

Conference on 4D and Functional Fabrication 2023

– New Paradigm over 3D Technology –

4DFF

2023年11月01日(水) 09:30 - 16:40

2023年11月02日(木) 09:20 - 18:10

ブリチストングローバル研修センター / オンライン開催

主催 (一社)日本画像学会 4DFF研究会

後援 やわらか3D共創コンソーシアム, 画像関連学会連合会,
慶應義塾大学SFC研究所デジタル駆動超資源循環参加型社会共創コンソーシアム

4DFF2023 Time Table

November 1, 2023

	オンライン (Zoom)	ブリヂストングローバル研修センター	
		1A 会議室 (1F)	2B/2C 会議室 (2F)
9:30	Opening Remark		
9:40	基調講演		
10:30	Session 1 メタマテリアル・形状制御による価値創出		
11:45	Lunch (70min.)		
12:55	Session 2 材料技術による価値創出		
14:40	Session 3 新規プロセスによる価値創出		
15:35	協賛団体活動紹介		
15:55	ショーケース ショートプレゼンテーション		
16:30	実行委員会からの連絡		
16:40	懇親会 会場準備		(ショーケース展示準備)
17:20	懇親会 (情報交換会) (90min.)		
18:50			

November 2, 2023

	オンライン (Zoom)	ブリヂストングローバル研修センター	
		1A 会議室 (1F)	2B/2C 会議室 (2F)
9:00			ショーケース準備
9:20			ショーケース 研究成果発表と議論 協賛団体 活動紹介
10:40	主催者挨拶		
10:45	Session 4 社会実装に向けて		
12:00	Lunch (70min.)		
13:10	Session 5 DfAM, 4DFF 設計指針		
14:55	Session 6 価値創出に向けたプロセス, ユニーク形状		
16:10	Session 7 QOL, コミュニケーションの向上		
17:25	ライトニングトーク		
17:50	表彰式		
18:10	Closing Remark		

Conference on 4D and Functional Fabrication 2023

~ New Paradigm over 3D Technology ~

Technical Program

11月1日(水)

09:30 - 09:40

Opening Remark

4DFF2023 大会実行委員長 湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

09:40 - 10:30

基調講演

座長: 湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

KN-01 磁場駆動型 4D 造形
津守 不二夫

(九州大学) 1

10:30 - 11:45

Session 1

メタマテリアル・形状制御による価値創出

座長: 竹之内 崇 (三菱ケミカル株式会社)

10:30

OP-01 面心立方構造, 体心立方構造, およびダイヤモンド構造を有する原子模倣メタマテリアルの弾性異方性

細田 昌希, 鐘ヶ江 壮介, 奥川 将行, 尾方 成信, 小泉 雄一郎

(大阪大学大学院) 3

10:50

OP-02 硬さスイッチ: 局所加熱による低電圧動的硬さ制御構造体の提案

徳田 雄嵩, 小林 達也

(株式会社 KDDI 総合研究所) 7

11:10

OP-03 磁性体を活用したゲルレンズの外縁引張による焦点調節機構の検討

高橋 優河, 櫻井佑真, 渡邊洋輔, 小川純, エムディ ナヒン イスラム シブリ, 古川英光

(山形大学) 11

11:30

Session 1 オークサーズインタビュー(OP-01~OP-03)

12:55 - 14:40

Session 2

材料技術による価値創出

座長：高橋 茂樹 (山形大学)

12:55 - 13:25

招待講演

- IN-01** 軟質樹脂 3D プリントを用いた最終製品量産化への挑戦
 ～ワコール×キョーラク ふるるんメッシュパッド発売までの道のり～
 富田 知幸¹, 堀部 香里² (キョーラク株式会社, ²株式会社ワコール) 15

13:25

- OP-04** 難燃剤を用いた 3D プリンティング材料の高機能化
 中村 達人, 高根 涼, 酒井 敦史, 米澤 豊, 野村 和清 (株式会社 ADEKA) 25

13:45

- OP-05** 建設用 3D プリンタによる廃棄土壁由来の再生材料を用いた MEX 造形
 田住 梓¹, 鷲見 良¹, 岩本 卓也² (ND3M, ²株式会社 Polyuse) 29

14:05

- OP-06** 飲料テクスチャに触発された知識埋込みゼラチン識別子
 長瀬 駿介¹, 小川 純², 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム シブリ², 古川 英光²
 (¹山形大学, ²山形大学大学院) 33

14:25

Session 2 オーサーズインタビュー (OP-04～OP-06)

14:40 - 15:35

Session 3

新規プロセスによる価値創出

座長：木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

- OP-07** **Withdraw** 熱膨張素材による帆布の自己折手法の検討
 開元 宏樹, 笥 康明 (東京大学大学院)

14:40

- OP-08** 大型 3D プリンタによる「まちアイテム」制作を通じた Freeline.Tube 技法の検証
 荒井 将来, 高橋 美帆, 田中 浩也 (慶應義塾大学) 37

15:00

- OP-09** デジタルファブ리케이션による日本画表現に基づく彩色手法の検討
 溝脇 由女, 笥 康明 (東京大学大学院) 41

15:20

Session 3 オーサーズインタビュー (OP-08～OP-09)

15:35 - 15:55

4DFF 研究会協賛団体活動紹介

KJ ケミカルズ株式会社
 山形大学インクジェット開発センター
 株式会社 3D Printing Corporation
 三菱ケミカル株式会社

15:55 - 16:30

ショーケース: ショートプレゼンテーション

座長: 山岡 潤一 (慶應義塾大学)

- SC-01** 光造形 3D プリントによるシリカガラス製ジャイロイド構造体
 伊藤 慎一郎¹, 高木 祐輝¹, 藤野 茂² (1 京都産業大学, 2 九州大学) 45
- SC-02** ノニオン系ポリマーを用いた 3D プリンティング向け熱可塑性樹脂材料の機能化
 川上 結子, 中村 達人, 浅川 慕子, 野村 和清 (株式会社 ADEKA) 47
- SC-03** 館-三浦の多面体の 3D プリンティングによる造形と座屈変形の可視化
 嶋貫 研人, 富田 直, 梅本 和彦 (株式会社豊田中央研究所) 49
- SC-04** 回収ボトルキャップの再資源化および Fused Granular Fabrication による大型 3D プリンティング
 中野 雄太¹, 織茂 亜希子¹, 濱崎 トキ², 大日方 伸³
 (1 三菱ケミカル株式会社, 2 株式会社 Boolean, 3 株式会社積彩) 51
- SC-05** マルチスペクトルカメラによるインデックスマッピングとそれらのフルカラー 3D 造形
 内田 孝幸, 杉山 尚輝, 栗崎 駿, 柴田 太樹 (東京工芸大学) 53
- SC-06** ものづくりの満足感を向上させるための身体動作を入力とした 3D モデリングインタフェースの開発
 高木 祐輝, 伊藤 慎一郎 (京都産業大学) 57
- OP-07** バクテリアコロニーパターンのマテリアルデザインとしての利用法
 杉浦 真也¹, Matthew Waldman¹, 岩崎 秀雄², 山岡 潤一¹ (1 慶應義塾大学大学院, 2 早稲田大学) 61
- SC-08** 3D フードプリンタを用いた食感デザインの検証
 中須賀 絵莉¹, 若杉 亮介², 船井 翔³, 浅井 睦⁴, 斎藤 健太郎⁵, 山岡 潤一¹
 (1 慶應義塾大学大学院, 2 Byte Bites 株式会社, 3 東京大学大学院, 4 Metalium 合同会社, 5 株式会社 FabCafe Nagoya) 65
- SC-09** **Withdraw** 透明素材 3D プリント造形物と映像を用いた流体的視覚効果の探求
 松岡 佑馬, 田中 浩也 (慶應義塾大学)
- SC-10** **Withdraw** フルカラー LED とファブリケーションを組み合わせた新たな光源デザイン
 高橋 美帆, 田中 浩也 (慶應義塾大学)

16:30 - 16:40

実行委員会からの連絡

4DFF2023 大会副実行委員長 木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

11月2日(木)

09:20 - 10:40

4DFF2023 ショーケース

(ショーケースは会場のみ)

(SC01~SC08)

10:40 - 10:45

主催者挨拶

4DFF 研究会代表 田中 浩也 (慶應義塾大学)

10:45 - 12:00

Session 4

社会実装に向けて

座長: 常盤 拓司 (慶應義塾大学)

10:45

OP-10 触感を見せる - 3D ゲルプリンターを用いたやわらかアートの制作と展示-

白井 昭子¹, 渡邊 洋輔², 古川 英光²

(¹山形大学有機エレクトロニクスイノベーションセンター, ²山形大学) 69

11:05

OP-11 デジタル・ファブリケーションを利用した木材流通のデザイン

宮本 瑞基¹, 水野 大二郎²

(¹合同会社 Poictica, ²京都工芸繊維大学) 73

11:25

OP-12 食品残渣由来バイオマス配合樹脂による, 地域内資源循環型ものづくり検討

湯浅 亮平¹, 荒井 将来¹, 高橋 昭人², 田中 浩也¹

(¹慶應義塾大学, ²株式会社放電精密加工研究所) 77

11:45

Session 4 オーサーズインタビュー(OP-10~OP-12)

13:10 - 14:55

Session 5

DfAM, 4DFF 設計アプローチ

座長: 古賀 洋一郎 (株式会社 3D Printing Corporation)

13:10 - 13:40

招待講演

IN-02 熱を加えるだけで狙った立体に自動で変形する布「Steam Stretch」の設計技術

大嶋 泰介, 須藤 海

(Nature Architects 株式会社) 81

13:40

OP-13 3D プリンター造形物の異方性解析と機械特性への影響検討

駒場 澄香, 竹之内 崇

(三菱ケミカル株式会社) 83

14:00

OP-14 食感思考型 3D フードデザイン- 咀嚼ロボは音をどう調理するか

鈴木 悠人¹, 小川 純², 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム シブリ², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 85

14:20

OP-15 DfAM を考慮した授業および研究事例報告

松本 宏行¹, 本多 洸世², Cao Wenbo²

(¹ものづくり大学, ²ものづくり大学大学院) 89

14:40

Session 4 オーサーズインタビュー(OP-13~OP-15)

14:55 - 16:10

Session 6

価値創出に向けたプロセス, ユニーク形状

座長: 大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

14:55

OP-16 G-coordinator : G-code 生成の新たな手法とその可能性

谷口 朝洋

(大阪府立大学) 93

15:15

OP-17 ヘッド固定ステージ可動形プリンティングシステムによる凹面への付加造形と加飾の検討

蘇 健恒¹, 田沼 千秋², 田中 豊¹

(¹法政大学, ²法政大学マイクロナノテクノロジー研究センター) 97

15:35

OP-18 磁石を用いた組み換え可能なモジュール型ソフトセンサの提案

佐倉 玲, 香川 舞衣, 韓 燦教, 箕 康明

(東京大学) 99

15:55

Session 6 オーサーズインタビュー(OP-16~OP-18)

16:10 - 17:25

Session 7

QOL, コミュニケーションの向上

座長: 市原 政喜 (市原国際特許事務所)

16:10

OP-19 モアレ現象を応用した情報カムフラージュ技法と OOH メディアへの応用

木下 里奈¹, 大平 麻以², 田中 浩也²

(¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学) 103

16:30

OP-20 人の触り方を記録する「やわらかメモリー」の検討

田山 佳宗¹, 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム シブリ², 小川 純², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 107

16:50

OP-21 クラゲと水草の共生を表現するアクアリウムセラピー型浮遊培養地

茅原 琢斗¹, 小林 竜也², 小川 純², 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム シブリ², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 111

17:10

Session 7 オーサーズインタビュー(OP-19~OP-21)

17:25 - 17:50

Lightning Talk


司会: 青木 まゆみ (慶應義塾大学)

17:50 - 18:10

各賞受賞者発表 & Closing Remark

4DFF2023 大会副実行委員長 藤井 雅彦 (慶應義塾大学 SFC 研究所/inkcube.org)

4DFF 研究会協賛団体

- | | | | |
|---|--|------------------------------|---|
| 1 |  KJ Chemicals | KJ ケミカルズ株式会社 | https://www.kjchemicals.co.jp/ |
| 2 |  山形大学
<small>Yamagata University</small> | 山形大学インクジェット開発センター | https://inkjet.yz.yamagata-u.ac.jp/yu-ijc/ |
| 3 |  3D Printing Corporation | 株式会社 3D Printing Corporation | https://www.3dpc.co.jp/ |
| 4 |  MITSUBISHI CHEMICAL GROUP
<small>Science. Value. Life.</small> | 三菱ケミカル株式会社 | https://www.m-chemical.co.jp/ |

講演者紹介

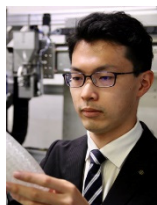
基調講演



津守 不二夫 (九州大学大学院 工学研究院 航空宇宙工学部門 教授)

1994年 東京大学工学部金属工学科卒業
 1996年 東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻修士課程 修了
 1999年 東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻博士後期課程 修了, 博士(工学)東京大学 学位授与
 2000年 大阪府立産業技術総合研究所 客員研究員
 2001年 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻 助手
 2004年 京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 講師
 2009年 九州大学大学院工学研究院機械工学部門 准教授
 2010年 フライブルク大学 Dept. Microsystems Eng., Visiting Researcher(JSPS 優秀若手研究者海外派遣)
 2020年 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 教授

招待講演



富田 知幸 (キョーラク株式会社 技術研究本部)

千葉大学工学部卒業後, キョーラク株式会社に入社。入社初年より軟質樹脂を用いた 3D プリント技術開発に従事し, 新技術・新商品の開発に注力している。「ぷるるんメッシュパッド」開発では, 自社の有する熱可塑性樹脂材料ノウハウ, 及び軟質樹脂 3D 造形技術の観点から製品開発に貢献, 量産立ち上げまで実施した。



堀部 香里 (株式会社ワコール マーケティング本部人間科学研究開発センター)

奈良女子大学生生活環境学部を卒業後, 株式会社ワコールに入社。人間科学研究開発センターに所属し, 人間科学的視点に基づいた製品開発や新技術開発に従事。近年は 3D プリント技術のインナーウェアへの転用に取り組み, 2023 年 3 月リリースの「ぷるるんメッシュパッド」を開発。



大嶋 泰介 (ネイチャーアーキテクト株式会社 CEO)

東京大学総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系博士課程単位取得退学。独立行政法人日本学術振興会特別研究員(DC1), 筑波大学非常勤研究員などを経て, 2017 年 5 月に Nature Architects を創業。メカニカル・メタマテリアル, コンピュータショナルデザイン, デジタルファブリケーションの研究に従事する。独立行政法人情報処理推進機構より未踏スーパークリエイター, 総務省より異能バージョンプログラム認定。



須藤 海 (ネイチャーアーキテクト株式会社 CRO)

東北大学理学部卒業(学士), 東京大学大学院総合文化研究科卒業(修士)。現在同研究科博士後期課程にて折紙工学・計算折紙の研究に従事。2018 年度未踏事業にて折紙技術を用いたプロダクト設計支援ツール「Crane」を谷道と共に開発。2017 年に Nature Architects にて創業メンバーとして参画。最高研究責任者(CRO)として研究開発に従事。

磁場駆動型 4D 造形

4D Printing for Magnetic Actuation

津守 不二夫

Fujio TSUMORI

九州大学

Kyushu University

【要約】

ゴムやゲルといった柔軟な素材内に磁性粒子を分散することで、そのまま外部磁場により変形するソフトアクチュエータとなります。このような磁場駆動型アクチュエータは電気配線も必要とせず、極めてシンプルに実現できます。このような特徴のため、体内で駆動する医療デバイスや、微細な駆動構造を作りこむための技術として有用です。この磁性粒子分散材料ですが、母材となる柔軟材料の選択次第で 3D プリント技術にそのまま使うことが可能です。さらにはプリント時、造形箇所に磁場を印加しておくことで、得られる構造の各所各所に磁気的な異方性を「プリント」することも可能です。そして、磁気異方性を適切に設定することで、同じ形状の造形体ながら、異なる運動を実現することができます。本講演では磁場駆動柔軟構造体とその 3D プリント(すなわち 4D プリント)方法について紹介します。駆動原理や設計手法について解説し、実際の駆動構造の動画を使った実例をお見せします。

【Abstract】

This presentation introduces the concept of magnetic field-driven soft actuators, achieved by dispersing magnetic particles within flexible materials such as rubber and gels. Such actuators will deform under external magnetic fields, offering a remarkably simple and electric-wire-free solution. These magnetic field-driven actuators could be applied in medical devices designed for in-body operation and in the creation of intricate actuation structures.

