしの場合と水の場合で、水の場合が高い値を示した理由として考えられることは、水を滴下した際に形状記憶ゲルの表面がややベタついたことが挙げられる。また、水、シリコンオイルの場合は標準誤差が小さいのに対し界面流体なしの場合は大きく、測定回数を増やし再現性を高められると推測できる。

##### 4.3 形状記憶ゲルステータによる摺動トルクの評価

表 4 より流体なしの場合と水の場合を比較すると、摩擦試験とは異なり、水の場合の方が高い値を示した。このことに対して、ロータとステータの間には約 0.1mm の隙間が空いており、ロータとステータの接触時間が短いことが考えられる。また、シリコンオイルの値は小さく、実験時にロータ・ステータが流体を吐出しているポンプとしての動きを見せていたことからトルク試験において有効

な材料だと判断できる。

#### 5. おわりに

ゲルを用いたステータ作製において 3D プリントを用いた造形ではヒータを用いた液温を下げない工夫や、造形時間を減らす必要があることが分かった。また、型を用いたステータ作製では積層痕をなくすため使用するプリンタを DLP 方式 3D プリントに変更する必要があることが分かった。

摩擦試験・トルク試験において本報告では 3 パターンの実験を行いシリコンオイルが最も低い値を示し、その安定供給も可能なことから、今後ゴムやポリ乳酸樹脂などでステータを作製し比較する際に使用することを検討する。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人 : NEDO) によって支援を受けたものである。

#### 参考文献

- 西村 健志, 上辻 英史, 岩井 善郎, 一軸偏心ねじポンプしゅう動部における粒子挙動に関する研究, トライボロジスト 第 63 卷 第 9 号 (2018)
- 堀江 昌朗, 長濱 正太, 隙間を有する一軸スクリューポンプの二重螺旋流路内部流れ特性に関する研究 摂南大学融合科学研究所論文集 第 4 号 第 1 号 (2018)
- 吉田 一也, 和田 真人, 川上 勝, 古川 英光, 高強度ハイドロゲルにおけるトライボロジー, トライボロジスト 第 63 卷 第 5 号 (2018), pp.352.
- MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa, 4D Printing of Shape - Memory Hydrogels for Soft - Robotic Functions  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admt.201900071> (Retrieved on September 17, 2020)
- ヘイシン モーノポンプ® モーノポンプとは 構造と原理  
<http://www.mohnopump.co.jp/about/construction.html> (Retrieved on September 17, 2020)
- 堀江 昌朗, 重光 翔, 大倉 成夫, 小児科用一軸偏心スクリュー血液ポンプに関する基礎的研究, (2015)

# 磁性材配合樹脂による 3D プリンター造形物内への情報記録における 情報記録領域の体積の効果

Effect of Volume of Fine Domains for Recording Information Inside 3-D Printed Objects with Resin Blended with Magnetic Material

ピヤラット シラパスパコンウォン<sup>1</sup>, 鈴木 雅洋<sup>1</sup>, 鳥井 秀幸<sup>1</sup>, 上平 員丈<sup>1</sup>

Piyarat Silapasuphakornwong<sup>1</sup>, Masahiro Suzuki<sup>1</sup>, Hideyuki Torii<sup>1</sup>, Kazutake Uehira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神奈川工科大学

<sup>1</sup>Kanagawa Institute of Technology

## 【要約】

磁性材配合樹脂により 3D プリンター造形部内に情報を記録する技術を評価した。テストサンプルの造形には、2 ヘッド熱溶解積層式 3D プリンターを使用した。テストサンプル本体とテストサンプル内の微小領域とは、造形の 1 工程で同時に造形された。本体は、通常のポリ乳酸(PLA)樹脂で造形した。微小領域は、磁性材配合 PLA 樹脂で造形した。テストサンプル造形後、微小領域をネオジム磁石で磁化し、磁化された微小領域の磁界をテスラメーターで測定した。結果は、磁界の強度が微小領域の体積に依存することを示し、本技術の実現可能性が実証された。

キーワード:情報ハイディング、書き換え可能記録、非破壊読み出し、磁性材

## 【Abstract】

This study evaluate the technique of recording information inside 3-D printed objects with resin blended with magnetic material. A two heads fused deposition modeling 3-D printer was used to fabricate test samples. The main bodies of test samples and the fine domains inside them were simultaneously fabricated with one sequence of fabrication. The main bodies were fabricated from pure polylactic acid (PLA) resin, and the fine domains were fabricated from PLA resin blended with iron powder. After fabricating the test samples, the fine domains were magnetized with neodymium magnet, and the magnetism of them was measured with a tesla meter. The results indicated that the magnitude of magnetism depended on the volume of fine domain, and this demonstrated the feasibility of the technique.

Keywords:information hiding, rewritable recording, nondestructive reading, magnetic material

## 1. 序論

近年、3D プリンターの幅広い用途での利用が進み、3D プリンター造形物の高付加価値化が求められている。筆者らの研究グループでは、3D プリンター造形物内に不可視に情報を埋め込み、非破壊で読み出すことにより、3D プリンター造形物を高付加価値化する技術を検討してきた[1-5]。直近では、書き換え可能に情報を埋め込む技術を検討している[6-8]。本技術では、熱溶解積層式 2 ヘッド 3D プリンターを用い、通常の樹脂で造形物本体を造形すると同時に、磁性材配合樹脂で造形物内に微小領域を造形し、造形後に造形物外から微小領域に磁界を印加することにより、書き換え可能に情報を埋め込む。本研究では、微小領域への情報埋め込みに微小領域の体積が及ぼす影響を検討する。

## 2. 磁性材配合樹脂による 3D プリンター造形物内への情報記録

本技術の原理の説明図を図 1 に示す。熱溶解積層式 2 ヘッド 3D プリンターを用い、通常の樹脂で造形物本体を造形し、磁性材配合樹脂で造形物内に微小領域を造形する(図 1A)。なお、通常の樹脂も磁性材配合

樹脂も同様の温度で溶解するので、熱溶解積層式 2 ヘッド 3D プリンターを用いることにより、造形物本体を造形すると同時に造形物内の微小領域も同一の工程で造形できる。造形後に造形物外から微小領域に磁界を印加し、その極性で 2 進数を表現する(図 1B)。磁気センサーにより微小領域ごとの磁界の方向を検出し、非破壊で情報を読み出す。極性を変えて微小領域への磁

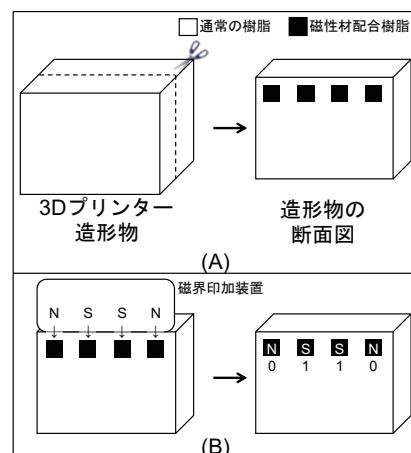


図 1. 本技術の原理の説明図

界の印加を再び行うことにより、造形物内に埋め込む情報を書き換える。

### 3. 評価

テストサンプルの造形には Mutoh 製 2 ヘッド熱溶解積層式 3D プリンター(3D MagiX MF-2200)を用いた。通常の PLA 樹脂でテストサンプルの本体を造形し、磁性材を配合した PLA 樹脂でテストサンプル内の微小領域を造形した。テストサンプルは 2 種あった(以下、テストサンプル A, B とする)。テストサンプル A は  $35 \times 25 \times 10$  mm の直方体で、テストサンプル A 内に  $4 \times 2 \times 1$  mm の直方体の微小領域と  $2 \times 2 \times 2$  mm の微小領域とを造形した。どちらの領域も体積は  $8 \text{ mm}^3$  であった。テストサンプル B は、 $40 \times 30 \times 10$  mm の直方体で、テストサンプル B 内に  $4 \times 8 \times 1$  mm の直方体の微小領域と  $4 \times 4 \times 2$  mm の微小領域とを造形した。どちらの領域も体積は  $32 \text{ mm}^3$  であった。造形後にテストサンプル外からネオジム磁石により微小領域に磁界を印加し、磁気センサー(Lutron MG-3003SD AC/DC)により微小領域の磁界の極性と強さとを測定した。