The proposed magnetic particle-dispersed materials can be directly utilized in 3D printing technology, depending on the selection of the flexible base material. Furthermore, during the printing process, by applying a magnetic field to the specific regions of the structure, it becomes possible to "print" magnetic anisotropy throughout the resulting architecture. By appropriately configuring the magnetic anisotropy, various motions can be achieved even maintaining the same printed shape.

In this presentation, we will provide an overview of the principles behind magnetic field-driven flexible structures and their 3D printing (referred to as 4D printing) method. We will discuss the actuation principles and design techniques involved, and show practical examples using videos demonstrating the operation of the actuation structures.

面心立方構造, 体心立方構造, およびダイヤモンド構造を有する 原子模倣メタ材料の弾性異方性

Elastic anisotropy of atom-mimetic metamaterials

with face-centered cubic, body-centered cubic, and diamond structures

細田 昌希¹, 鐘ヶ江 壮介¹, 奥川 将行¹, 尾方 成信², 小泉 雄一郎¹

Masaki HOSODA¹, Sosuke KANEGAE¹, Masayuki OKUGAWA¹, Shigenobu OGATA², Yuichiro KOIZUMI¹

¹大阪大学大学院工学研究科, ²大阪大学大学院基礎工学研究科

¹Graduate School of Engineering, Osaka University ² Graduate School of Engineering Science, Osaka University

【要約】

実在金属材料では, 同じ結晶対称性であってもその弾性異方性が大きく異なることが知られている. その弾性異方性の発現機構が明らかとなれば, メタ材料設計の新たな指針になると期待される. 本研究では, 実在物質と格子構造体の構造対称性と弾性異方特性の関係を明らかとすることを目的とし, 格子構造体の弾性異方性を有限要素法(FEM)により調べ, 実在金属の弾性異方特性を第一原理計算結果データベース(Materials Project)を用いて調べた. 結果として, 面心立方(FCC)型格子構造体は体心立方(BCC)金属のような弾性異方性を示した. 一方, BCC型格子構造体はFCC金属のような弾性異方性を示した. これらの関係から, 弾性異方性は, 材料の弾性変形時の局所的な内部エネルギー変化の大きさによって決まると推測される.

キーワード: 面心立方構造, 体心立方構造, ダイヤモンド立方構造, 弾性異方性, 格子構造体, メタ材料

【Abstract】

It is known that the elastic anisotropy of real metallic materials varies greatly even if they have the same crystalline symmetry. Elucidation of the mechanism of elastic anisotropy is expected to provide a new guideline for designing metamaterials. In this study, we aim to clarify the relationship between the structural symmetry and elastic anisotropy of real materials and lattice structures. As a result, face-centered cubic FCC-type lattice structures exhibit elastic anisotropy like body-centered cubic BCC metals. On the other hand, BCC-type lattice structures exhibit elastic anisotropy like FCC metals. From these relationships, it is inferred that elastic anisotropy is determined by the magnitude of the local internal energy change during elastic deformation of the material.

Keywords: face-centered cubic structure, body-centered cubic structure, diamond cubic structure, elastic anisotropy, lattice structure, metamaterial

1. 背景・目的

材料の構造と特性の関係の理解とそれに基づく構造の制御は, 新材料創成の基礎となっている. 一方, 3Dプリンタ技術の発達により, サブミクロレベルからメートルレベルでの構造の制御が可能となった. 3Dプリンタ技術と, これまでの物質科学や材料科学で得られてきた原子レベルの構造と特性に関する知見を融合した格子構造の設計により, その物質が本来有さない特性を発現させることが, 新しいメタ材料創成手法として期待される[1-3]. 本研究では, その基礎として, 結晶性材料の電子構造と弾性特性の関係を元に, 材料のマクロな形状の制御で弾性特性を制御することを試みる. これにより, 特定の元素組成でしか発現し得なかった力学的機能特性を, 他の元素で発現させることが可能と期待される.

結晶性材料の力学特性, 特に基本的な弾性特性とその異方性は, 結晶構造と原子間結合に支配されていると考えられる. しかしながら, 結晶構造と原子間結合の組み合わせと力学特性とその異方性との関係は未解

明である. アルミニウム(Al)と銅(Cu)はともに面心立方(FCC)構造を安定構造とするが, これらの弾性異方性は大きく異なる[4]. この違いを再現するメタ材料の設計は, 原子間結合を模倣した力学機能発現の材料設計を可能とすると期待される.

これまでに, 第1近接結合のBall-StickモデルでFCC構造とBCC構造の格子構造体を作製して実験によって弾性異方性を評価した[5]. その結果, 第1近接結合のみのFCC格子構造体はBCC金属の代表であるCrの特性に近い値を示した. 一方で, BCC格子構造体はFCC金属の代表であるCuの特性に近い特性を示した. このことから, FCC格子構造体はBCC金属のような, BCC格子構造体はFCC金属のような弾性異方性を示すことが示唆された.

本研究では, 上記の格子構造体と実在物質の弾性特性の対応関係を, より多量の構造体と物質に対して調査し, 一般性を検証することを目的とした. そのため, 詳細については次項の方法に示すが, 格子構造体に対しては有限要素法を用い, 実在物質に対しては化合

物を含めて物質および材料の第一原理計算結果のデータベース Materials Project[6]を用い、その弾性特性を計算、調査することで、より多量のデータを取得した。

2. 方法

格子構造体の 3D-CAD で Ball-Stick モデルを作製した。図 1 に設計した格子構造モデルを示す。格子構造の対称性は、FCC, BCC およびダイヤモンド構造の 3 つとした。それぞれの対称性を持つ物質を FCC-Lattice, BCC-Lattice, DIA.-Lattice と呼ぶこととする。第 1 近接結合原子間のみには円柱梁を設置した。球半径/格子定数の比および円柱梁半径/球半径の比をそれぞれ 1/3 ~ 1/15 および 1/1 ~ 1/4 の範囲で変化させ、計 624 条件のモデルを作製した。作成した格子構造モデルにて一軸圧縮と純粋剪断の FEM シミュレーションを行い、縦弾性率 E (Young 率), 横弾性率 (せん断弾性率) G , およびポアソン比 ν を計算した。得られた弾性特性から式 (1) を用いて弾性異方性としてゼナー比 A_z を評価した。

$$A_z = \frac{2(1 + \nu)}{E} G \quad (1)$$

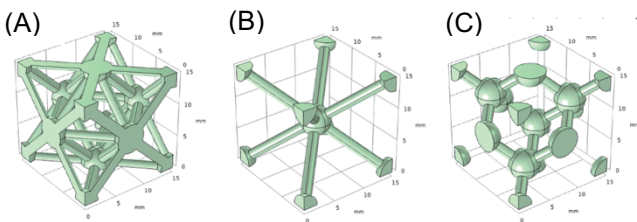


図 1. 3D-CAD で設計した格子構造モデル (A) FCC-Lattice, (B) BCC-Lattice, (C) DIA.-Lattice.

結晶性材料の弾性異方特性は、第一原理計算データベース Materials Project [6]を用いて調べた。0 K において立方晶対称の結晶構造が安定となる物質のうち、安定構造の空間群が $Fm\bar{3}m$, $Im\bar{3}m$, $Fd\bar{3}m$ に分類される物質を抽出した。それぞれの対称性を持つ物質を FCC-Matter, BCC-Matter, DIA.-Matter と呼ぶこととする。各物質の弾性係数 s_{11}, s_{12}, s_{44} から、式 2~式 5 を用いて A_z を計算した。格子構造体と実在物質の A_z を比較し、構造対称性との関係を調べた。

$$E = \frac{1}{s_{11}} \quad (2)$$

$$G = \frac{1}{s_{44}} \quad (3)$$

$$\nu = -\frac{s_{12}}{s_{11}} \quad (4)$$

$$A_z = \frac{2(1 + \nu)}{E} G = \frac{2(s_{11} - s_{12})}{s_{44}} \quad (5)$$

3. 結果

格子構造体の異方性プロットを図 2(A)に示す。また、特徴的な構造体の可視化像を図 2(B1-C4)に示す。全ての構造において、 $A_z > 1$, $\nu > 0$ となった。また、円柱梁が細くなるにつれて、 ν は大きくなった。 ν が 0.2 以下の場合には、どの結晶構造でも ν が大きくなるにつれて同様の線形の関係で A_z が増加した。FCC-Lattice と Dia.-Lattice は、 ν が以上の場合でも同様の線形の関係で A_z が増加した。一方、BCC-Lattice では、 ν の増加に対する A_z の増加量がより大きく、 ν が 0.5 に漸近するに従ってより急峻に A_z が増加し、最大で $A_z = 676$ に達した。結果として、BCC-Lattice には $A_z > 10$ となるような、弾性異方性が高い構造が多数存在することが示された。一方、FCC-Lattice および DIA.-Lattice は $A_z < 10$ の低い弾性異方性のみを示した。DIA.-Lattice は FCC-Lattice と比較して高 ν を持つ構造が多い。

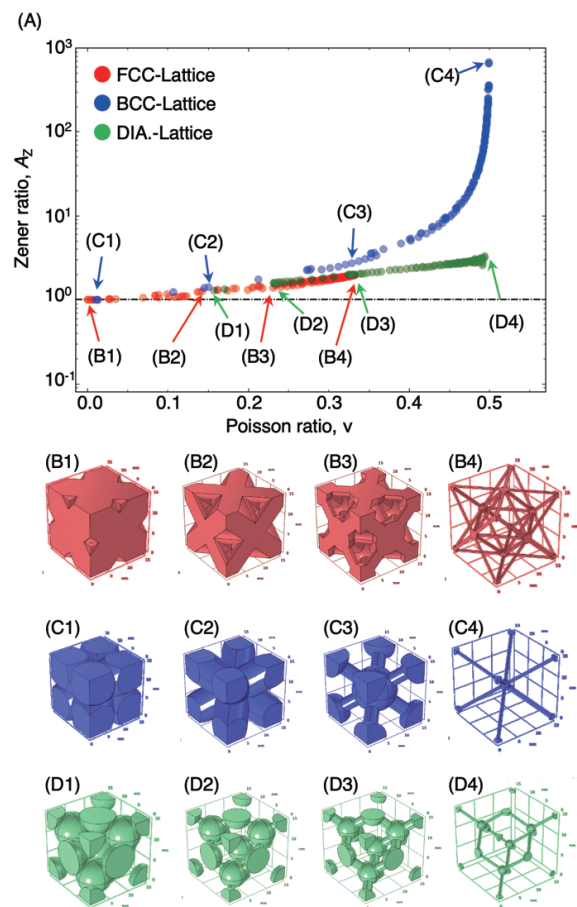


図 2. (A) 格子構造体の弾性異方性プロット, (B) FCC-Lattice のユニットセルの概形, (C) BCC-Lattice のユニットセルの概形, (D) DIA.-Lattice のユニットセルの概形.

図3に実在物質の異方性プロットを示す。格子構造体とは異なり、 $A_z < 1$ となる物質が存在する。どの構造でも $\nu = 0.4$ 以下では、 ν と A_z が線形の関係をもつ傾向が見られた。一方、FCC-Matter でのみ、 ν が 0.5 に漸近するに従ってより急峻に A_z が増加し、最大で $A_z = 676$ を取った。結果として、FCC-Matter には $A_z > 10$ となるような、弾性異方性が高い構造が多数存在する。一方、BCC-Matter および DIA.-Lattice は $A_z < 10$ の低い弾性異方性のみを示した。

4. 考察

格子構造体と実在物質における ν と A_z の関係は、FCC-Matter は BCC-Lattice と、BCC-Matter は FCC-Lattice と、DIA.-Matter は DIA.-Lattice と類似することが示唆された。メタマテリアルと結晶性材料の弾性異方性の対応関係は、弾性変形時のエネルギー変化が大きい場所が両者で対応していることが理由であると考えている [1]。メタマテリアルの弾性係数は弾性変形にともなう格子エネルギー変化によって決定される。一方、結晶性材料の弾性係数は弾性変形にともなう電子のエネ

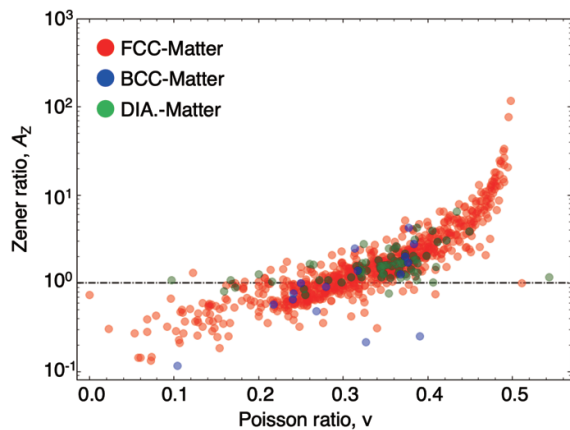


図 3. Materials Project データベースの第一原理計算結果データに基づく実在物質の弾性異方性プロット。

ルギー変化によって決定される。これらの変形機序を考えると、弾性変形にともなう局所的なエネルギー分布が同様であると、その弾性異方性も類似となることが推察される。

5. 展望

図4に、BCC-Lattice および FCC-Matter の弾性異方性を比較して示すとともに、特徴的な弾性異方性を持った格子構造体の単位胞および実在金属の Fermi 面も併せて示す。

BCC-Lattice および FCC-Matter の弾性異方性(図4(A))を比較すると、BCC-Lattice は1つの曲線状にプロットされるのに対し、FCC-Matter には弾性異方性のバラつきが見られる。これらの分布の違いとして、FCC-Matter を構成する原子の局所的な結合力の差であると

考えている。

また、格子構造体の単位胞(図4(B1-B4))および実在金属の Fermi 面(図4(C1-C4))を比較する。MnSiRh₂ の Up-spin と ScB₁₂ の Fermi 面は、 $\langle 111 \rangle$ 方向にネックが存在することが見受けられる。この Fermi 面のネック方向が格子構造体の梁を配置している方向と対応していることから、弾性異方性の対応関係が現れているのではないかと考えられる。

一方、NdMg₃ の Fermi 面はブリュアンゾーン境界で複雑に交差している。このことが BCC-Lattice との対応関係とは遠い弾性異方性を示す一つの理由ではないかと考えられる。

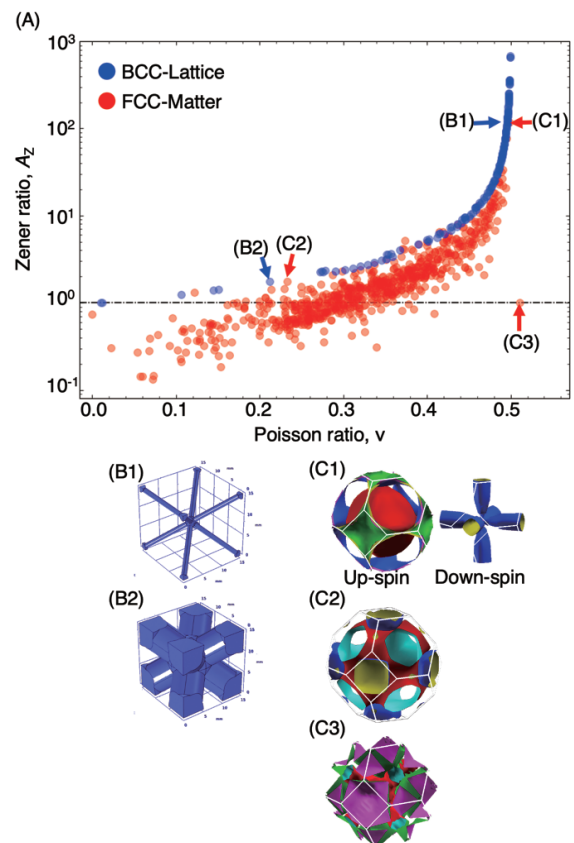


図 4. (A) BCC-Lattice と FCC-Matter の弾性異方性の対応関係、(B) BCC-Lattice の単位胞、(C1) MnSiRh₂, (C2) ScB₁₂, (C3) NdMg₃ の Fermi 面。

今後は、弾性変形時のエネルギー分布の変化と弾性変形時の Fermi 面の変化を調べ、弾性異方性の発現機構の解明を目的に研究を進めて行く。弾性変形時の Fermi 面を比較することで、どのような電子構造がこの弾性異方性の分散に寄与しているのかを確認し、その構造を格子構造として応用することで BCC-Lattice の弾性異方性制御に活用できると期待される。

さらには、本研究の成果は、形状記憶合金や超弾性合金の相転移における電子構造の変化と弾性異方性の変化との関係から応力誘起相転移や熱誘起相転移を発現する形状記憶メタマテリアルや超弾性メタマテリアルや力学的メタマテリアル[7]の 3D プリント、すなわち

4Dプリントのための構造設計を示すための発展することが期待される。

参考文献

1. 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, *Journal of 4D and Functional Fabrication*, 1 (2020) 1-8.
2. 小泉雄一郎, 鐘ヶ江壮介, 藤田武志, 粉末床熔融結合型金属付加製造による材料組織制御と格子構造体の創製, *セラミックス*, 55 (2020) 10–14.
3. 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 小泉雄一郎, 代表体積要素モデルを用いた有限要素法による 多軸双安定構造の大変形挙動解析, 27, (2022), 2–6.
4. S. Ogata, J.Li, S.Yip, Ideal Pure Shear Strength of Aluminum and Copper, *Science* 298 (2002) 807.
5. 細田昌希, 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 尾方成信, 小泉雄一郎, “面心立方構造、体心立方構造、およびダイヤモンド構造を有する格子構造体と結晶性材料の弾性異方性, 日本金属学会 2023 年秋期(第 173 回)講演大会, 講演番号 P52【優秀ポスター賞】.
6. A. Jain, S. P. Ong, G. Hautier, W. Chen, W. D. Richards, S. Dacek, S. Cholia, D. Gunter, D. Skinner, G. Ceder, and K. A. Persson, Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation, *APL Materials*, 1 (2013) 011002.
7. H. Nagayama, S. Kanegae, M. Hosoda, M. Okugawa, Y. Koizumi, Thermally induced phase transforming cellular lattice driven by bimetal beams, *MRS Adv.*, 7 (2022) 701–705.

硬さスイッチ: 局所加熱による低電圧動的硬さ制御構造体の提案

Stiffness Switch: Proposal of a Stiffness Controllable Structure by Low-Voltage Pinpoint Heater

徳田 雄嵩¹, 小林 達也¹

Yutaka TOKUDA¹, Tatsuya KOBAYASHI¹

¹株式会社 KDDI 総合研究所

¹KDDI Research, Inc.

【要約】

低融点液体金属や熱可塑性樹脂等の熱を用いた硬さ制御技術がソフトロボティクスやヒューマンコンピュータインタフェースの分野で注目されている。熱を用いた硬さ制御技術の問題として構造体の加熱に要する時間やエネルギー効率が挙げられる。本研究では応力が集中する構造体の最小要素を局所的に加熱することで硬さを効率的に制御できる新たな動的硬さ制御構造体を提案する。カーボンナノマテリアル発熱塗料で試作した小型ジュール熱ヒーターを3D プリントした H 形鋼構造の支柱に組み込み、局所的に加熱し軟化させる事で構造体の座屈強度を 10V 以内の低電圧下で効率よく持続的に制御可能である事を実証した。

キーワード: 発熱塗料, カーボンナノマテリアル, 硬さ, 熱可塑性樹脂, H 型鋼, ジュール熱

【Abstract】

Built-in stiffness control of 3D printed structures using heat has been difficult due to high voltage requirements and low heating efficiency. We propose a new dynamic stiffness controlled structure whose hardness can be efficiently modulated by heating only the part of the structure where stress is concentrated. As a proof-of-concept, we have fabricated a small Joule heater using carbon nanomaterial heating paint and demonstrated efficient dynamic stiffness control method by attaching the heater to the pillar of a 3D printed H-beam structure. We experimentally showed that the proposed structure can sustainably control the buckling strength and thus stiffness with a voltage of less than 10 V.

Keywords: heating paint, carbon nanomaterial, stiffness, thermoplastic resin, H-shaped beam, Joule heating

1. 序論

熱溶解積層方式(FDM)の 3D プリント技術や低温熱可塑性樹脂の普及とともに、硬さを柔軟に調節できる機能性構造体が近年注目されている。Groeger らは、導電性銀ナノインクで印刷したフレキシブルヒーターをポリカプロラクトン(PCL)で3Dプリントしたモデル内部に挿入し加熱する事で硬さを動的に制御可能な HotFlex を提案している [1]。また Taghavi らは導電性 PLA を用いる事でヒーター要素を3D モデル内部に直接印刷し、硬さを動的に制御可能な3D プリント技術を提案している [2]。これら従来の熱を用いた 3D プリントモデルの硬さ制御には高抵抗値を持つ熱回路に電流を流し加熱するジュール熱ヒーターが用いられてきたが、熱可塑性樹脂が軟化されるガラス転移温度まで 3D モデルを加熱するのに高電圧と長時間の加熱サイクルを要する。また 3D プリントモデルの熱塑性変形により、圧縮後元の形状に戻すことができず、硬さを持続的に変化させ繰り返し用いる事は困難である。

これらの問題を解決するため、本研究では高導電性と優れた熱伝導性を合わせ持つカーボンナノマテリアル発熱塗料に着目した。低電圧で高速に加熱可能な新たな小型ジュール熱ヒーターを設計する事で、応力が集中する構造要素をピンポイントで加熱する事が可能となり、効率的に硬さを制御できると考えられる。また加

熱しない他の構造要素を弾性と形状記憶特性を持つ素材で構成する事で、持続的に硬さを制御可能な新たな動的硬さ制御構造体の実現可能であると考えられる。以下では、概念実証として H 型鋼を参考に考案した動的硬さ制御機構、硬さスイッチを紹介し、カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターと硬さスイッチの実装方法および加熱速度と硬さ変化の検証結果、そしてアプリケーションについて述べる。

2. 硬さスイッチ

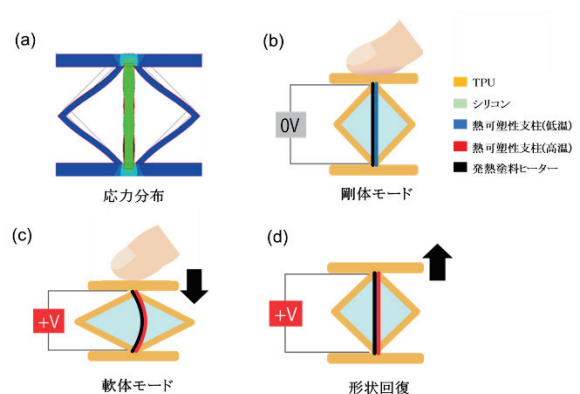


図 1. 硬さスイッチ概念図

少ない材料と重さで、降伏、曲げ、振動に効果的に

耐えられる構造要素として H 型鋼が建築分野で良く用いられている。図 1(a)が示すように、H 形鋼を含む構造体では応力分布が中央の柱に集中するため、H 型構造を熱可塑性樹脂で成型すると、構造物全体を加熱するのではなく、柱要素のみをピンポイントで加熱することで、硬さを効率的に制御できると考えられる。図 1(b)~(d)に H 型構造体をベースに考案した硬さスイッチの動作原理を示す。硬さスイッチは、熱可塑性樹脂からなる H 型構造体と小型ジュール熱ヒーターそして形状回復特性を付加するための弾性フレームとシリコン素材から構成された複合材料で構成されている。無電圧下では、H 型構造により鉛直荷重に対して高い剛性を示すが(図 1(b))、ヒーターに電圧を印可し柱を加熱する事で、H 型構造の座屈強度が下がり、軟体に移行する(図 1(c))。弾性フレームとシリコンが構造体を支えることで、負荷がなくなると軟化した柱が元の形状に弾性力で戻り(図 1(d))、温度が下がると再び高い剛性を発揮するため、形状を損なわず持続的に硬さを制御可能であると考えられる(図 1(b))。

3. 小型発熱塗料ヒーター

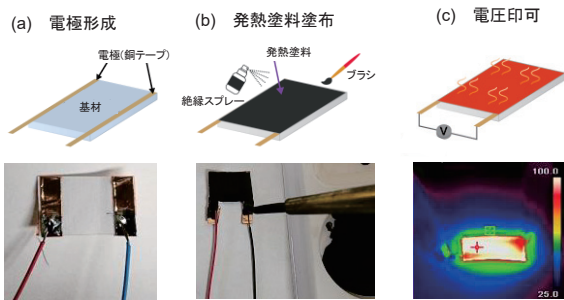


図 2. 発熱塗料を用いたヒーターの試作工程

3.1 カーボンナノマテリアル発熱塗料

低電圧で熱可塑性樹脂を溶融させるのに十分な熱量を発生できる新たなジュール熱ヒーターを実装するため、カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターの製造方法を検討した。グラフェンやカーボンブラックを含むカーボンナノマテリアル発熱塗料は、高い導電性、熱伝導性、柔軟性そして遠赤外線放射能力を有するため建物の床や壁 [3,4]や曲面状の製品(椅子、パイプ、浴槽など)[5]に暖房機能を組み込む用途で広く使用されてきた。発熱塗料は高い導電率($30 \Omega/\text{square}$)を有し、電極間に均一に塗布するだけ塗布領域を均一に加熱するヒーターに変える事ができる。従来の導電性インクや電線を用いたジュール熱ヒーターでは複雑な熱回路パターンを加熱領域に描く必要があったため、小型で低電圧で駆動するヒーターを実装する事は困難であった [1]。また、導電性 PLA は抵抗値が非常に高いため($> k\Omega$)、樹脂を溶融させるのに十分なジュール熱を発生させるには 30V 以上の高電圧が必要である [2,6]。Markevicious らは、発熱塗料を用いた美術品保存用の大型ヒーター(0.25 m \times 0.16 m)の作成方法と加

熱速度を報告しているが [6]、発熱塗料を用いた 3D プリントモデルの硬さ制御に応用した事例はまだ報告されていない。

3.2 小型ヒーターの試作・検証

入手可能ないくつかの発熱塗料製品の中から、350~450 Ωm の低い抵抗率を持ち、柔軟性を有するポリウレタンベースの発熱塗料、Carbo e-Therm PUR 70-350B.01 を検証した [5]。本製品は、導電性を失うことなく、水で 25 重量%まで希釈することができ、また銅箔テープ、電線、銀導電性インク等様々な導電材料を電極材として使用することができる。電極との接触抵抗を最小限に抑えるため、電極材と加熱基材共に発熱塗料で均一に塗装することが推奨されている。一般的な塗料と同様に、ガラス、FR4、木材、プラスチック、紙など様々な素材に発熱塗料を塗布することができる。特に、不織布や滑らかな紙等を基材に用いると特に高い導電性が得られ、かつ曲げても高い導電性が維持されるため、柔軟なヒーターの基材として最適であると考えられる。発熱塗料は 3D プリントモデル表面に直接塗布し加熱できる事が確認されたが、3D プリント表面と加熱塗料の接着力が弱く、曲げると加熱塗料の塗膜に割れが生じ、導電性が失われることがわかった。本研究では柔軟性が高く、高い導電性を有する紙を基材に用いる事で、硬さスイッチの支柱部の座屈に適合した小型紙ヒーターを実装する事にした。

図 2 に小型紙ヒーターの試作工程を示す。Groeger ら [1] が報告した導電性銀ナノインクヒーターと比較するため、報告にあったサイズと同じ 20 mm \times 10 mm のヒーターを作製した。厚さ 76.8 μm の標準的なコピー用紙をカッターナイフで切断し、短辺側に幅 3 mm の銅箔テープを電極として貼り付けた。(図 2(a))。2 つの電極間の紙の幅は 2 cm である。直径 32 AWG の耐熱ラッピングワイヤーを銅電極フィルムにはんだ付けする事で配線を固定した。

疎水性のある銅電極表面に発熱塗料を塗布するため、発熱塗料は水で薄めずに高粘度(3~4 Pa \cdot s)を保ったまま使用した。図 2(b)に示すように標準的な絵の具筆を使って、銅箔電極、コピー用紙を均一に塗装した。また、紙の柔軟性を保つため、電線を貼り付けた片面のみを塗装した。発熱塗料の乾燥時間は室温で 50 分であるが、ヒートガンを使えば 10 秒程度で乾燥でき、高い導電性が得られることがわかった。筆塗りによる厚さと導電性の変化を検証するため、5 つの同サイズの紙ヒーターを試作し、膜厚計(Wintact WT230)とマルチメーター(KAIWEETS KM601)を用いて、発熱塗料の厚さと抵抗値を測定した。これらの試験サンプルの乾燥後の発熱塗料の平均厚さは $54.6 \pm 9.2 \mu\text{m}$ 、抵抗値は $18.8 \pm 4.5 \Omega$ であった。発熱塗料を接触による傷や水などから保護するために、発熱塗料表面を耐熱絶縁シリコンスプレーでコーティングした(図 2(b))。最後に

電極に直流電圧を印可し、発熱分布をサーモカメラで検証したところ電極間が均一に加熱されている事が確認された(図 2(c)).