測定の結果を表 1 に示す。テストサンプル A, B どちらでも意図した極性に磁界が印加された。また、磁界の強さは、微小領域の体積により異なり、微小領域の形状による違いは見られなかった。これらの結果から、微小領域に一定の体積(本研究の結果からは、少なくとも  $8 \text{ mm}^3$ )を確保できれば、本技術を様々な形状に適用できるといえる。

表 1. 測定の結果

テストサンプル	微小領域 (mm)	印加した磁界の極性	測定された磁界の極性	測定された磁界の強度 (G)
A	$4 \times 2 \times 1$	N	N	1.8
		S	S	1.9
	$2 \times 2 \times 2$	N	N	1.7
		S	S	1.9
B	$4 \times 8 \times 1$	N	N	4.0
		S	S	3.9
	$4 \times 4 \times 2$	N	N	4.0
		S	S	3.7

### 4. 結論

本研究では、磁性材配合樹脂による 3D プリンター造形物内への情報記録における情報記録領域の体積の効果を検討した。本技術では、熱溶解積層式 2 ヘッド 3D プリンターを用い、通常の樹脂で造形物本体を造形すると同時に、磁性材配合樹脂で造形物内に微小領域を造形し、造形後に造形物外から微小領域に磁界を印加することにより、書き換え可能に情報を埋め込む。評価では、微小領域ごとに磁化でき、かつ極性と強度を非破壊で測定できて、強度が微小領域の形状には依存せずに、微小領域の体積に依存することを確認した。情報記録領域に一定の体積を確保できれば、本技術を様々な形状に適用できることを実証した。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H04141 の助成を受けた。

### 参考文献

- M. Suzuki, P. Silapasuphakornwong, H. Unno, K. Uehira, Y. Takashima, "Copyright protection for 3D printing by embedding information inside real fabricated objects," The International Conference on Computer Vision Theory and Applications, pp. 180-185 (2015).
- K. Uehira, M. Suzuki, Y. Takashima, H. Torii, "Technique of information hiding for 3-D printed objects with transmission images of near-infrared rays," Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2017, Lisbon, Portugal, July 21-23, 2017, pp. 87-93 (2017).
- M. Suzuki, P. Silapasuphakornwong, Y. Takashima, H. Torii, K. Uehira, "Number of detectable gradations in X-ray photographs of cavities inside 3-D printed objects," IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E100-D, no. 6, pp. 1364-1367 (2017).
- P. Silapasuphakornwong, M. Suzuki, Y. Takashima, H. Torii, K. Uehira, "New technique of embedding information inside 3-D printed objects," Journal of Imaging Science and Technology, vol. 63, no. 1, pp. 010501-1-010501-8 (2019).
- H. Kasuga, P. Silapasuphakornwong, H. Torii, M. Suzuki, K. Uehira, "Technique to embed information in 3D printed objects using near infrared fluorescent dye," IIEEJ Transactions on Image Electronics and Visual Computing, vol. 8, no. 1, pp. 2-9 (2020).
- P. Silapasuphakornwong, M. Suzuki, H. Torii, K. Uehira, "Writing and reading information embedded inside 3-D printed objects by utilizing resin blended with magnetic material," Imaging Conference Japan 2019, 3DP1-01 (2019).
- P. Silapasuphakornwong, H. Torii, M. Suzuki, K. Uehira, "3D printing technique that can record information inside an object as rewritable", NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication 2019, pp. 158-161 (2019).
- ピヤラット シラパスパコオンウォン, 鈴木雅洋, 烏井秀幸, 上平員丈, "磁性材配合樹脂による3Dプリンター造形物内への書き換え可能な情報記録," Conference on 4D and Functional Fabrication 2019: New Paradigm over 3D Technology, pp. 29-31 (2019).

# パラメトリックシンセシスを通じた イヌ用義足のカスタマイゼーションサービスの実装

“Parametric Synthesis” in the Customization Service of Prostheses for Dogs

佐倉 玲<sup>1</sup>, 櫻井 智子<sup>1</sup>, 島田 旭緒<sup>2</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>

Rei SAKURA<sup>1</sup>, Tomoko SAKURAI<sup>1</sup>, Akio SHIMADA<sup>2</sup>, Hiroya TANAKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学 環境情報学部, <sup>2</sup>東洋装具医療器具製作所

<sup>1</sup>Faculty of Environment and Information Studies, Keio University, <sup>2</sup>Toyo Sogu Iryo Kigu Seisakujo,

## 【要約】

ユーザーがウェブ上でプロダクトをカスタマイズできるサービスを実現する手法として、「パラメトリックシンセシス」を提唱する。これは、プロダクトに対する知見を持った人から暗黙知を引き出すことによって必要なパラメーターを抽出し、ユーザーが調整しやすい形でプロダクトのパラメトリックモデルをウェブ上に展開する技術である。本研究ではパラメトリックシンセシスを用いてイヌ用義足のカスタマイゼーションサービスを実装し、その有用性を検証した。

キーワード:イヌ, 義足, カスタマイゼーション, パラメトリックモデリング, 暗黙知

## 【Abstract】

This paper presents “Parametric Synthesis” as a method to develop services that allow users to customize products through a website. It consists of the following processes: the identification of necessary parameters for customization from tacit knowledge of experts for the products, and the implementation of the parametric models of them, in a way users can easily modify them as they like. We demonstrated its effectiveness through developing the customization service of prostheses for dogs.

Keywords: dog, prostheses, customization, parametric modeling, tacit knowledge

## 1. 序論

個人に合わせてプロダクトのカスタマイズが可能なのは、3D プリンティング技術の利点のひとつである。パラメトリックモデリングによって作られた 3D モデルは、寸法や角度などのパラメーターを後から変更することができ、プロダクト形状を編集できる。Nervous System の指輪[1]や Mecuris の義足[2]は、ユーザーがウェブ上でパラメーターを調整することで、個人の体に合ったサイズや好みのデザインにすることができる「カスタマイゼーションサービス」である。

カスタマイゼーションサービスを作るには、プロダクトのパラメーターを厳選する必要がある。3D モデルを作成するエンジニアはどこでもパラメーターにすることができるが、プロダクトの「カスタマイズすべきポイント」のみをパラメーターにすることが好ましい。どこがカスタマイズすべきポイントかは、ユーザーや専門家など、そのプロダクトに対する知見を持った人に聞くことになる。このとき、彼らにとってその知見は暗黙知であるため、引き出して言語化することが必要となる。

つまりカスタマイゼーションサービスは、知見を持つ人から暗黙知となっている「カスタマイズすべきポイント」を抽出し、調整方法を整理して UI 設計し、「パラメトリック 3D モデル」としてウェブ上に展開する、という工程によって作られる。本研究ではこの一連の技術を「パラメトリックシンセシス」と呼び、実例を通してその有効性や課題点を確かめる。