3.3 加熱速度の評価

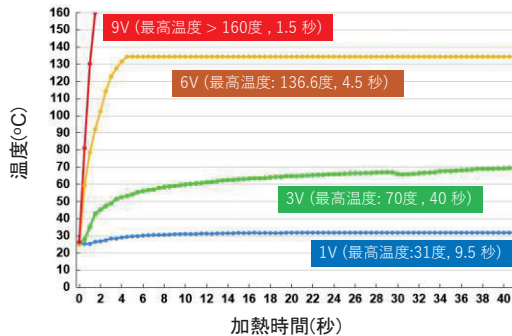


図 3. 異なる印可電圧におけるヒーターの温度変化

作製した小型紙ヒーターの異なる電圧下での温度上昇速度を検証した。直流安定化電源 (Wanptek WPS300) を用いて、一定電圧を電極に印可した状態で、サーモグラフィカメラ (HIKMICRO B10) を用いて、0.5 秒間隔で紙ヒーター表面の温度変化を計測した。図 3 のグラフが示すように 20 mm × 10 mm サイズの紙ヒーターの温度は 9 V では数秒以内にサーモグラフィカメラが測定できる最大温度の 160 度まで上昇した。ヒーターは 6 V で 4 秒後に 136 度、3 V で 60 秒後に 70.5 度、1 V では 20 秒後に 32.5 度の最高温度で安定した。Greoeger らの報告によると、銀ナノインクヒーターは 9 V の電圧下で 60 度の温度に達するのに 11 秒を要しており、銀ナノインクヒーターと比較して発熱塗料を用いた紙ヒーターは約 22 倍の加熱速度を持つ事が確認された。ポリウレタン系加熱塗料の制御可能な最高温度は 120 度で、PLA 等が軟化するガラス転移温度は 60 度～70 度の範囲にあるため、3 V ～ 9 V の電圧範囲であれば、硬さスイッチのヒーターとして十分に持続的に機能すると考えられる。

4. 硬さスイッチ概念実証

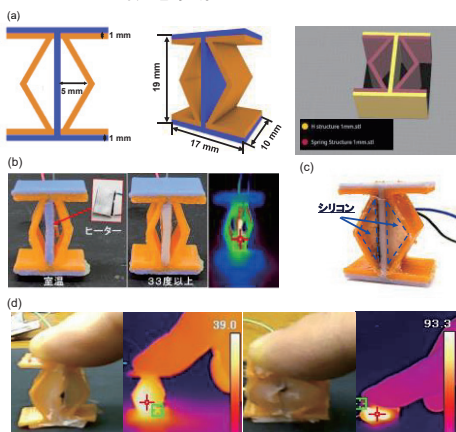


図 4. H 型硬さスイッチ試作機

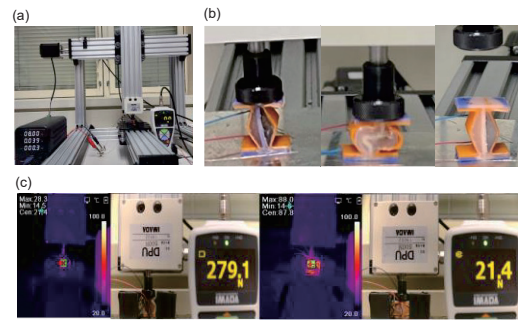


図 5. 硬さスイッチ圧縮試験

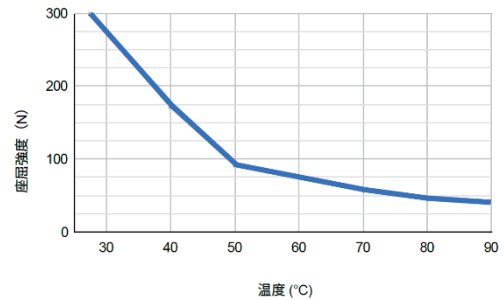


図 6. 加熱による座屈強度変化

4.1 硬さスイッチの試作

概念実証として、デュアルエクストルーダーを有する FDM 3D プリンター (Raise 3D Pro3 plus, Snapmaker J1) を用いて、硬さスイッチの試作を行った(図 4(a)). フィラメントの充填率を 100% に設定し、TRONXY サーモミック PLA を用いて H 型構造部を印刷し、支柱の加熱状態を可視化できる設計にした。図 4 (b) に示すように、室温では PLA の柱の色は青色であるが、33 度以上の温度に加熱されると徐々に白色に変色するためヒーターが機能しているかどうかを目視で確認する事ができる。H 形構造の大きさは、17 mm (W) × 19 mm (H) × 10 mm (D) である。H 型構造の印刷と並行して、弾性フレーム部を Polyflex TPU95 を用いて成型した。弾性フレームと H 形構造部の厚みは 1 mm で、支柱と弾性フレームの間の最大距離は 5 mm である。次に 13 mm × 10 mm サイズの紙ヒーターを作成し、ヒーターの塗装面側を両面熱転写テープを用いて支柱に貼り付けた。最後に図 4 (c) に示すように、柱と弾性フレームの間にできた二つの三角形状の空間に形状回復素材としてシリコン (Ecoflex00-35 ファスト) を注入し乾燥させた。室温では高い剛性を示していたが、8 V の電圧をヒーターに印可し支柱部をガラス転移温度(65 度)以上の温度で 30 秒程加熱したところ、人差し指で押さえても容易に圧縮出来るほど軟らかくなり、離すと元の形状に数秒で戻る事が確認された(図 4 (d)).

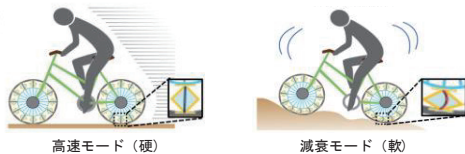
4.2 硬さスイッチ機能検証

次に CNC マシン (Avalontech C-beam マシン) とデジタルフォースゲージ (IMADA ZTS-DPU-500N) を用いて

実装した圧縮試験機を用いて硬さスイッチの座屈強度の温度変化を測定した(図 5(a)(b)). 室温である 27 度から最大 90 度の温度範囲で 10 度毎に柱の温度を変えながら 試作した硬さスイッチの座屈強度を計測した. 図 5(c)および図 6 のグラフが示すように, 27 度での硬さスイッチの座屈強度は 279.1 N であったが, 8 V の電圧で柱をヒーターで加熱する事で座屈強度が 27 度から 50 度の間で一定速度で低下し, 50 度以上では低下速度が緩やかになる事が確認された. 柱の温度が 90 度に至ってから 30 秒後には最小の 21.4 N まで座屈強度が低下し, 10 mm まで圧縮できる事が確認された. シリコンと弾性フレームの弾性特性と PLA の加熱による形状記憶効果により, 圧縮試験機のプローブを上昇させたところ, すぐに元の形状に回復し, 室温で強い座屈強度 (163N) を回復した. 本結果から硬さスイッチは PLA のガラス転移温度 (約 65 度) よりも低い温度範囲においても硬さを劇的に低下させることができるため, 低電圧で硬さを効率よく加熱制御する方法として有効であると考えられる.

5. アプリケーション

(a) 適応型弾性車輪



(b) マルチ弾性タッチペン

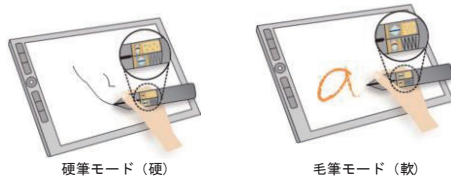


図 7. 硬さスイッチ応用イメージ

硬さスイッチの応用イメージとして, 弾性セル構造を利用したエアスタイヤの機能拡張が考えられる(図 7(a)). エアスタイヤは地面が滑らかであればスムーズに走行可能であるが, ゴムタイヤと比較してサスペンション能力が低いいため, 凹凸のある道路では振動が吸収されず快適な走行が難しい. 硬さスイッチを弾性セル構造に応用する事で, 道路状態に応じて自転車のタイヤの弾性を動的に制御可能な適応型弾性車輪が実現でき, 平面では硬さスイッチの硬度を上げ高速で疾走し, 凸凹した山道などでは硬さスイッチを軟らかくし, 振動を減衰しながら快適な走行を支援できると考えられる.

また, 2種の異なる硬さを持つ素材の硬さを硬さスイッチで動的に複合し伝達する事で, 多様な弾性が表現できるマルチ弾性タッチペンへの応用も考えられる(図 7(b)). 硬さスイッチが硬い状態では直列に繋がった素材の硬さが減衰する事なく伝わり, 硬さスイッチが軟化した状態では, 素材の弾性力が吸収され素材の弾性を

減衰または無視することができる. 複数の硬さスイッチの状態を制御する事で, 動的にペンの硬さを硬筆モードや毛筆モード等のように切り替える事ができ, 様々な描画ツールの弾性特性を再現した触覚フィードバックが得られる硬さ制御タッチペンが実現できると考えられる.

6. 結論

従来の加熱方式による3Dプリントモデルの硬さ制御は, 熱可塑性樹脂の塊を軟化させるために高電圧と長い加熱サイクルが必要であり, また加熱により弾性が失われるため, 低電圧下で持続的に硬さを制御する事が困難であった. そこで本研究では高導電性カーボンナノマテリアル発熱塗料を用いた小型ヒーターと形状回復機能を持つH型構造体を複合させた新たな熱構造体を考案し, 低電圧で持続的に硬さを制御できる硬さスイッチを提案した. 応力が集中するH型構造の柱のみをカーボンナノマテリアルを用いた小型ヒーターで局所的に加熱する事で, 硬さ制御の効率を向上できる事を実証した. また, 他の構造要素を弾性素材で設計し, 加熱による弾性損失を避ける事で, 圧縮後の大きな歪みからも元の形状に自律的に戻り, 持続的に機能する硬さ制御デバイスが実現可能である事を実証した.

参考文献

1. D. Groeger, E. Chong Loo, and J. Steimle, "HotFlex: Post-Print Customization of 3D Prints Using Embedded State Change", CHI'16 (2016). pp.420-432.
2. M. Taghavi, T. Helps, B. Huang, and J. Rossiter, "3DPrinted Ready-To-Use Variable-Stiffness Structures", IEEE Robotics and Automation Letters (2018), Vol.3, No.3, pp.2402-2407.
3. Thermoheld Global.<https://www.thermoheld.global>. (2023年9月10日閲覧)
4. Graphen Star. "Examples of real installations of heating G Therm coatings" <https://graphen-star.com/installation>. (2023年9月10日閲覧)
5. Carbo e Therm Cosmopolitan Inc. http://www.cosmopoltn.co.jp/product/carbo_e-therm.html. (2023年9月10日閲覧)
6. K. Moon, H. Lee, J. Kim, and A. Bianchi. "ShrinkCells: Localized and Sequential Shape-Changing Actuation of 3D-Printed Objects via Selective Heating", UIST'22 (2022). No.8, pp. 1 - 12.
7. T. Markevicius, R. Furferi, N. Olsson, H. Meyer, L. Governi, M. Carfagni, Y. Volpe, and R. Hegelbach. "Towards the Development of a Novel CNTs-Based Flexible Mild Heater for Art Conservation", *Nanomaterials and Nanotechnology* (2014). No.4.

磁性体を活用したゲルレンズの外縁引張による焦点調節機構の検討

Focus adjustment mechanism of gel lens by outer edge tension utilizing magnetic soft materials

高橋優河¹, 櫻井佑真¹, 渡邊洋輔¹, 小川純¹,
エムディ ナヒン イスラム シブリー¹, 古川英光¹

Yuga Takahashi¹, Yuma Sakurai¹, Yosuke Watanabe¹, Jun Ogawa¹,
MD Shiblee Nahin Islam¹, Hidemitsu Furukawa¹

¹山形大学工学部

¹Faculty of Engineering, Yamagata University

【要約】

遠近両用眼鏡や多焦点眼内レンズは、複数の焦点位置で結像するような静的な構造をレンズに導入することで装用者のQoLを向上している。一方で我々は、柔軟なレンズとそれを変形させる構造を機構全体として有していれば、連続的に焦点調節が可能なレンズが開発できると考えた。そこで本研究では、柔軟なハイドロゲルレンズの外縁に磁性ソフト材料を採用し、外部磁場によって連続的に焦点位置を調節可能とする機構を開発する。ゲルレンズは、含水率約90%のジメチルアクリルアミドゲルの組成をベースに作製し、成形したゲルレンズの外縁に、磁性粒子を添加した柔軟材料を接着した。外部磁場によってレンズを変形させ、焦点調節が可能であることを見出した。

キーワード: ゲル, レンズ, 磁性体, 焦点調節, 柔軟材料

【Abstract】

Bifocals and multifocal IOLs improve the QoL of the wearer by introducing a static structure to the lens that allows the lens to form images at multiple focal positions. On the other hand, we thought that a lens that enables continuous focus adjustment could be developed if it had a flexible lens and a structure that deforms it as a whole mechanism. In this study, we employ a magnetic soft material on the outer edge of a flexible hydrogel lens to develop a mechanism that enables continuous adjustment of the focal position by an external magnetic field. The gel lens was fabricated based on the composition of dimethylacrylamide gel with a water content of approximately 90%, and a flexible material with magnetic particles added was bonded to the outer edge of the molded gel lens. It was found that the lenses could be deformed by an external magnetic field to adjust the focus.

Keywords: Gel, lens, magnetic material, focus adjustment, soft material

1. 研究背景・目的

遠近両用眼鏡や多焦点眼内レンズ[1]は、複数の焦点位置で結像するような静的な構造をレンズに導入することで装用者のQoLを向上している。例えば、回折格子によって光波の干渉を制御し、複数の焦点を与える回折型の多焦点眼内レンズや、異なる屈折率を交互に

配置し、屈折力を制御した屈折型眼内レンズが開発されている。

一方で、眼球内の水晶体は、周囲の毛様体筋の緊張と弛緩をチン小帯經由で伝播し、水晶体の厚みを変化させることで、連続的に焦点距離を調節している。このように焦点距離を連続的に調節する機構を模倣する

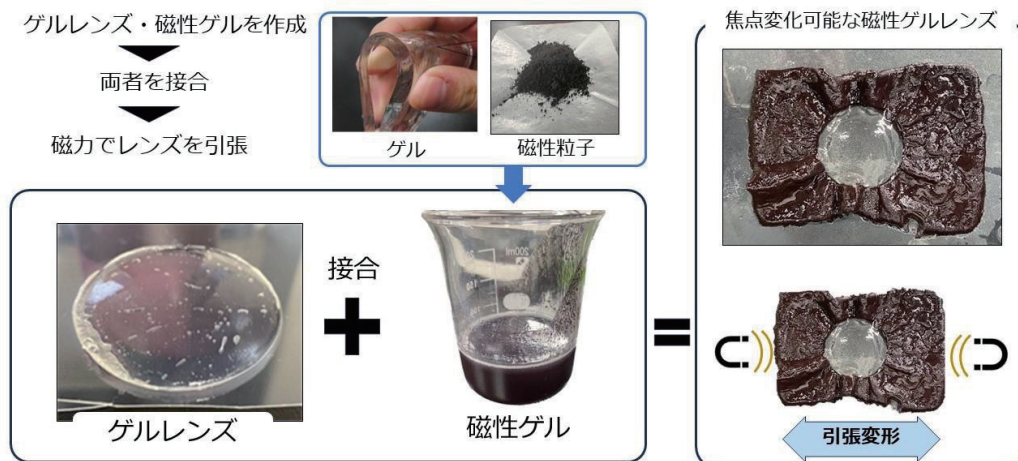


図1 磁性ゲルレンズ概要

ために、二重薄膜間の流体の圧力による変形機構[2]やリングによる円周方向への変形機構、イオン導電性高分子アクチュエータを円周方向に配置した機構[4]などが提案されている。しかし、受動的な変形システムである点や応答性の課題があった。

そこで、磁性ソフト材料による変形機構に着目した。磁性ソフト材料は、磁性粒子を内包し、外部磁場に素早く応答することが報告されている。本研究では、柔軟なゲルで成形されたレンズの周辺に磁性ソフト材料を配置し、外部磁場によって磁性ゲルによる変形力をレンズに伝え、レンズを変形させることで焦点距離を調節可能な機構を検討した(図1)。

2. 実験方法

2.1 ゲルレンズ作成

ゲルレンズは、シリコンの型に、図2に示すゲル溶液を流し込むことで成形した。ゲル溶液は比較的毒性の低い DMAAm (ジメチルアクリルアミド) をモノマーとし、架橋剤に MBAA (メチレンビスアクリルアミド)、開始剤に α -keto (α -ケトグルタル酸)、溶媒に水を使用した。各試薬の濃度は、DMAAm が M, MBAA, α -keto がモノマーに対してそれぞれ 0.2mol%, 0.1 mol% である。まず、 ϕ 50mm で両側に凸のレンズをもとに、シリコンを用いてレンズの型を作成する。次に、作成した型にゲル溶液を流しこみ、UV ライト照射装置を用い、出力を 80% で約 40 分 UV ライトを照射した。レンズ状に硬化したゲル溶液を型から取り出し、ゲルレンズとした。

モノマー	ポリマー	開始剤	溶媒
DMAAm (ジメチルアクリルアミド)	MBAA	α -keto	水
1[Mol/L]	2.0×10^{-3} [Mol/L]	1.0×10^{-3} [Mol/L]	

図2 DMAAm 溶液の組成

2.3 磁性ソフト材料とゲルレンズの結合

磁性ソフト材料は、ICN ゲル溶液[3]に磁性材料を 20w% 配合したものを使用する。ICN ゲル溶液の作成には、モノマーとして DMAAm, ポリマーとして HPC(HydroxypropylCellulose), 架橋剤として, KarenzMOI-EG(2-(2-methacryloyloxyethyl)oxyethylisocyanate), 光重合開始剤として, TPO(Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide), 溶媒として精製水を使用した。

両者の接着方法は、ゲルレンズを容器に入れ、その周辺を磁性ゲル溶液で満たし、波長 405nm の UV ライト照射装置を使用し、3分程度光を照射することで磁性ゲルを硬化させた。

2.4 磁性ゲルレンズ引張

まず図3で示すように、磁性ゲルに4本のボルトに通し全体の位置を固定する。磁性ゲルレンズから 40mm の距離で観察用のイラストを設置する。この状態から、図4に示すように全体を手動で引っ張る場合と、図5に示すように磁性ゲル周辺に設置したネオジウム磁石の位置を変化させることで引っ張る場合で、ゲルレンズを通して見える像が変化するか確認した。ネオジウム磁石は、全体を囲むように四方に設置した。

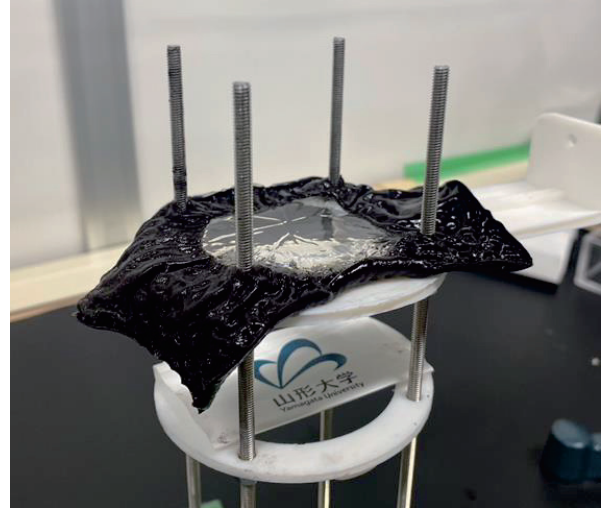


図3 実験機構

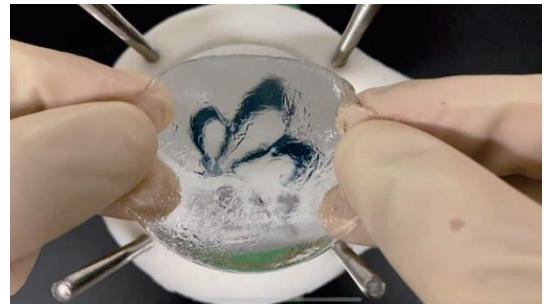


図4 手による引張



図5 ネオジウム磁石による磁性ゲルレンズ引張

3. 実験結果及び考察

ゲルレンズを通して観察したイラストの様子を図6に示す。手動による変形、磁場による変形、いずれの場合もゲルレンズを通して見える像は、左右から押し潰されたように見える。手で変形させた場合は、磁性ゲルレンズをネオジウム磁石で変形させた場合と比較して、像の変化量が増加した。これは、手による伸長よりも、磁性ゲルをネオジウム磁石で引張る力が弱く、ゲルレンズの変化量が劣ってしまったことが考えられる。また、左右二方向

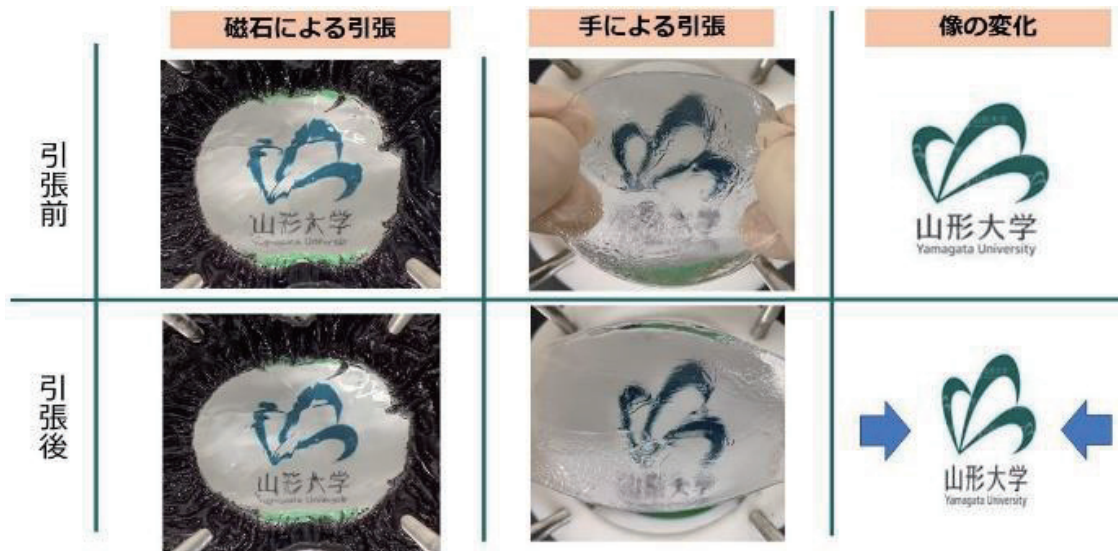


図6 引張実験結果

からの引張では、ゲルレンズが360度均等に引張ることができず、像の見え方の変化が少なかった。

4. まとめ

本研究では、DMAAm 溶液を用いたゲルレンズを作成し、磁性ゲルとゲルレンズを組み合わせることでゲルレンズの焦点調節を試み、ゲルレンズを引張ることにより、ゲルレンズを通して見える像の見え方が変化するか検証した。DMAAm 溶液と、シリコンの型を使用することにより、ゲルでレンズを模倣し作成することができた。また、磁性ゲルとゲルレンズを接合することにより、磁力でゲルレンズを引張ることができた。ゲルレンズを引張ることにより、レンズを通して見える像の変化を確認できた。

今後は、ゲルレンズの変化量を大きくするため、強力な電磁石の使用を検討する。また、引張に適した機構の構造を検討する。

参考文献

1. 大木伸一, ビッセン 宮島 弘子, 中村邦彦
Defocus curve following the implantation of multifocal intraocular lenses, 日本技能訓練士協会誌 36 81-84, 2007
2. Tomohiro Yokoo, Ruri Hidema, Hidemitsu Furukawa,
Smart Lenses Developed with High-Strength and Shape Memory Gels, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 2012, 10 巻, p. 243-247,
3. 高田 剛, 日馬瑠璃, 古川英光. 「相互華僑ネットワーク構造を有する超高延性ゲル」表面科学とナノテクノロジーの電子ジャーナル 10(2012):346-350.

4. Horiuchi T, Mibashi T, Hoshi S, Okamoto F, Oshika T (2021) イオンポリマー金属複合アクチュエータを搭載した人工調節眼内レンズ。PLoS ONE 16(6):e0252986 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252986>

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費、JP21H04936, JP22K17972, 管理法人 NEDO の業務委託(JPNP14004 と JPNP20004)によって支援を受けたものである。

軟質樹脂 3D プリントを用いた最終製品量産化への挑戦 ～ワコール×キョーラク ぷるるんメッシュパッド発売までの道のり～

Challenge to mass-produce final products using soft material 3D printing.

The Road to the Release of the Pururun Mesh Pad

富田 知幸¹, 堀部 香里²

Tomoyuki TOMITA¹, Kaori HORIBE²

¹キョーラク株式会社

²株式会社ワコール

¹Kyoraku Co., Ltd.

²Wacoal Corp.

【要約】

現代において、3D プリント造形技術は単なるコンセプト確立としての試作用途に限らず、最終製品製造への活用検討が活発に行われています。しかし、特に大量生産品において、3D プリント技術の適用には超えるべきハードルが多いことも事実です。ワコールとキョーラクが共同開発し、乳房を手術された方のためのブランド「ワコール リマンマ」より 2023 年 3 月から発売開始となった「ぷるるんメッシュパッド」は、キョーラク独自の“軟質樹脂 3D プリント技術”とワコールが長年積み重ねてきた女性のからだに関する知見をうまく組み合わせることで誕生しました。

本講演では、ワコールとキョーラクが軟質樹脂 3D プリント技術での最終製品量産化に挑戦し、本製品の発売までに歩んできた道のりについてご紹介します。企画背景と軟質樹脂 3D プリントだからこそ実現できた商品特徴や、最終製品として求められる機能および強度を叶える 3D プリント造形技術・メタマテリアル設計技術、アパレルならではの品質評価や安定生産技術について解説します。

1. ワコール及びワコールリマンマについて



会社紹介

からだのこころよさ、こころの美しさ、
それはまるで引力のように、
自分と社会とを結びつけてくれる。

ありたい自分を知り、一歩ずつ近づぐこと。
そこで生まれた自信は、
多様な人々を受け入れる優しさを育む。
その優しさは、やがて社会や地球へも広がります。
思いやりあふれる豊かな未来へとつながっていく。

からだに、こころに、いもばん近いところで、
一人ひとりの暮らしに
寄り添い、続けてきたワコールだから、
変化に挑み、成長も続けることで、
世界を美しくする力になります。

私たちは、そう信じています。



1. ワコール及びワコールリマンマについて

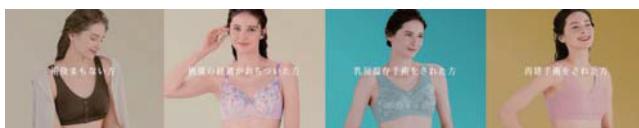


リマンマパッドとは？

乳房を手術されたお客様に快適な生活を送っていただくために設計された専用のブラパッドです

- 女性が罹患する がんの中で**一番多いのが「乳がん」**
- 日本人女性の乳がん罹患数は、年間約**9万人**、
人口割合では**9人に1人が発症**する
- 乳がんの術式はさまざまあり、
病状・病期によって手術や治療方法が医師と患者によって決められます
- 術後の回復状態は個人によって差があるため、
術部の状態にあわせてブラジャーやパッドをお選びいただけます

	<p>全摘 ... がんのある側の乳房全体を切除</p> <p>温存 ... がん周辺だけを部分的に切除</p> <p>乳房再建 ... 失った乳房を作り直す</p>
--	--



今の自分にあうパッドが見つけれられる

リマンマのパッドラインアップ

リマンマでは **ウレタンパッド** **シリコンパッド** **乳房温存手術用パッド** などをご用意。

- ウレタンパッド**
術後まもるタイプに最適。軽くて柔らかいので、やさしい着感パッドです。
- シリコンパッド**
術部がわかるタイプに最適。自然な乳房ラインをつくれます。
- 乳房温存手術用パッド**
腫瘍で、切除したい部分に合わせて、シリコンパッドをご用意。

2. ぶるるんメッシュパッドの企画背景/特徴



WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

企画背景/既存のリマンマパッドの課題

既存のリマンマパッドは重さのバリエーションの少なさや通気性に課題があったため、お客様にとってより快適なパッドが求められていた

種類	ウレタンパッド	シリコンパッド
感触	硬く、シリコンよりも人体に沿にくい	柔らかく人体に沿ってフィットしやすい
着け心地	軽い着け心地 (軽すぎて不安定と感ずる方も)	重く安定感のある着け心地 (重すぎて身体に負担を感ずる方も)
通気性	シリコンよりは○だが低い	通気性がない×
価格	安価	高価

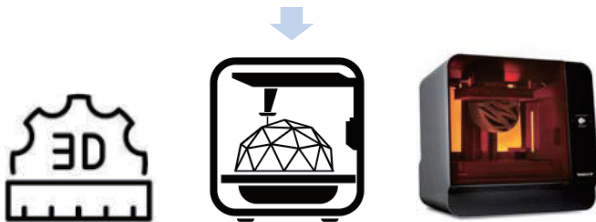
2. ぶるるんメッシュパッドの企画背景/特徴



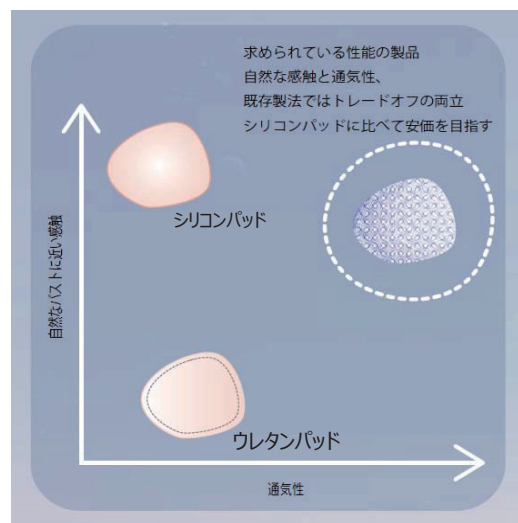
WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

開発目的

通気性のよさ×自然な感触×着け心地の安定感
すべて兼ね備えた
お客様にとってより快適なリマンマパッドを
開発すること



既存の成型技術と比べ高い通気性とシリコンパッドのような柔らかさや安定感すべてを実現できる手段として「3Dプリント技術」に目を着けた





開発における課題/パッドの理想形

材料

- とにかく柔らかい
- 人体に対して安全
- 汚れた場合にお手入れ可能
- 環境に優しい(洗浄工程,リサイクル可能性)



形状&構造

- バストの丸み・外形ラインを整えられるかたち
- 両面曲面形状で身体に沿いやすきたい
- 周縁は薄くして段差ができないようにしたい
- 通気性は良くしたいが、インフィル密度が粗すぎるとバストのボリューム感がなくなるのでNG



耐久性

- カバーの着脱や洗濯に対する耐久性が必要(剥離、破れ、変形、変色NG)



量産・品質

- 造形時間が長くてコストが高くなるのはNG
- 量産ぶれは既存品と同程度

開発開始時の既存3Dプリント技術で実現しようとした場合・・・
 FDMでは柔らかさが全然足りない、底面が曲面にできない
 SLAやSLSではコスト高い、洗浄が必要・・・

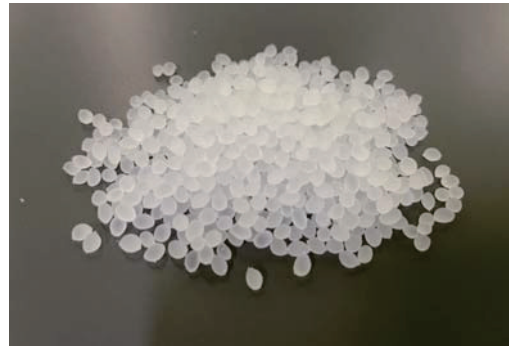
3Dプリントでも無理なのでは?!