## 2. 実例—イヌの義足

現在イヌの義足は、国内で唯一の義肢装具士によってすべて手作業で作られている(図 1)。そのため、時間や労力がかかることや細かい修正が難しいことなどの問題があり、義肢装具士がイヌの脚に合わせて調整できる義足のパラメトリック 3D モデルが求められている。そこで今回パラメトリックシンセシスを用いて、ウェブ上で義肢装具士が調整を行える、イヌ用義足のカスタマイゼーションサービスの実装を行った。



図 1. 手作業で作られているイヌ用義足

### 2-1 パラメーターの抽出

まずは、義足のカスタマイズすべきポイントを抽出する。義肢装具士と共に創しながら義足を作っていく過程で、

暗黙知である義足の設計プロセスを引き出し、3D CAD のパラメーターに落とし込んでいった。共創型ものづくりで暗黙知を言語化していく試みは、淺野[3]が肩離断者用の 3D プリント肩パッドを制作する過程で行っている。淺野は「『実物(かたち)』をつくり、それを見せることで、次なる要求に気づき、それを取り入れていく」という過程を繰り返すことが重要であった」と述べており、義足でも同様に、義肢装具士にものを見せて対話をを行い、暗黙知を引き出していった。たとえば図 2 は、3D プリンタで出力したフレーム部分に義肢装具士が他のパーツを取り付ける、という作業を行った際に、作られた義足と従来の義足の先端部分である。従来の義足では足先にある衝撃吸収剤が円錐台であったが、3D プリント物に衝撃吸収剤を取り付けた結果、丸みを帯びた形となった。これを受け、3D データでも衝撃吸収剤の部分の形を変更し、義肢装具士が丸みを調整できるようにパラメーターとした。



図 2. 従来の義足(左)と3D プリントしたフレームにパートを取り付けて作った義足(右)

また、淺野は建築分野で提唱されている「超線形設計プロセス」(藤村[4])を応用し、「検討項目をひとつひとつ見つけ出し、それに対応する 3D プリント物を個別につくり、その都度 3D データを残すことを繰り返し」「その過程を事後的に整理」することで、プロダクトに固有の設計プロセスを明らかにできるとしている。義足の事例でもこの手法を用い、検討項目をひとつずつ実装し、その過程を整理することで、設計プロセスの言語化を行った。表 1 は検討項目が 3D CAD に実装されたプロセスをまとめたもので、一度実装された項目もプロセスが進んだ後に変更があれば、二重丸や三重丸として記述している。各項目が指す部位については図 3 に示した。

表 1. イヌ用義足の設計プロセス

	1	2	3	4	5	6	7
フレームの厚さ	○	○	○	○	○	○	○
外形	○	○	○	◎	◎	◎	◎
上部の切り取り位置	○	○	○	○	○	○	○
衝撃吸収材との接続部分		○	○	○	○	○	○
衝撃吸収材			○	○	○	○	○
内側の隙間				○	○	○	○
開口部					○	○	○
上部の切り取りの形					○	○	○

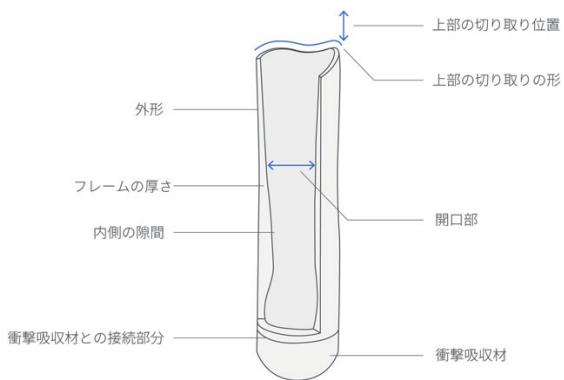


図 3. 設計プロセスにおける各項目の部位

設計プロセスを言語化することでパラメーターを洗い出したら、パラメーターの厳選を行う。3D CAD に実装した項目は、義肢装具士による調整が必要なものと、そうでないものに分けることができる。たとえば、着脱時にイヌの脚を通す「開口部」の項目は、各個体の脚に合わせて大きさや位置を変える必要があり、その調整には義肢装具士の専門知識や経験が必要となる。一方で「フレームの厚さ」は、使用する材料は決まっており耐久性の確認も済んでいるので、義肢装具士がウェブ上で調整する必要はない。このように分けていったときに、義肢装具士による調整が求められる項目(知見が必要な項目)を、イヌ用義足のカスタマイズすべきパラメーターとした(表 2)。

表 2. パラメーターの分類

知見が必要な項目 (カスタマイズすべき項目)	知見が必要ない項目
上部の切り取り位置	フレームの厚さ
衝撃吸収材	外形
開口部	衝撃吸収材との接続部分
上部の切り取りの形	内側の隙間

## 2-2 ウェブへの実装

続いて、抽出したパラメーターをウェブ上で調整できるようにする。このとき、ユーザーの調整方法を考え、使いやすい UI 設計を行うことが重要となる。たとえば指輪のカスタマイズを考えると、まず指に合わせてサイズを決めてから見た目のデザインを調整していくと考えられる。後からサイズを変えると、それに伴って見た目も変わってしまうからである。こうした調整手順などを整理し、UI に落とし込んでいくことになる。

今回は Nodi3D[5]を使用し、義足のパラメトリック 3D モデルをウェブ上に作成した(図 4)。Nodi3D は 3D モデルの色や材質を変えて表示したり、曲線をグラフ上で直感的に操作できたりと、UI 設計の自由度が高い。イヌの義足は脚に合わせて調整を行うので、イヌの脚型の 3D

モデルを青色にして表示し、見ながら調整できるような UI とした。

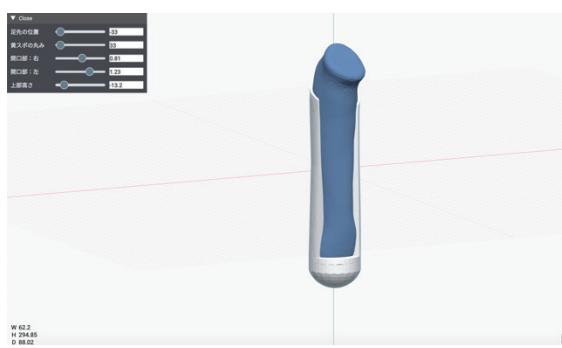


図 4. カスタマイゼーションサービスの操作画面

### 2-3 フィードバック

実装したカスタマイゼーションサービスを使用してもらい、フィードバックをもとにパラメーター や UI の修正を行う。今回のサービスを義肢装具士に使ってみてもらった結果、以下のようなフィードバックを得ることができた。

- ・スライダーで簡単にデータの修正ができるのはすごい。
- ・反映されるまでの時間は遅くない。問題なく調整できる。
- ・イヌの脚型を見ながら調整できるのはやりやすい。
- ・元の義足と比較しながら調整できるといい。
- ・衝撃吸収材の高さが、肘頭から足先までの長さで調整できるといい。
- ・上部の切り取りの形は修正の必要がない。
- ・スライダーは身体に接する部分から調整し、脚長差の調整を最後に行うような順番がよい。