キョーラクの軟質3Dプリント技術との出会い

- これまでにみた3Dプリント材料の中でもっとも柔らかい
- ペレット熔融方式で、コストや材料安全性も期待できる
- 成型品での量産ラインがある会社

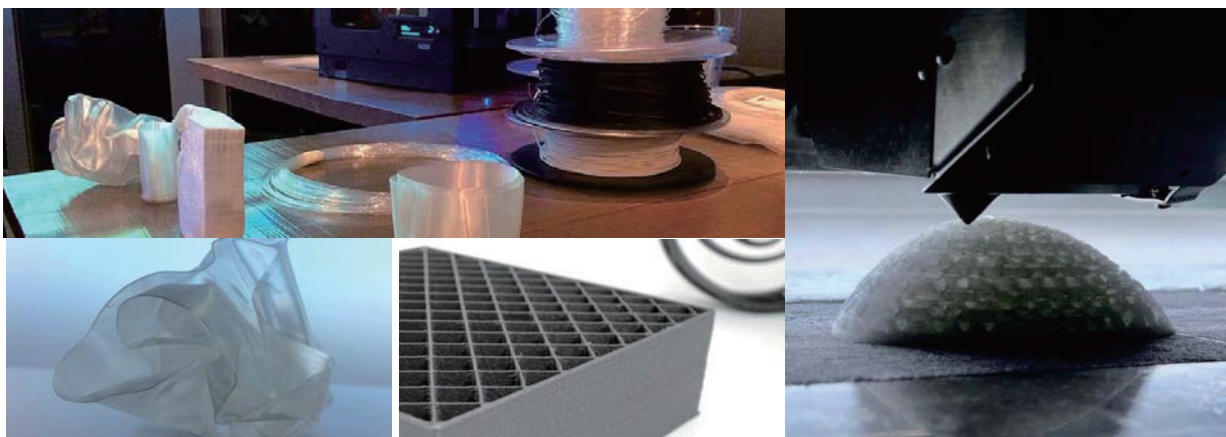
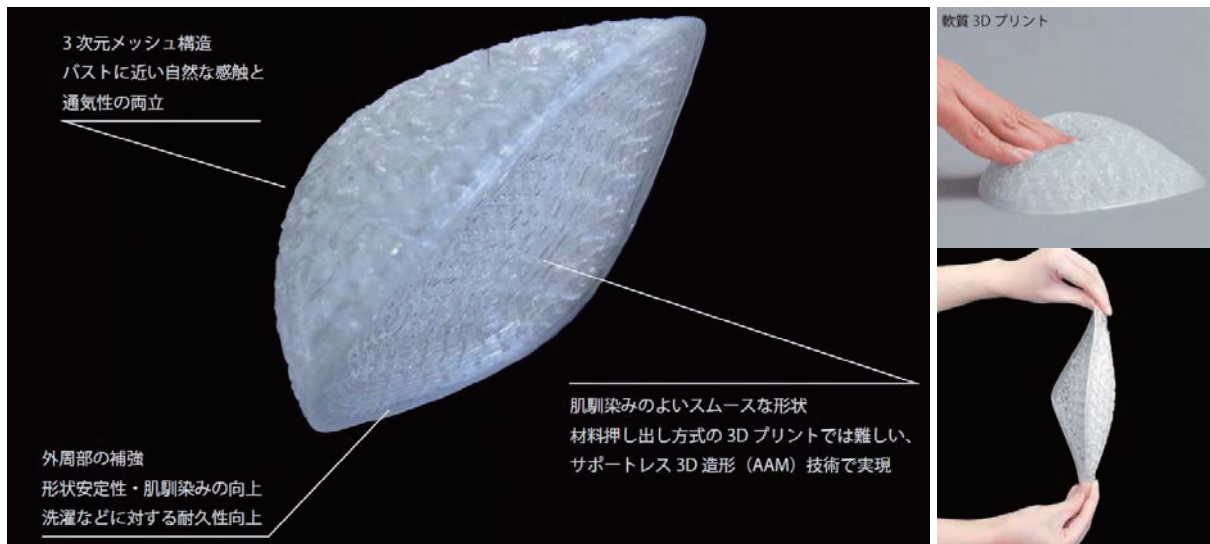
この3Dプリント技術なら実現できそう!



2. ぷるるんメッシュパッドの企画背景/特徴



軟質 3D プリントだから実現できた ぷるるんメッシュパッドの特徴



キョーラクの3Dプリント技術

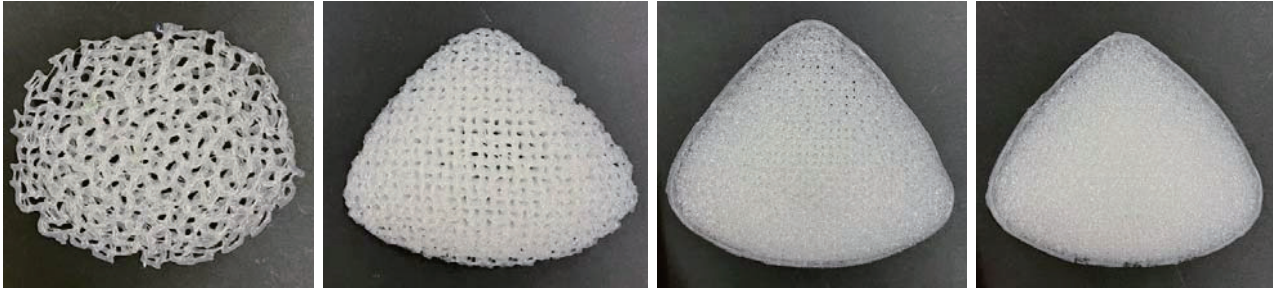
Shore A 0の超軟性材料

4. ぶるんメッシュパッド具現化における課題



WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

内部構造



ブラにいれたときの
感触、保形性確認

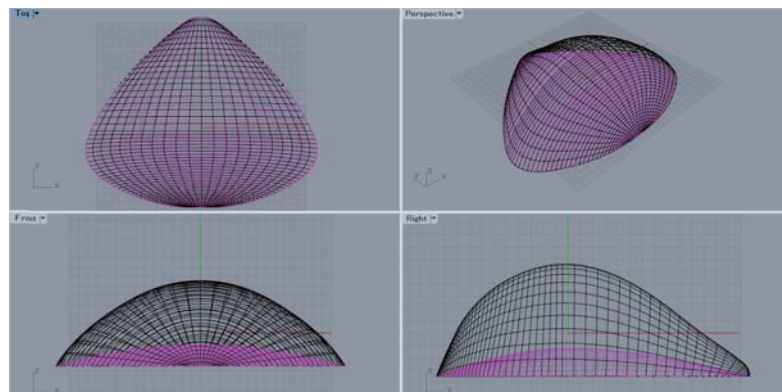
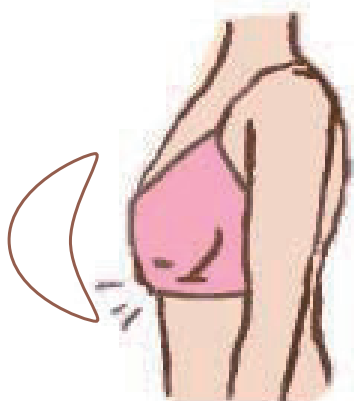


4. ぶるんメッシュパッド具現化における課題



WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

身体フィットのための曲面造形

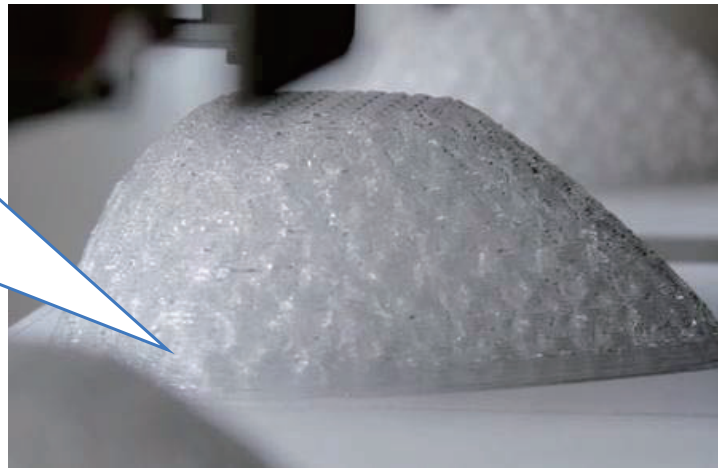


4. ぶるるんメッシュパッド具現化における課題



WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

AAM (Additive Additive Manufacturing)

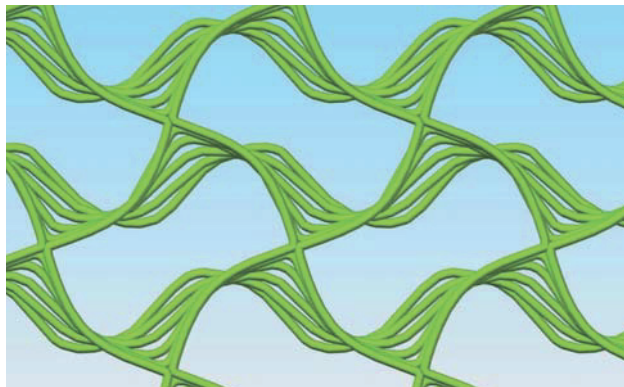
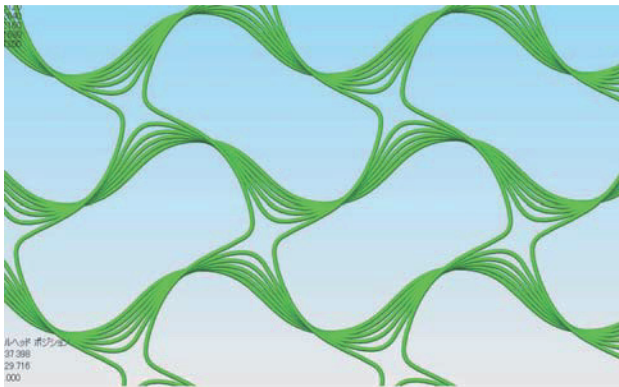


4. ぶるるんメッシュパッド具現化における課題



WACOAL
Comfortable inside. Confident outside.

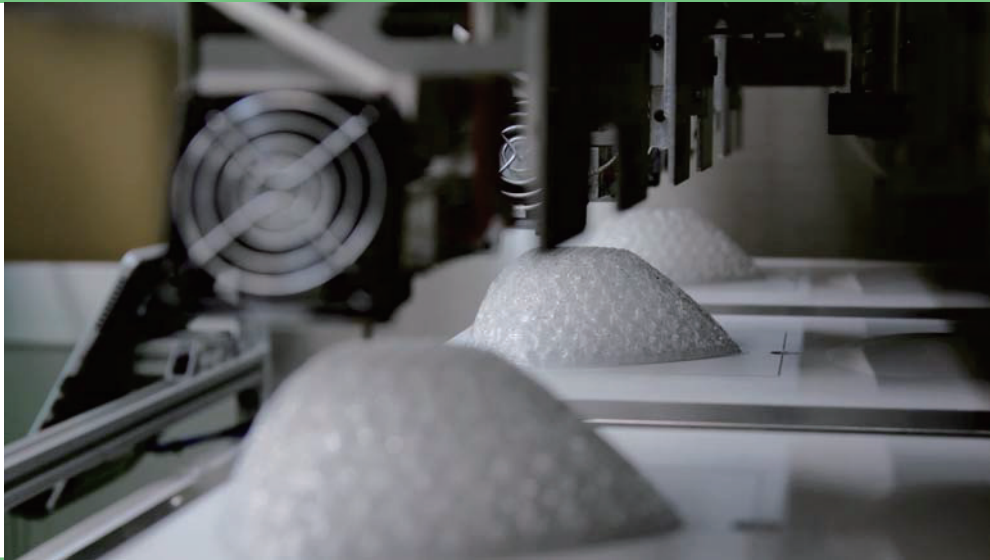
強度アップ設計



4. ぶるるんメッシュパッド具現化における課題



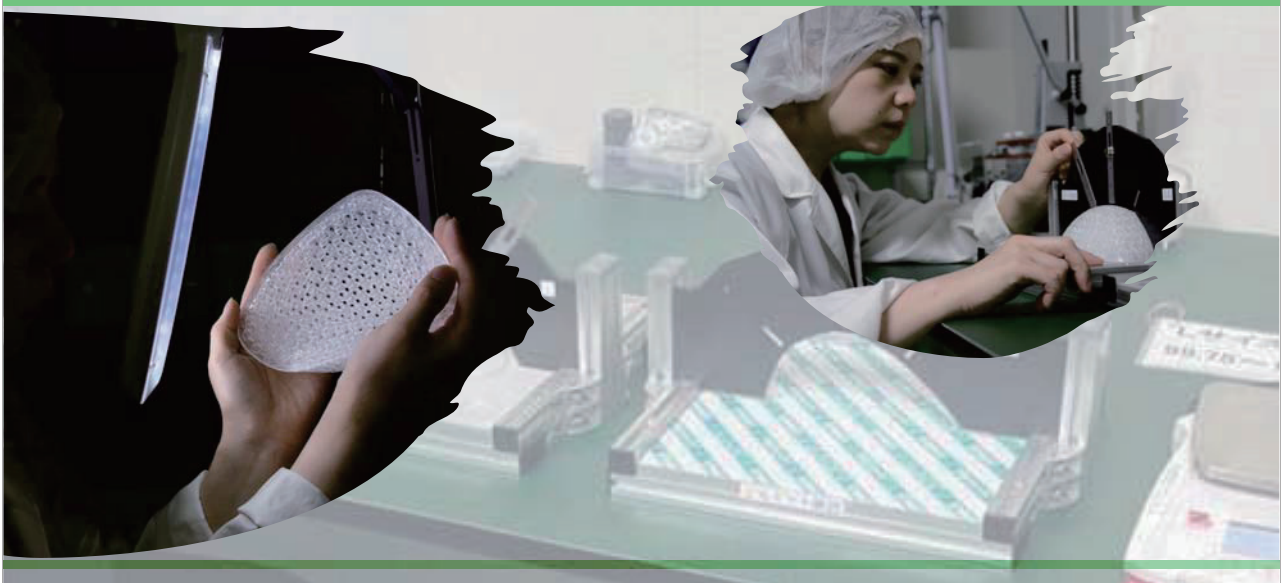
量産



4. ぶるるんメッシュパッド具現化における課題



量産品質チェック体制



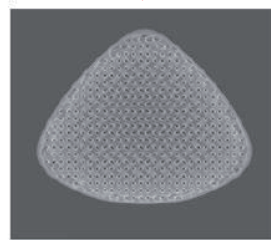
5. 将来に向けての展開可能性



今後の展望-「SCANBE」との連携



SCANBE東急プラザ表参道原宿店



まとめ

3Dの製品開発

製品
アイデア

開発

評価

量産

その業界のプロとタッグを組み、連携していくことが重要
将来的に、3Dに適した評価方法が確立されると良い

何か作りたい企業の皆さん、一緒にやりましょう！！

難燃剤を用いた 3D プリンティング材料の高機能化

Functionalization of Materials for 3D-Printing via Flame Retardants

中村 達人, 高根 涼, 酒井 敦史, 米澤 豊, 野村 和清

Tatsuhito NAKAMURA, Ryo TAKANE, Atsushi SAKAI, Yutaka YONEZAWA, Kazukiyo NOMURA

株式会社 ADEKA
ADEKA Corporation

【要約】

材料押出法(MEX)は最も普及している積層造形法の1つであり、近年では自動車や電子材料部品の製造などにも活用されている。一方で用途によってはプラスチックは性能が不足となる場合があり、その特性の1つが難燃性である。多くのプラスチックは燃えやすいが、難燃剤を添加することで火災発生時でも人命に深刻な影響を与えない材料とすることができる。本研究では難燃剤を配合したPC/ABS試験片をMEX式3Dプリンタで作成し、UL94準拠の燃焼試験でその難燃性を評価した。その結果、特定の難燃剤を使用することで、積層造形時の高い造形安定性と高い難燃性の両立を実現した。

キーワード: 3D, 材料押出(MEX)、フィラメント、難燃性、UL94、PC/ABS

【Abstract】

Material Extrusion, MEX, is one of the most promising methods in additive manufacturing of thermoplastics and this method has been used for the production of parts for automobiles and electronics recently. Meanwhile, performance of pure plastics is insufficient when applying it to specific applications. Most of thermoplastics are easy burning in nature and this could be a serious threat to human life when fire hazard occurs, so flame retardancy is required for some applications. To add flame retardants to the plastics is one of the representative methods to produce flame retarded materials. In this study, test specimen based on PC/ABS with flame retardant was prepared by MEX-type 3D printer and its flame retardancy was evaluated by UL94 combustion test. By using specific flame retardant, stableness of material extrusion stability while 3D printing was achieved and it provided high flame retardancy to PC/ABS material.

Keywords: Material Extrusion (MEX), Filament, Flame Retardancy, UL94, PC/ABS

1. 序論

3D プリンティングは3D CADモデルと3Dプリンタを使用し、材料を積み重ねて成形を行う工法である。複雑な形状設計が可能なことや、金型を使用しないため少量多品種製品の製造に適するといった理由から、近年では航空機や鉄道部材、家電筐体といった実用部品分野での利用が広がっている。一方で用途拡大に伴い、3Dプリンティングで製造した部材にも高い安全性が求められてきており、中でも難燃性は火災事故において人命を左右する極めて重要な物性である¹⁾。部材の難燃性を高める方法としては自己消火性を持つ樹脂材料を使用するほか、可燃性の材料に難燃剤を配合する方法が知られている²⁾。難燃剤は練り込む、もしくは表面に塗布することにより材料を燃え難くする添加剤である。近年の難燃剤の技術的進歩により、燃えやすいプラスチック製品が家電などに使用できるようになり、自動車や鉄道、航空機の部品では安全性を確保しながらの軽量化実現にも貢献している。

ここで3Dプリンティング手法としては、現在は多くの手法が実用化されているが、その中でも熱可塑性樹脂を材料としたMEX法(Material Extrusion, 材料押出法)は最も普及している工法の1つであるといえる³⁾。MEXはフィラメントと呼ばれる一定直径の樹脂材料を用い、先端ノズルから加熱溶解した樹脂を押し出してレイヤー

(層)を積み重ねていく方法である。ABS樹脂やPC/ABSアロイをはじめ、多くの熱可塑性樹脂が使用可能であり、材料の選択肢が広いことも本工法の特徴である。しかしながら熱可塑性樹脂の多くは可燃性である。

そこで本研究では樹脂フィラメントならびにMEX造形物の難燃化に有効な難燃剤の処方、および造形条件が難燃性に与える影響の検証実験について報告する。

2. 実験方法

二軸混練押出機を使用し、ポリカーボネート樹脂(MFR 15 dg/min.) 67.8質量部、ABS樹脂(MFR 60 dg/min.) 16.9質量部、難燃剤 15質量部、難燃助剤 0.3質量部からなるコンパウンドを混練温度 250℃で作成したのち、単軸混練押出機を使用して混練温度 250℃で該コンパウンドを押し出すことで、φ1.75mmのフィラメントを作成した。難燃剤としてはレゾルシノールビス(2,6-ジキリレニルホスフェート)(以下RDPと表記)、株式会社ADEKA製リン系難燃剤3D-FR01(開発品)を使用し、難燃助剤としてはポリテトラフルオロエチレンを使用した。

作成したフィラメントをMEX式3Dプリンタに取り付け、ノズル径0.4mm、ノズル温度280℃、ビルドプレート温度90℃、チャンバー温度40℃、積層ピッチ0.2mm、造形向きXY、ラスタ配向0°/90°の条件で125mm x 13mm

x 1.6mm 厚の試験片を作成した。

試験片の難燃性は UL94 規格準拠の垂直式燃焼試験を行い評価した。難燃性は V-0、V-1、V-2、Not V の 4 水準からなり、V-0 が最も難燃性が高い判定となる。

3. 難燃剤の種類が造形性と難燃性に与える影響

はじめに試験片の造形性ならびに外観について示す。難燃剤を含まない場合は造形に不具合は生じず、安定した造形が可能であった。一方で RDP を処方した場合は造形中のノズル付近にて相分離が認められ、これに伴って造形が不安定となった。また難燃剤無添加の場合と比べて試験片の層間密着性が弱く、試験片が脆い、試験片の黄変や焦げ付きが生じるといった不具合も認められた。一方で 3D-FR01 を処方した場合はこのような不具合は認められず、造形は非常に安定し、外観の優れる試験片を得ることが可能であった(図 1)

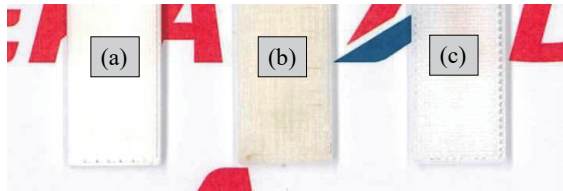


図 1 (a) 難燃剤無添加の造形試験片 (b) RDP を配合した造形試験片 (c) 3D-FR01 を配合した造形試験片

この要因として MEX 造形温度における難燃剤自身の耐熱性が挙げられる。RDP は PC/ABS 製の家電筐体向けに、現在は主流ではないものの広く使用実績のある難燃剤である。RDP を含むコンパウンドは射出温度 250℃ で問題なく成形できる一方で、MEX においては同温度で造形することはできなかった。これは射出成形では加熱された長距離のシリンダー内で材料が熔融され、成形に十分な材料流動性が得られるのに対し、MEX 式 3D プリンタにおける材料熔融は短い加熱ノズル内で行われることから、同じ設定温度であっても与えられる熱履歴が MEX で不足したからである。今回の評価で使用した PC/ABS 材料に関しては MEX においてはノズル温度を 280℃ 以上に設定することで安定した材料流動性を得ることが可能となったが、RDP は高温域での熱安定性が乏しいため、加熱に伴って RDP の分解が進行し、相分離や焦げ付きを誘発したと考えられる。

一方で 3D-FR01 は RDP よりも高い熱安定性を有している。具体的には 300℃ といった高温に長時間暴露しても大きく重量変化を起こさず、非常に安定である(図 2)。この結果から、成形時の揮発ガスも少ないことがわかる。

また 3D-FR01 は耐熱性だけでなく、難燃剤としての性能も RDP と同等以上である。表 1 に各試験片の UL94 規格準拠燃焼試験の結果を示す。本燃焼試験は試験片に対して垂直に接炎を 2 回行い、その燃焼挙動によって判定を行うものである。なお t1 は 1 回目の接炎後の消炎までの時間を、t2 は 2 回目の接炎後の消炎までの時間を示す。

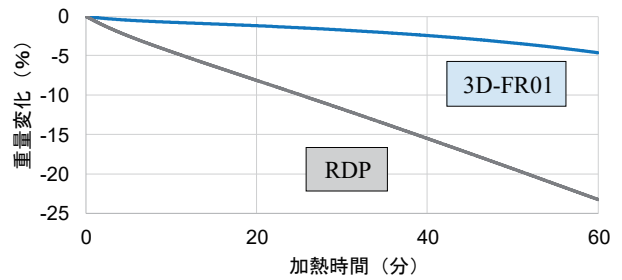


図 2 難燃剤の熱安定性(空気雰囲気下、300℃で難燃剤を単独加熱した際の重量変化挙動)

表 1 各種試験片の燃焼試験結果

難燃剤	なし	RDP	3D-FR01
t1 (秒)	>30(全焼)	2	0
t2 (秒)	-	2	3
樹脂ドリップ	あり	あり	あり
綿着火	あり	あり	あり
判定	Not V	V-2	V-2

難燃剤無添加の場合は第一接炎の時点で試験片が全焼してしまい、難燃性を示す V 判定は得られなかった。それに対して RDP および 3D-FR01 を処方した試験片は明確に難燃性が向上しており、UL94 V-2 の判定となった。また 3D-FR01 を配合した場合は第一接炎後の消炎に要する時間が 0 秒、すなわち瞬時に消炎しており、RDP と比較して高い難燃性といえる。

以上より 3D-FR01 は MEX での部材造形性や部材外観に悪影響を与えずに難燃性を付与可能な、優れた難燃剤であるといえる。

4. 造形条件が難燃性に与える影響

3D-FR01 を処方した樹脂フィラメントを使用し、MEX 造形時の条件が難燃性に与える影響を検証した。具体的には試験片を造形する際の向きを XY 方向、XZ 方向、ZX 方向の 3 条件(図 3)で作成し、各試験片の燃焼試験時の燃焼挙動を比較した。なおいずれの条件においても試験片の造形性に顕著な変化は認められず、総じて安定に造形を行うことが可能であった。

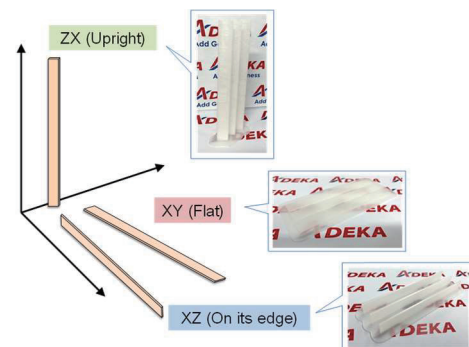





図 3 試験片の造形向き

各試験片の燃焼試験結果を表 2 に示す。XZ 方向で造形した場合は燃焼時の樹脂ドリップが大幅に抑制され、UL94 準拠燃焼試験で最高ランクの難燃性を示す UL94 V-0 を達成した。燃焼試験時に接炎部分で形成される炭化層が XY 方向で造形した試験片と比べて強固になったことが要因と考えている。一方で ZX 方向で造形した場合は XY 方向と比較して顕著な性能改善効果は認められず、UL94 V-2 の判定であった。ただし燃焼挙動に差異があり、ZX 方向で造形した試験片は第一接炎の時点で樹脂のたれ落ちが発生し、XY 方向で造形した試験片に比べて炭化層の形成が乏しかった。すなわち難燃性の観点からは同じ UL94 V-2 判定であっても、ZX 方向で造形した試験片と XY 方向で造形した試験片は同じ成形品とはいえない。

表 2 3D-FR01 配合試験片の燃焼試験結果

造形向き	XY	XZ	ZX
t1 (秒)	0	0	1
t2 (秒)	3	3	1
樹脂ドリップ	あり	なし	あり
綿着火	あり	なし	あり
試験後の試験片外観			
判定	V-2	V-0	V-2

このような挙動は試験片の積層方向と炎があたる方向の関係性にに基づいていると考察している。UL94 準拠燃焼試験は試験片の下から垂直方向に接炎させる試験であり、試験中に炎や熱は試験片の長辺方向に伝播していく。この際、その伝播方向に難燃剤が途切れなく、連続的に存在していることが炭化層形成や消炎の観点では好ましいと考えられる。

この仮説が正しい場合、MEX において炎と水平方向に積層された層(Horizontal Line to Flame; HLF)は、炎と垂直方向に積層された層(Vertical Line to Flame; VLF)よりも好ましいと推察され、試験片を構成する HLF の比率(%HLF)が高いほど、高い難燃性発現につながると考えられる(図 4)。

$$\%HLF = \frac{\text{Volume}_{HLF}}{\text{Volume}_{VLF} + \text{Volume}_{HLF}} \times 100$$

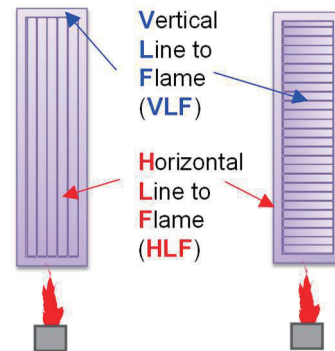


図 4 HLF、VLF および%HLF の考え方

実際に表 2 に示した燃焼試験結果について、各試験片の%HLF を算出して比較した場合、%HLF が高いほど優れた難燃性を示すことがわかる(表 3)。

表 3 3D-FR01 配合試験片の燃焼試験結果と%HLF の関係

造形向き	XY	XZ	ZX
判定	V-2	V-0	V-2
%HLF	52%	69%	0%

本結果は難燃性の部材を MEX で製造するにあたっては造形条件について最適化することで、難燃剤の性能を最大限に高めることが可能であることを示している。

5. 結論

MEX 造形用樹脂材料(フィラメント)および造形品の難燃化には適切な難燃剤の選択が望ましく、さらに造形条件を最適化することで、難燃性を最大限に高めることが可能である。特に MEX における造形温度などを加味して分子設計した 3D-FR01 は、高い材料流動安定性、色調安定性および高難燃性を実現する、性能バランスの優れた難燃剤である。このような難燃剤の使用ならびに適切な 3D プリンティング条件の確立が、3D プリンティング材料および部材の安全性向上につながり、さらなる技術活用の拡大に寄与することを期待している⁴⁾。

参考文献

1. M. S. Thompson *J. Vinyl Addit. Technol.* **2022**, *28*, 3.
2. J. Troitzsch (Ed.) *Plastics Flammability Handbook*, **2004**, 3rd Edition, Hanser Publications
3. S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt *Chem. Rev.* **2017**, *117*, 10212.
4. 酒井 敦史, 中村 達人 *JETI* **2022**, *70*, 99.

建設用 3D プリンタによる廃棄土壁由来の再生材料を用いた MEX 造形

MEX 3D Printing Using Recycled Material from Waste Wall Clay

田住 梓¹, 鷺見 良¹, 岩本 卓也²

Azusa TAZUMI, Ryo SUMI, Takuya IWAMOTO

¹ND3M, ²株式会社 Polyuse

ND3M, Polyuse Co., Ltd

【要約】

土壁は、日本建築において幅広く用いられてきた素材であるが、現代では解体や改修に際し、特に都市部において処理困難な廃棄物とされる現状がある。一方、土は人の手で扱い易い素材であり、用いる場面によっては循環可能で低コストな素材として利用価値を発揮できる。本報告では、この廃棄土壁を、3D プリンティング技術により新たな価値を付与することを目標とし、複数の産地の土壁を用いて配合を検討しながら造形を実践する。

キーワード：土壁，3D プリンティング，廃材利用，自然素材，乾燥収縮，日本建築

【Abstract】

Clay walls have been used extensively in Japanese architecture. Today, when they are demolished, they become waste that is difficult to dispose of, especially in urban areas. However, clay or mud are easy to handle by human hands, recyclable, and low-cost. Therefore, it may be useful in some situations. In this report, we try to convert wasted clay walls into new value using 3D printing technology. We practice modeling while examining the composition using clay from multiple regions.

Keywords:mud wall, 3D printing, waste material, natural material, drying shrinkage, japanese architecture

1. 背景・目的

土壁は、特に西日本において広く一般的に住宅に用いられてきた構法である。現代の新築工事においては珍しいものとなっているが、土壁が使用されている住宅はまだ多く残されており、解体作業や改修の際に廃棄物となってしまう。旧来は、新たな土壁に混ぜ込んで使用したりするなどして再利用されるものであったが、現代の都市部では処理困難な廃棄物として扱われてしまう。その一方で、人の手で扱いやすく水で練れば何度も利用できる点が注目されている面もあり、現代建築への適用もみられる。本研究では、この壁土を原料とし、MEX(Material Extrusion)3D プリンティングの素材として活用する方法を探る。水と練り合わせることで流動性を付与することができるため、セメント系材料を扱う建設用 3D プリンタを使用する。

土系材料を用いた構造物の 3D プリントに関して、イタリアの WASP 社に代表される取り組み^(*)が世界各地である。しかしそれらの地域と同様に土を伝統的に用いてきた日本での 3D プリンティング事例はみられない。左官での土壁の配合や特性などについて、ばらつきのある自然素材を建築に適用するにあたり様々な検討がなされ、土壁の再利用を見越した研究^(**)も行われている。しかし 3D プリンタで吐出し積み上げるにあたり、従来の材料配合などをそのまま適用できない。

従って本研究では、造形のための基礎的研究として、

再生壁土素材が、3D プリントに必要な施工性を得るための配合や造形の検討、また、乾燥収縮についての検討を行う。

2. 廃棄壁土由来の原材料の制作

2.1. 材料の分別・粉砕

本章では廃棄土壁の再生プロセスを述べる。解体された土壁には竹小舞や縄などが混入しているため、手作業で分別した後、土壁を粉砕する。これには、粉砕しきれない土、藁、比較的大きな砂礫が混入している。3D プリントにあたり、これらは詰まりや吐出不良の原因となるため、段階的に篩にかけ、最終的に 3mm のメッシュを通過したもののみを材料とした(図 1)。

この再生壁土は、もともとの土壁の配合により組成は異なり、粘土質の土、3mm 以下の砂、微細な藁繊維、その他混和物が含まれている状態である。一般的に新



図 1 廃棄土壁とそれを原料とした再生壁土

土は、粘土質の土のみのため、同じ材料として扱うことはできず、個別に検討が必要である。

2.2. 藁繊維の作成

通常の壁土には、荒壁、中塗り、仕上げなどの段階に応じて、ひび割れ防止や接着性向上のために混ぜ込む藁すさの種類が異なる。通常仕上げ以外では、繊維をほぐしていない切断したままの藁を用いることが一般的である。しかし、3Dプリンタで吐出するにあたり、細かい繊維にする必要がある。そのため、一般的に流通している規格を用いる場合、10mm前後のひだしすさ、5mm前後の微塵すさをを用いることができると考えられる。