まとめると、パラメーターに関しては「上部の切り取りの形」は調整する必要がなく、「肘頭から足先までの長さ」が必要だということがわかった。後者は、もともと「衝撃吸収材」の項目で足先の位置を調整する仕組みになっていたので、基準点を肘頭に変更し、「足先の位置」という独立の項目とみなすこととした。これにより、最終的なパラメーターは「上部の切り取り位置」「開口部」「衝撃吸収材の丸み」「足先の位置」の 4 項目となった。UI については、手順は身体に接する部分から調整し、最後に脚長差の調整を行うことから、スライダーをその順番に上から並べ替えることにした。また調整時に必要な情報として、脚型の 3D モデルだけでなく、調整前の義足データとの比較も行えるようにした。

### 3. 検証

実装した義足のパラメトリック 3D モデルを義肢装具士にパラメーター操作してもらい、義足の調整が問題なく行えるかの検証を行った。義足のフィッティングを行った際にうまく歩くことができなかつたので、その義足データの修正を行った。結果、問題なくパラメーターを調整

することができ、新しい義足の作成ができた(図 5)。



図 5. 修正前の義足(左)とカスタマイゼーションサービスを用いて修正を行った義足(右)

### 4. 結論

パラメトリックシンセシスを通じてイヌ用義足のカスタマイゼーションサービスを実装し、義肢装具士がウェブ上で義足の調整を行うことができた。このことから、パラメトリックシンセシスはカスタマイゼーションサービスを作る際に有効な手法であり、他のカスタマイズ可能なプロダクトに対しても応用可能であると考えられる。

課題としては、UI 設計のプロセスが明確になっていないという点が挙げられる。パラメーターの暗黙知は超線形設計プロセスを応用して言語化し、厳選して抽出ができたが、調整の手順や必要な情報の暗黙知は完全に引き出せていない。こうしたパラメーター以外の暗黙知も言語化し、UI として実装していくプロセスの構築が必要である。

今回は特定のイヌの義足の修正が行えることを検証したが、今後は他のイヌの事例にも活用し、カスタマイゼーションサービスの有用性を確かめていく。また、イヌ用義足以外のプロダクトにもパラメトリックシンセシスを適用し、有効性や課題点の検討を続けていきたい。

### 参考文献

1. Nervous System. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/> (参照 2020-09-14)
2. Mecuris. <https://www.mecuris.com/> (参照 2020-09-14)
3. 浅野義弘, 増田恒夫, 田中浩也. 共創型ものづくりにおけるパラメトリックモデリングの導入. ヒューマンインターフェース学会誌. 2020, vol. 22, no. 1, p. 8-11.
4. 藤村龍至. “批判的工学主義から「設計」を考える”. 設計の設計. 柄沢祐輔, 田中浩也, ドミニク・シェン, 松川昌平. INAX 出版, 2011, p. 111-162.
5. Nodi3D. <https://nodi3d.com/> (参照 2020-09-14)



# ソフト材料を使用した新しい関節の開発

Development of new joints using soft materials

青山 韶<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディ ナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Hibiki AOYAMA<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

ソフト材料の接合部は静的または低自由度の構造物に対して斬新な振る舞いや構造的柔軟性を与えることができる。特に形状記憶の性質を保有するゲル材料は、3D 造形手法が確立されつつあり、温度変化の仕掛けを構造的に施すことで、構造と物性に裏付けされたしなやかな駆動系として採用することができる。本研究では形状記憶ゲルを活用して高温時のみ関節部分の駆動が可能になるロボットの関節部分を開発する。この関節は流路を持ち、蠕動運動ポンプを介して関節内部に流体を流すことで温度変化を生じさせる構造をもつ。関節部に対して温度に応じた物性を検証する。

キーワード: ソフト材料, ソフトロボット, 3D プリンティング, 関節

## 【Abstract】

Soft material joints can provide novel behavior and structural flexibility for static or low-degree-of-freedom structures. Especially for gel materials with shape memory, a 3D modeling method is being established, and it can be used as a flexible drive system backed by its structure and physical properties by structurally adding a mechanism for temperature change. In this study, we develop a new type of robot joint which can be driven only at high temperature by using shape memory gel. This joint has a flow channel and a peristaltic pump to make the fluid flow into the joint to cause temperature change. The physical properties of the joint parts are investigated as a function of temperature.

Keywords: soft materials, soft robot, 3D printing, joints

## 1. 諸言

現在においてソフトロボットの変形を実現する方法として多く採用されている方法は、内骨格系にモーター[1]や滑車などを組み込み電気あるいは空圧を利用する駆動系[2]を構築することである。しかし、人からの外力を受けることが想定される木製家具や木彫り人形などのソフトロボットのように変形させる場合は、パーツを分割し、パーツ間の接合部に柔軟材料を用いることで実現することができる。構造そのものに柔軟性を持たせてしまう技術もあり、柔らかい動きを持つ家具の開発ができることが報告されている[3]。また、人形浄瑠璃に代表される誇張表現の演出としても柔らかい接合部が期待されており、伸ばしたり曲げたりすることで本来の動物以上の動きを可能とすることができます。しかし柔軟機構または柔らかい材料だけでは動的に剛柔を切り替えるためには、材料の物性が編成するのに要する原理と速度応答性、強度を明確に把握する必要がある。本研究では、温度変化で剛柔切替が材料のみできるソフト関節を開発する。

## 2. ソフトマージョントの開発

### 2.1 材料の選定



Fig. 1 SirayaTech フレキシブルレジン[4]

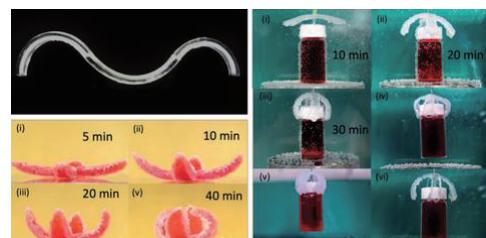


Fig. 2 SMG の温度変化による形状変化[5]

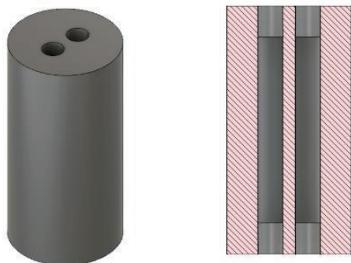


Fig. 3 モデリングした関節(左) 断面図(右)



Fig. 4 Frozen shuffle(左) 造形原理(右)[7]

使用する材料は図 1 に示す「SirayaTech 光造形 LCD 3D プリンター用 フレキシブルレジン」[2]と図 2 に示す温度変化でヤング率が変化する形状記憶ゲル (Shape Memory Gels, SMG)[5][6]を採用する。この理由は、類似した物理的性質をもつ両社におけるヤング率の温度変化のソフト関節への影響を比較するためである。SMG の調製にはモノマーとして N, N-ジメチルアクリルアミド(DMAAm), アクリル酸オクタデシル(SA), 光重合開始剤としてジフェニル(2, 4, 6—トリメチルベンゾイル)ホスフィンオキシド(TPO), 架橋剤として N, N'—メチレンビス(アクリルアミド)(MBAA), 吸收材として AS150 を用いた。

## 2.2 ソフト関節のモデリングと造形手法

関節のモデルは Fusion360 を使用し、図 3 のように設計している。フレキシブルレジン、SMG は特定の波長光を UV 照射することで硬化させて造形でき、ここでは図 4 の光造形 3D プリンタ Frozen shuffle を採用した。

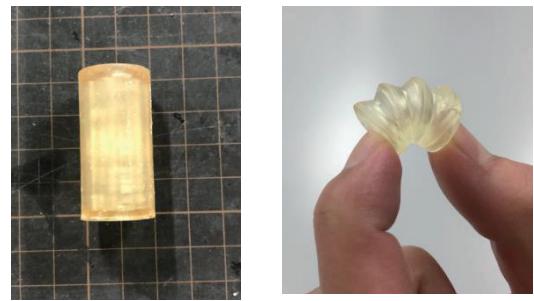


Fig. 5 レジンの円柱と蛇腹

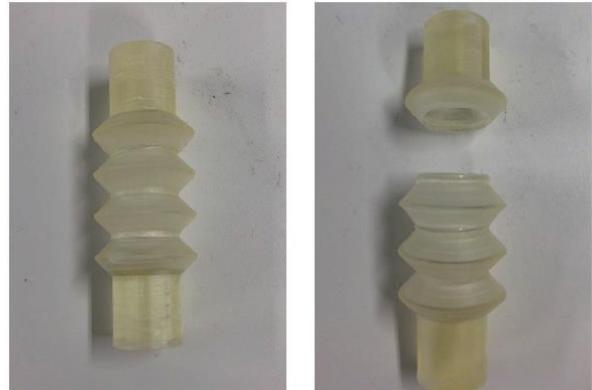


Fig. 6 レジンの問題

本実験では円柱構造と蛇腹構造の 2 種類の造形を行った。円柱構造では単純な形状で関節を作成し曲げに対する様子を観察する。また、温度変化による形状変化の様子も合わせて観察する。円柱構造を使用することで単純な形状による 2 種類の材料の造形試験も兼ねて行うことができる。

蛇腹構造は複雑な形状だが曲げに強いといった特性を持つため本研究に適している[8]。

しかし、複雑な形状であるがために造形が不安定であると推測される。本実験ではフレキシブルレジンで試作を行い、造形可能なモデルを SMG を使用し造形を行う。

構造の内部には図 3 のような空洞を設け、上部と下部に空洞に繋がる穴を開けた。これは外部から蠕動運動ポンプを介して内部に流体を循環させることを目的に設けた。温度の違う流体を循環させることで材料に温度変化を生じさせ硬度を変化させることができる。そのためには造形物には寸法通りの穴と空洞を必要とされ、構造的条件となる。

## 3. 実験方法と結果

### 3.1 ソフト関節の構造的比較

ソフト関節の造形結果から常温時と高温時の硬度変化と曲げに対する変形を評価し、適切な構造を決定する。

SMG で作成した円柱型関節は常温時には曲がることなく高温時のみ曲がるが、座屈が観測され、この座屈跡は温度変化で戻ることが困難であった。

Tabel. 1 温度とヤング率測定結果

測定条件[°C]	23.3(空気中)	24.7(水中)	40(水中)	50(水中)	60(水中)
1回目[MPa]	43.907	12.627	0.115	0.119	0.081
2回目[MPa]	46.886	15.139	0.108	0.102	0.092
平均[MPa]	45.396	13.883	0.112	0.111	0.087



Fig. 7 SMG の円柱と蛇腹



Fig. 8 SMG の問題

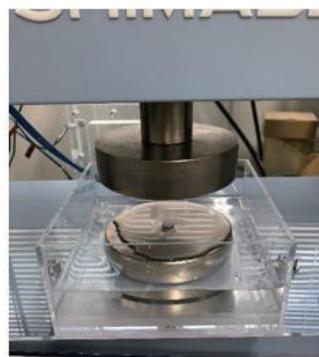


Fig. 9 圧縮試験概要

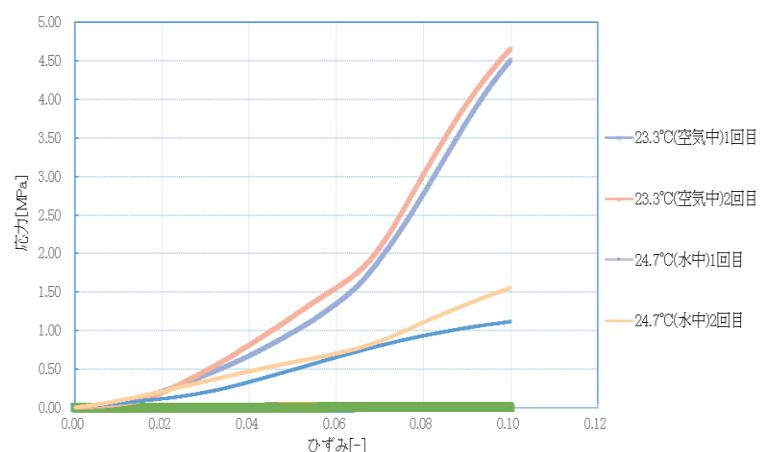
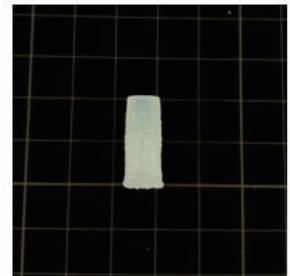


Fig.10 圧縮試験全体図



フレキシブルレジンを使用し作成した試作の蛇腹型関節は座屈することなく曲げることができた。また、フレキシブルレジンを使用した蛇腹型関節は人間の手で容易に曲げることが可能であった。しかし、この結果は本研究で必要としている高温時のみ曲がる構造とは異なり、蛇腹型のフレキシブルレジンは関節に不向きであるといった結果が得られた。また、強度的に問題があり複数回曲げを繰り返していると剥離現象が見られた。SMG で蛇腹型関節を造形したところフレキシブルレジンと比べ造形が失敗し、欠けている部分や造形されていない部分があった。しかし、蛇腹型関節の SMG はフレキシブルレジンと比べ硬く、常温時に人の手で変形することが不可能であった。以上の結果より、SMG は高温時のみ曲がることから関節の材料として適していることを確認することができた。また、蛇腹型構造は曲げに強く関節に適した構造だが SMG で造形する際には厚みを変えるなどの工夫が必要であることもわかった。

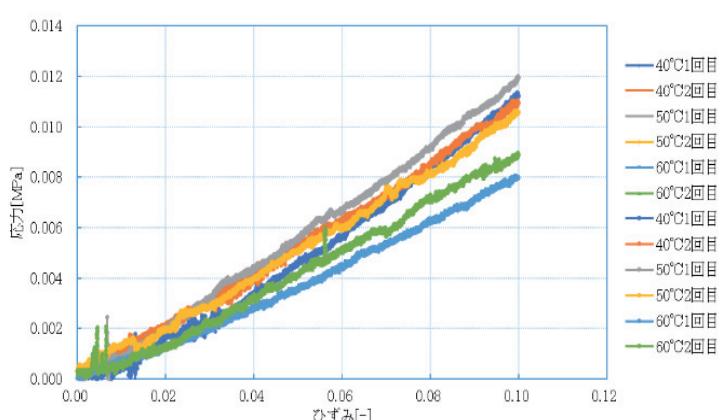


Fig.11 圧縮試験拡大図

### 3.2 ソフト材料の温度による硬度変化

SMG の温度による硬度変化には圧縮試験機を使用し水中での圧縮試験を行い、試験結果よりヤング率を算出する。なお、ヤング率はひずみ 0~0.1 の範囲で算出を行う[9]。試験条件として圧縮速度 2mm/min で行う。

SMG は空気中(23.3°C), 水温 24.7°C(常温), 40°C, 50°C, 60°C の 5 種類での測定をそれぞれ 2 回行う試験片は JIS 規格[10]にそって直径 8mm, 厚さ 20mm の円柱状のものを使用する。使用した試験片を図 9 に示す。圧縮試験結果よりヤング率を求める際に使用したひずみ 0.1 までの応力-ひずみ線図の全体図を図 10, 応力が 0 から 0.014MPa における範囲の拡大図を図 11 に示す。圧縮試験結果を表 1 にまとめた。

図 10, 11 が示すように 2 回の測定で再現性を確認することができ、本実験で求めたヤング率は妥当な値であると推測できる。表 1 の結果のまとめよりヤング率は温度が上がるにつれ反比例して小さくなっていることがわかる。しかし 40°C と 50°C では同じ値を示している。これは 40°C から 50°C の温度域ではヤング率は変わらないと推測される。しかし、60°C に達することでヤング率が変化した。常温における空気中と水中でのヤング率は 1.4°C の差だがヤング率は 30MPa と大きな差があった。

以上の結果より、常温でも空気中と水中では近い温度だがヤング率には大きな差があり、水中では一定の温度域に達することでヤング率に変化が生じることが圧縮試験より確認することができた。

### 4.結言

図 4 Frozen shuffle による造形可能な形状はフレキシブルレジンと SMG で異なり、フレキシブルレジンで造形可能な形状が SMG では造形不可能であるといった結果を確認することができた。SMG、フレキシブルレジンで作成した蛇腹型関節を曲げたところ、常温での SMG の硬さはフレキシブルを上回り、高温時にはフレキシブルレジンより柔らかくなるといった SMG の関節利用への有意性を確認することができた。圧縮試験の結果より空気中と水中ではヤング率に大きな差があることが確認できた。また、水温 40°C と 50°C ではヤング率に差はなくソフトロボットに組み込む際には、水温 40°C での利用で十分であるといった結果を確認することができた。

今後は温度変化による SMG のヤング率測定を行い、ヤング率が変化する温度域の測定を行っていく。また、本実験では 2 回の測定で再現性を確認したが、今後は試行回数を増やしヤング率の値を真の値へと近づけていく。

柔軟機構の改善としては、蛇腹の厚みを変えるなど機械強度的な改善を行い、SMG で造形可能なモデルの作成やソフトロボットへの応用を実施する。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期／フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO) によって支援を受けたものである。

### 参考文献

1. 新山 龍馬, 國吉 康夫”筋駆動脚機構による跳躍・着地ロボットの開発”  
[http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/~niiyama/pdf/Niiyama2005\\_RSJ2005\\_3F17\\_Mowgli.pdf](http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/~niiyama/pdf/Niiyama2005_RSJ2005_3F17_Mowgli.pdf) (accessed Sep 17, 2020)
2. 西岡 靖貴 “空気圧ソフトロボットアーム”  
日本ロボット学会誌 33 卷 9 号(2015) p. 664-667
3. “NatureArchitectsInc.”  
<https://nature-architects.com/> (accessed Sep 17, 2020)
4. “3D プリンタ専門店 ソリッドヤード”  
[https://www.solidyard.jp/SHOP/Tenacious\\_by\\_SirayaTech.html](https://www.solidyard.jp/SHOP/Tenacious_by_SirayaTech.html) (accessed Sep 17, 2020)
5. MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa “4D Printing of Shape-Memory Hydrogels for Soft-Robotic Functions”  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admt.201900071> (accessed Sep 17, 2020)
6. MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Ajit Khosla, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa “3D printing of shape memory hydrogels with tunable mechanical properties”  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/SM/C8SM01156G#!divAbstract> (accessed Sep 17, 2020)
7. Yosuke Sato, Azusa Saito, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa “3D Gel Printing with Low Cost Devices” SmaSys2019, Yonezawa, Japan, 2019.8
8. 越智 英明, 富井 政英”蛇腹正方形鋼管で横補強された RC 柱の高軸力下における繰り返し曲げせん断性状に関する実験的研究”  
日本建築学会構造系論文集 60 卷 470 号 (1995) p. 105-114
9. 日本工業規格 JIS K 6254 (2016).
10. 日本工業規格 JIS K 7181 (2011).

# PPC(Post Process Customization)により 強度の部分的調節を可能とする3Dプリント簡易サポート

3D Printed Simple Supporters with Partial Strength Adjustment  
by PPC (Post Process Customization)

林 園子<sup>1</sup>,田中 浩也<sup>2</sup>,濱中 直樹<sup>3</sup>,井上 由貴<sup>4</sup>,中谷 雄俊<sup>5</sup>

Sonoko HAYASHI<sup>1</sup>, Hiroya TANAKA<sup>2</sup>, Naoki HAMANAKA<sup>3</sup>, Yuki INOUE<sup>4</sup>, Takatoshi NAKATANI<sup>5</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科, <sup>2</sup>慶應義塾大学 環境情報学部,

<sup>3</sup>合同会社ハマナカデザインスタジオ, <sup>4</sup>横浜労災病院, <sup>5</sup>ユニチカ株式会社

<sup>1</sup>Graduate School of Media and Governance, Keio University,

<sup>2</sup>Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

<sup>3</sup>hamanakadesignstudio LLC, <sup>4</sup>Yokohama Rosai Hospital, <sup>5</sup>Unitika Ltd

## 【要約】

本研究では、部分的な強度調節が可能な手関節固定用の簡易サポートを、FDM方式の3Dプリンタを用いて製作した。後加工を前提に、面状にデザインと出力をを行い、事後的に個別の身体形状に合わせて加工する製作方法(PPC: Post Process Customization)を行った。フィラメントはユニチカ株式会社製の45°Cの加温で変形加工できる特殊ポリエスチル樹脂を採用した。この方法は、患者の手の3Dスキャンによる工法では実現できなかった個別化した製作を可能にする。今回製作した簡易サポートは、アルミ板と布製のサポートと同程度の手関節の固定力が測定できた。製作と評価を通して明らかになったPPCの留意点と、今後の課題を整理しました。

キーワード: 3D Printing, サポート, (PPC)Post Process Customization, Thermo Reactive Filament, Orthosis

## 【Abstract】

In this study, a simple orthosis for a partially strength-adjustable wrist joint immobilization was fabricated using an FDM 3D printer. It was designed and printed for Post Process Customization (PPC) method to fit each individual body shape. We used a special polyester resin manufactured by Unitika Ltd. This method allows for personalized manufacturing, which could not be achieved with the 3D scanning method. In this study, the simple orthosis produced by PPC were measured to have the same level of immobilization of the wrist joint as the orthosis made by aluminum plate and fabrics. We summarized the points and issues of the PPC for our future challenges.

## 1. はじめに

医療やスポーツなどの分野で用いる、身体の一部に沿わせた形状で装着する用具に、3Dプリント技術を用いる研究が増えている<sup>1-7,9)</sup>。一人一人異なる身体曲線に合わせ用具を製作する上で、1つから樹脂で製作できる3Dプリント技術が注目されている。身体の一部の3Dスキャンデータを活用し、3Dプリントする研究が多い<sup>1-5)</sup>。しかしこの方法では、3Dスキャンをした時点での用具の使用者の身体形状と、保持できる肢位に仕上がりが限定される。例えば骨折後に浮腫が生じた状態で3Dスキャンしたデータは、浮腫の消失後は活用が難しいことがある。

本研究では、45°Cの加温で変形し加工ができるフィラメントを用いて、3Dプリントにより部分的な強度の調節や通気性保持ができる手関節の簡易サポートを作製した。3Dプリントした後に、ドライヤーなどの熱で簡単に使用者の身体曲線に合わせて変形加工することができる。今回の研究で製作したサポートは、市販されているアルミ板と布製の固定用サポートと、同程度の固定力

があることが確認できた。本研究では、このような一連の加工をPPC(Post Process Customization)と称し、製作を通して確認した留意ポイントについて述べたい。

## 2. PPCとは

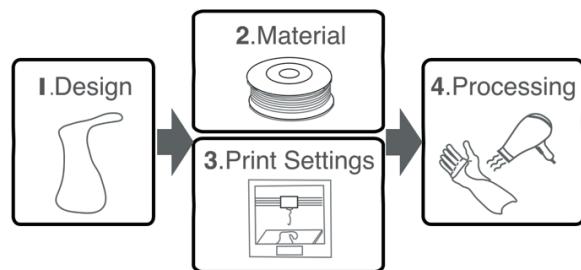


Fig.1 4 Elements of PPC

本研究では PPC (Post Process Customization) は、PPC用にデザインされ3Dプリントした用具を、個別の身体形状に合わせ、温熱などで変形加工することを指す。PPCは、「デザイン」と「素材」、「3Dプリント」と「加工」が一体であり、最適に組み合わされた際に最も効果が高い。

くなる。

今回,以下の後処理などは PPC に含めない。

- ・温熱や薬品,やすりがけなどで表面を滑らかにする加工
- ・個別の身体形状に合わせる目的ではなく,機能的な目的で行う加工.例えば,細長い板状の素材を曲げてフックにするなど。

### 3. 目的

手関節橈骨遠位端骨折ギプス固定終了直後の装着を目的とした簡易サポートを,PPC により作製する. PPC により,個別の身体形状に合わせた加工が可能で,3D プリントならではの通気性を保持したサポートが,従来の同じ目的の市販品と比較し,同程度の固定力を備えているか検証する.製作を通して,PPC の留意ポイントを確認する。

## 4. 製作方法

### 4-1 デザイン

PPC を前提とし,筆者らが 2019 年に脳血管障害で上肢に麻痺がある患者用に3D プリンタを用いて製作した研究<sup>8)</sup>と同様のデザイン法を採用する.概要は以下である。

- 1.使用者の手を紙にトレースする
- 2.トレースした手の形状を参考に,サポートのデザインを同じ紙面上に描く
- 3.2.を下絵として CAD に取り込む
- 4.下絵を参考にスプラインでスケッチをし,押し出しで厚みを付け,STL を作成する
- 5.固定力が必要なエリアは,市販のアルミ板と布製のサポートのアルミ板の大きさと位置を参考にし,同様に STL を作成する

### 4-2 素材

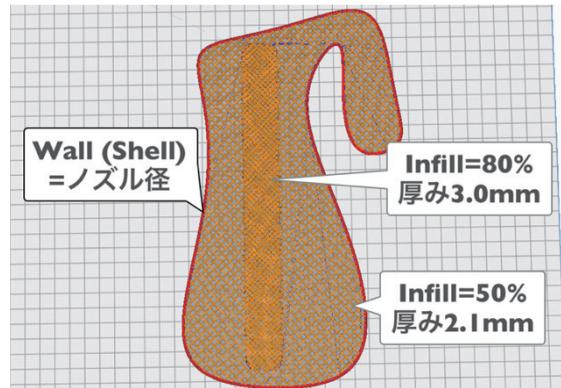
PPC を前提とし,今回は,ヘアドライヤーなどの簡易な加温方法で加工できるユニチカ株式会社製の TRF (Thermo Reactive Filament) に TPE が配合されたものを使用した.TRF は 45°C の加温で変形する特殊ポリエチル製フィラメントであるが,今回使用したフィラメントは,TRF と比べて加工の際の伸びが良く,温熱加工後に割れにくい特徴がある。

### 4-3 3D プリント

スライスは Ultimaker 社の CURA を使用した.PPC を前提に,3D プリントする内部構造には Grid を採用した.上下左右方向に引き伸ばしながら,個々の身体のラインに沿った加工が行えるように設定した.実用性を考慮し,1 時間未満でプリントできるよう,ノズル径は 1.0mm を採用した.固定力が必要なエリアは Infill = 80 %, 厚みを 3.0mm とし,固定力はそれほど必要なく,通気性をもたせたいエリアは Infill=50%, 厚みを 2.1mm とした.引き伸ばしながらの加工が可能な限り制限されないよう,周囲の

Shell はノズル径と同様とした(1.0mm).

Fig.2 3D プリント設定



### 4-4 加工

ヘアドライヤーを用いて加温し,変形加工を行った.充填率を高めたエリアおよび周囲の Shell 部分が軟化しにくいため,長めに温熱を加えた.手関節は機能的な 20 度背屈位を目指して加工し,関節突起部は圧迫しないよう加工した.MP 関節など,手指の関節の可動性を妨げないよう配置し,曲げ加工を行った.

### 5. 固定力の測定

#### 5-1 測定内容

PPC により製作した手関節固定用簡易サポートが,従来の同じ目的の市販品と比較し,同程度の手関節固定力を備えているか測定する.

#### 5-2 測定方法

TPU を使用し3D プリントした,手関節部分に可動性のある前腕のモデルを用いた.下記の2種類のサポートを装着し,MP 関節(中手指節関節)部上方から段階的に荷重をかけ,変位を測定し,固定力の比較を行った.

- 1.前述 4 の製作方法で製作した手関節固定用簡易サポート
- 2.アルミ板と布製のサポート(市販品:Monomyth 手首固定 サポートー 手首用 保護具)



Fig.3 (左)  
PPC で製作  
した手関節  
固定用サポ  
ータ

Fig.4 (右)  
アルミ板の入  
った布製サ  
ポータ



Fig.5 測定セッティング(PPC サポータ)



Fig.6 測定セッティング(アルミ板と布製のサポート)

### 5-3 結果

測定の結果は、"Table1", "Fig.7"の通りである。非装着時に比べて明らかな手関節の固定が 1.2 のサポートとともに可能で、固定力は同程度であることが確認できた。

荷重(g)	スタート	500	1000	1500	2000	2500	3000
PPCサポート変位平均 (mm)	3	5	7	9.5	11.5	13.5	16
アルミと布製変位平均 (mm)	3	5	7	9	12	15	18
装着なし変位平均 (mm)	3.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	33.5

Table1 荷重段階ごとの変位

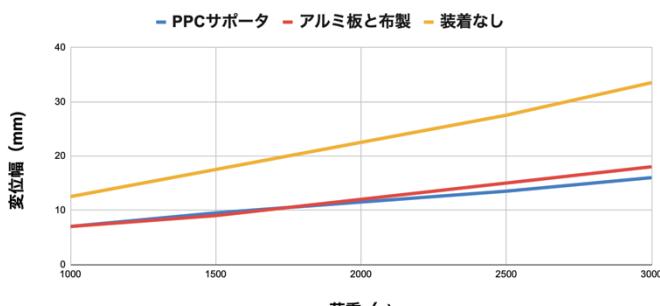


Fig.7 荷重段階ごとの変位比較グラフ

### 6 PPC の留意ポイント

以下、本研究を通して明らかになった製作のポイントをまとめる。

### 6-1 3D プリント時のポイント

- 伸縮しやすい内部構造を採用する。  
(Gyroid, Honeycomb, Grid など)
- 充填率を高くしすぎない。  
(上限は Gyroid は 30%, Grid は 70%)  
隣接する造形と密着しすぎると、加工時の伸びを含めた自由度が低下するため。
- モデルのアウトラインの Shell は、1 層とする。  
(今回は、1.0mm のノズルを採用したため、アウトラインの Shell は 1.0mm とした。)  
アウトラインの Shell の厚みにより、伸びが制限されるため、最小限にする。

### 6-2 加工時のポイント(温熱による加工の場合)

- 中心部に比べ、アウトラインが軟化しにくいため、全体を加工する際はアウトラインに集中して温風を当てる

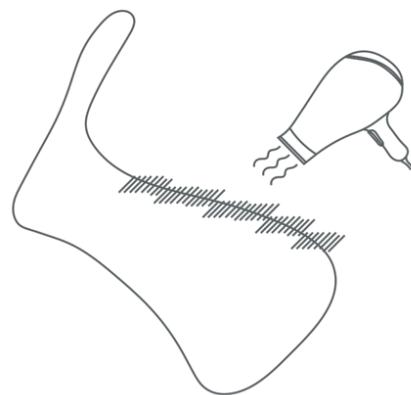


Fig.8 アウトラインに集中して温風を当てる

- 引き伸ばしながらフィッティングすることで、より肌の曲面に沿った加工ができる。

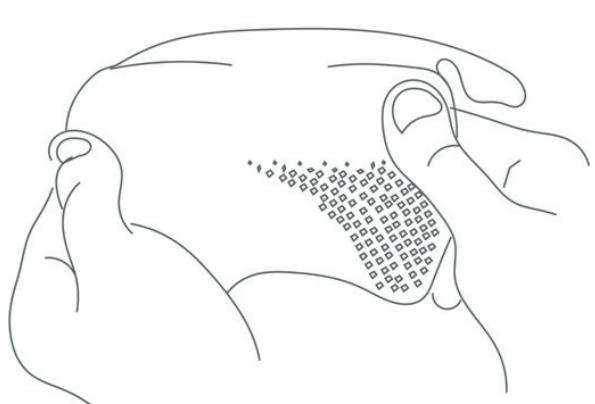


Fig.9 引き伸ばしながらのフィッティング

3. 断端を外側に向けて丸めるように加工すると、肌触りがソフトになる。



Fig.10 断端を丸める

4. 関節突起部は当たらないようにしっかり避ける

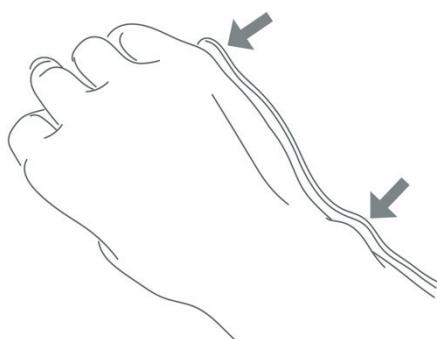


Fig.11 関節突起部を避ける

5. 関節運動を阻害しないように位置決め・加工をする

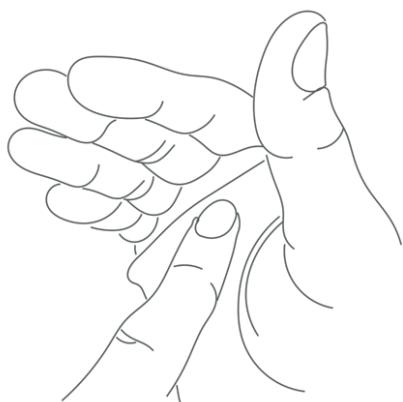


Fig.12 関節運動を阻害しない

## 7.まとめ

本研究では、手関節固定用の簡易サポートの製作を通して確認された、PPCにおける3Dプリント時のポイントと、温熱加工時のポイントをまとめた。今回は実用性を考慮して1.0mmのノズルを採用したこともあり、周囲部分の加工しにくさが課題として残った。この課題をデザインや3Dプリント設定で解決できれば、より使いやすいPPCパッケージになると考える。デザインは、ソフトの開発などで数値入力だけで設定できるパラメトリックデザインが実装できれば、CADの操作が難しい方にも活用してもら

いやすくなると考える。

今回、PPCで製作した手関節固定用簡易サポートは、測定の結果より、アルミ板と布製の製品と比較して同等の手関節固定力が確認できた。固定エリアの充填率や厚みの調整により、固定力がより高いサポートを製作できる可能性が高い。引き続き製作と検証およびユーザー評価も実施し、PPCサポートの有効性を確認していきたい。

## 参考文献

- J. Li and H. Tanaka, "Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization," *3D Printing in Medicine*, 4, 1(2018),
- F. Górska, W. Kuczko, W. Weiss, R. Wichniarek, and M. ukowska, "Prototyping of an individualized multi-material wrist orthosis using fused deposition modelling," *Advances in Science and Technology Research Journal*, 13(4), pp. 39–47 (2019)
- C.P. Agudelo-Ardila, G.C. Prada-Botai, and P.H. Rodrigues G., "Orthotic prototype for upper limb printed in 3D : A efficient solution," *Journal of Physics : Conference Series*, 1388, 012016 (2019)
- F. Górska, P. Zawadzki, R. Wichniarek, W. Kuczko, M. ukowska, I. Wesolowska, and N. Wierzbicka, "Automated Design of Customized 3D-Printed Wrist Orthoses on the Basis of 3D Scanning," *Proceedings of ICCES2019(Computational and Experimental Simulations in Engineering)*, pp. 1133–1143(2020)
- R. Saito, A. Komatsu, S. Chida, T. Iwami, and Y. Shimada, "Optimization design by the finite-element analysis of the wrist harness which can be manufactured by 3D printer," *Japanese Journal of Clinical Biomechanics*, 40, pp.7–11 (2019)
- M. Yoshikawa, "Gishu Kaihatsu ni okeru 3D Printa no Kanosei [Potential of 3D Printed Prosthetic Hands]," *Sogo Rehabilitation*, 47(10), pp. 947–953(2019)
- D. Borstell, N. Walker, and S. Kurz, "Methodical design of a 3D-printable orthosis for the left hand to support double bass perceptual training," *Proceedings of the 30th Annual International Solid Freedom Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference(SFF Symposium)*, The Minerals, Metals & Materials Society(2019), pp. 2090–2103.
- S. Hayashi, H. Tanaka, N. Hamanaka, W. Nakamura, T. Nakatani, "Testing the Usefulness of Post-customizable 3D Printed Splints Using Thermo Reactive Filament "The Journal of 4D and Functional Fabrication No.1(2020)
- D. Popescu, A. Zapciu, C. Tarba, and D. Laptoiu, "Fast production of customized three-dimensional-printed hand splints," *Rapid Prototyping Journal*, 26 (1), pp. 134–144 (2020)

## 4DFF2020 実行委員会

### 実行委員長

古川 英光 (山形大学)

### 副実行委員長

藤井 雅彦 (inkcube.org/慶應義塾大学SFC研究所)

### 実行委員

常盤 拓司 (慶應義塾大学)

青木 まゆみ (慶應義塾大学)

古賀 洋一郎 (株式会社3D Printing Corporation)

湯浅 亮平 (キヨーラク株式会社)

大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

高橋 茂樹 (山形大学)

市原 政喜 (市原国際特許事務所)

間宮 基之 (株式会社ブリヂストン)

山岡 潤一 (慶應義塾大学)

竹内 達夫(日本画像学会)

予稿集発行日(予稿公開日)

2020年10月1日



慶應義塾大学SFC研究所  
ファブ地球社会



(一社)日本画像学会