本研究においては様々な長さでの比較実験をすることから、すさも自作のものを用いた。通常、仕上げ用の細かいすさは、水に長時間晒しアクを抜き、繊維を柔らかくした後に裁断して作成するが、今回は簡便のため、裁断した藁を穀物用ミルにかけ、繊維をほぐしたものをを用いた(図2)。



図2 藁すさの作成

2.3. 材料の混練

前述のように、再生壁土には粘土と砂が混ざっており、微細な藁繊維も混入している。新土を壁に用いる場合は砂や糊を混ぜたりするなど、場面に応じて様々な配合をする。今回は荒壁の施工を基準に、再生土に水と藁を混ぜ込んだものとした。また、糊などは用いず水捏ねとし、左官用の水の配合では3Dプリント可能な流動性を確保できないため、状況に応じて調整した。

4. 再生壁土材料の3Dプリンティング

4.1. 実験に用いる3Dプリンタ

本研究では、株式会社 Polyuse の開発する、セメント系材料を出力することを目的とした建設用3Dプリンタを用いる(図3)。XYZ3軸のフレームをもち、X軸に材料を吐出するノズルが搭載される。水と混練された材料は、連続押し出し式のポンプより、ノズルまで供給される。今回の実験にあたり、100-150mm/sec程度の速度で、吐出された材料幅はおおよそ30mm、積層高さはおおよそ10mmの条件で造形を行った。

4.2. 材料の配合・性状の評価指標

3Dプリンタでの出力に際し必要な材料性能について整理する。まず第一に、吐出可能な流動性が必要で

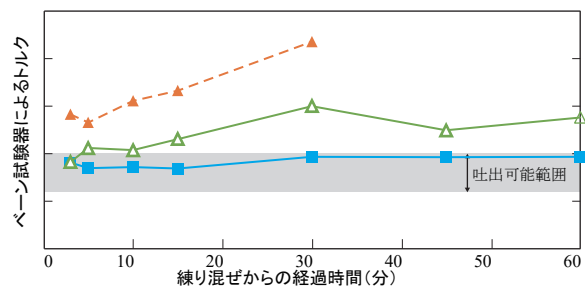


図3 本研究で用いた建設用3Dプリンタ

ある。そのため、粘性土のせん断強さ、粘着力を測定するために用いるベーンせん断試験を評価指標として用いる。このベーン測定器で得られるトルクが、スクリュウポンプでの押し出し時の負荷に対応すると考えられる。この時間変化をみることで、吐出可能な状態を維持する時間や硬化時間を予測することができる。材料は吐出後、次の積層により上部の重量がかかるため、トルクが増大する方が望ましい。そのため、安定して吐出できる時間と積層の自立保持はトレードオフの関係にある。また、フロー試験により、吐出直後の形状保持の評価のために、材料の軟性を測定する。

4.3. 壁土のフレッシュ性状についての予備試験

まずモデルケースとして、愛知県名古屋市内の民家の改修現場から入手した再生壁土を用い、フレッシュ性状を試験した。藁と土の配合については一般的な中塗り土の配合を参考にした。水分量に関しては本実験以前に小型の粘土用3Dプリンタで出力を行い、その造形時の配合を元に決定した。藁すさは5mm程度の微塵すさを使用した。また、②と③については吐出後の自立保持性を高める狙いで増粘剤を配合した。①と③を比較すると、増粘剤を加えたことにより初期のベーンは吐出可能範囲に抑えつつ、トルクの立ち上がりは速く、フローの低減と水分量の増加にも成功したため、③の配合に決定した(図4)。



配合	①	②	③
凡例	■	▲	△
w/p (%)	24.7	29.6	29.6
増粘剤	無	有	有
フロー値(mm)	116	106	109

図4 ベーンせん断試験とフロー試験結果

4.4. 再生壁土の造形実験

4.4.1. 円柱の積層実験

まず、上に材料が積層されることによる下層の自立保持性を確かめるため、直径 600mm の円柱を積層する実験を行った(図 5)。12 層目付近から下部が外側に膨らみはじめ、15 層目を積層したところで内側に崩壊した。つまり形状の工夫なく、10 層つまり 100mm 程度は積層可能だといえる。プリントする形状にリブをもたせるなどの工夫や、壁厚を確保するなどすれば、より高く積層可能だと考えられる。

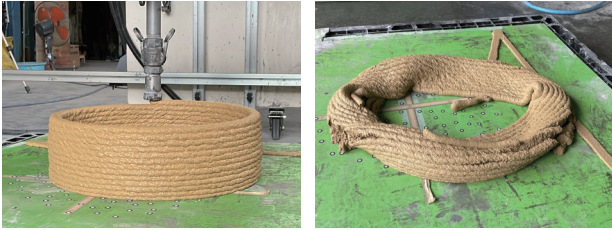


図 5 円柱積層実験結果

4.4.2. 曲線パスを持つブロックの 3D プリンティング

前項の結果より、シングルラインの積層でも 100mm 程度の造形が可能であることがわかったため、800mm 四方の大型ブロックの造形実験を行った(図 6)。全体のプリント時間は 23 分で、最後までポンプの負荷は安定した状態で吐出可能であった。プリントパスが接する部分で壁の膨らみはあるものの、狭い隙間も接することなく造形できていた。

造形後、日光の当たらない屋内で乾燥させた(図 7)。収縮によるひび割れが生じており、主に外周で周囲より壁が薄い箇所に亀裂が完全に貫入している。通常今回造形した厚さ 30mm 以上のような壁には、50mm-100mm 程度の荒すさをを用いるため、微塵すさでは亀裂を食い止められず、弱い部分で分離してしまったと考えられる。一方それ以外の部分の表面には、荒壁で生じるような細かいひび割れなどはみられず、細かい微塵



図 6 大型ブロックの造形

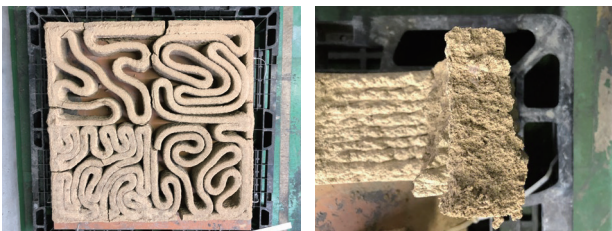


図 7 乾燥後の造形物

すさ混入の効果が発揮されていると考えられる。また、断面に関しては、層間で分離している様子はなく、各層は十分に結合していると考えられる。

5. 異なる産地の再生壁土の比較

5.1. 目的

壁土には規格があるものではなく、採取地や配合により材料特性は様々である。そこで、様々な地域の民家の解体により生じた廃棄土壁を収集した再生壁土を対象にフレッシュ性状の試験を行い、3D プリント可能な性質を獲得できるかどうか検討する。

5.2. 収集した土壁

4 章で用いた名古屋の土に加え、岡山、広島、福岡の民家より土を手に入れ、再生壁土を作成した。さらに比較対象として、有名な壁土産地である淡路の荒土と埼玉の荒木田土の2種類を用意した。それぞれ外観は大きく違い、粘土質の量にも差が見られた(図 8)。

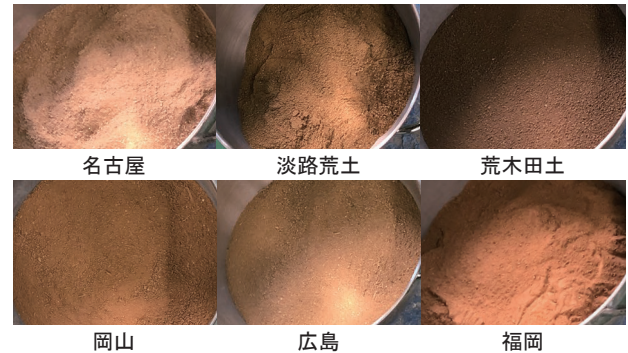


図 8 各産地の壁土

5.3. 産地ごとのフレッシュ性状の評価

4.3 節のフロー試験とベーンせん断試験を実施した結果を示す(図9)。配合は図 4 の③と同様である。

すべて乾燥状態の壁土を用いたが、測定結果に大きな違いがでた。福岡の土は時間が経過してもトルクが増加せずほぼ横ばいであった。しかしそれ以外の土に

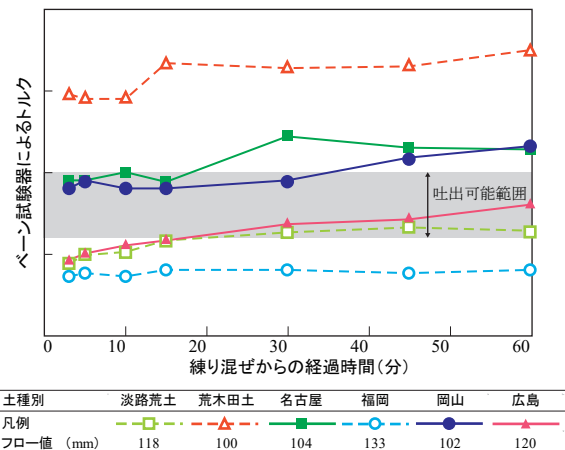


図 9 各産地のフレッシュ性状試験結果

については時間経過で増加しているため、水分量など調整で適切なフローを得て、名古屋の土と同じように造形できる可能性がある。また、荒木田土は15分頃に急速に立ち上がった先で横ばいであり、粘土質の多さを反映している可能性がある。既に過去の施工時に砂などと配合され調整がされた状態である再生壁土であっても大きく性質が異なる。よって、3Dプリンティングにあたり個別の比較検討が必要である。一方で、どの壁土もトルクの上昇は緩やかであるため、練り混ぜ後安定して押出可能である。

6. 藁すさの配合による収縮ひび割れの評価

6.1. 目的

4章の実験では吐出のため短い繊維を用いる必要があり、長さ5mm程度の微塵すさを配合した。表面のひび割れは発現しなかったものの、大きな割れを抑制することができなかった。そこで、藁すさの長さや配合量を変化させながら、ひび割れへ与える影響を考察する。

6.2. 作成した試験体と藁すさの配合

今回作成した藁すさの長さは一般に用いられるものを基準とした。おおよそ5mmが微塵すさ、10mmがひだしすさ、20mmが中塗りすさ、30mm-50mmが短い荒すさに対応する。壁土には淡路の荒土を用い、製造業者の推奨配合である1kgあたり12gを標準とした。それに加え建築基準法告示や文献⁽³⁾を参考に、1kgあたり6gから36gの配合とした。それぞれ個別に混練したのち、ウレタン塗装合板上で150mm×150mm×20mmの樹脂型に詰め、表面をならして脱型した。また、基準配合で高さ5mmと40mmの試験体も作成した。

6.3. 乾燥収縮・ひび割れの評価

乾燥後の状態を示す(図10)。4.4.2項で見られたような、全体が切り離されるようなひび割れまたはそれに発展することが予想されるものを「割裂ひび割れ」、一方で表面に無数に生じるひび割れを「表面ひび割れ」として区別する。基準配合の5mm_12gの試験体には部分的に割裂ひび割れが生じたが、表面ひび割れは生じなかった。それより少ない5mm_6g、藁なしの試験体にはより大きい割裂ひび割れが生じた。10mm以上の12gで割裂ひび割れを生じたものはなく、繊維長を長くすることで抑制可能だと考えられる。しかし、20mm以上では表面ひび割れが生じ、6g_30mmでは割裂ひび割れも生じている。これは、繊維を長くしたことで、繊維が不均一に分布し、ひび割れが生じたと考えられる。5mmの試験体については、24gでは割裂ひび割れに発展しそうなひび割れが存在するが、36gにはひび割れは見られない。10mmの試験体は12g、24gで

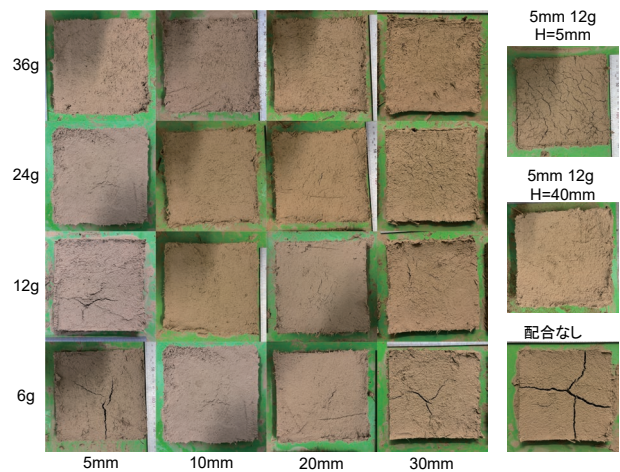


図10 藁すさの長さや配合とひび割れの関係

表面ひび割れを生じたが、6gではいずれのひび割れもなかった。

以上より、繊維を長くすることで割裂ひび割れを抑えることができる一方で、表面ひび割れは増加する。本実験においては10mm_6gが一番ひび割れの少ない結果となり、繊維長は伸びたが配合量を減らすことができたため、吐出不良のリスクには少ないと予想できる。また、配合を減らすと繊維が長い場合に部分的な割裂ひび割れを生じる可能性がある。また、造形物の大きさにより割裂ひび割れが生じる場合も考えられるため、表面ひび割れは許容したうえで配合量を増やすことも検討すべきである。本研究はポンプでの連続押出を前提としているが、24g以上の配合では十分な流動性を確保できておらず吐出困難な性状である。しかし、シリンダのなかに材料を詰め空気圧などで押し出す方式であれば、より流動性の低い材料でも吐出できるため、藁の配合量を高めることが可能だと考えられる。

7. 結論

再生壁土と藁の配合を検討することにより、3Dプリント可能な性状を確保できることが分かった。一方、藁の配合や産地の異なる壁土については出力実験を行っていないため、今後実際に出力実験を行い本報告内容の評価を行う必要がある。

参考文献

1. WASP, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>, (参照2023-9-30).
2. 浦 憲親：地域産土に関する基礎実験，日本建築仕上学会2014年大会学術講演会研究発表論文集，p. 15-18, 2014
3. 特定非営利活動法人土壁ネットワーク：⑦ 告示の問題 / 壁土, http://www.tutikabe-net.com/studyreport/studyreport_7.html, (参照2023-9-30).

飲料テクスチャに触発された知識埋込みゼラチン識別子

Knowledge embedded gelatin identifier inspired by beverage textures.

長瀬 駿介¹, 小川 純², 渡邊 洋輔,²
 エムディ ナヒン イスラム シブリー², 古川 英光²
 Shunsuke NAGASE¹, Jun OGAWA², Yosuke WATANABE²,
 MD Nahin Islam SHIBLEE², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部

²山形大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

我々の研究室ではこれまで圧電センサーを用いて飲料のテクスチャ識別を行う装置の開発を行なわれているが、やわらかい材料を使用することで識別の精度を向上させることが可能となった。これらの研究では主にシリコーンを使用したがる、より良い結果を目指すために、水との質量比を調節することで柔らかさを調節できる点に着目し、ゼラチンを採用した。

ゼラチンといえば食品のイメージが強いが、本研究ではゼラチンを識別子として利用した機械学習を行う。識別する時に学習するのは、飲料が入ったゼラチンの容器が振動する波形である。使用するゼラチンの硬さ、形状などを変化させながら学習を続け、これらが飲料のテクスチャ識別においてどのような影響を及ぼすのかを調査する。

キーワード: ゼラチン、キャラクターゼーション、飲料識別、ソムリエ

【Abstract】

Our laboratory has developed a device to identify the texture of beverages using a piezoelectric sensor, and the use of soft materials has improved the accuracy of the identification. In these studies, silicone was mainly used, but for better results, gelatin was employed because its softness can be adjusted by adjusting its mass ratio to water.

Gelatin is often associated with food products, but in this study, machine learning is performed using gelatin as an identifier. The machine learning system uses the waveform of a vibrating gelatin container filled with a beverage as the identifier. We will continue learning while changing the hardness and shape of the gelatin used and investigate how these affect the texture identification of the beverage.

Keywords: Gelatin, characterization, beverage identification, sommelier

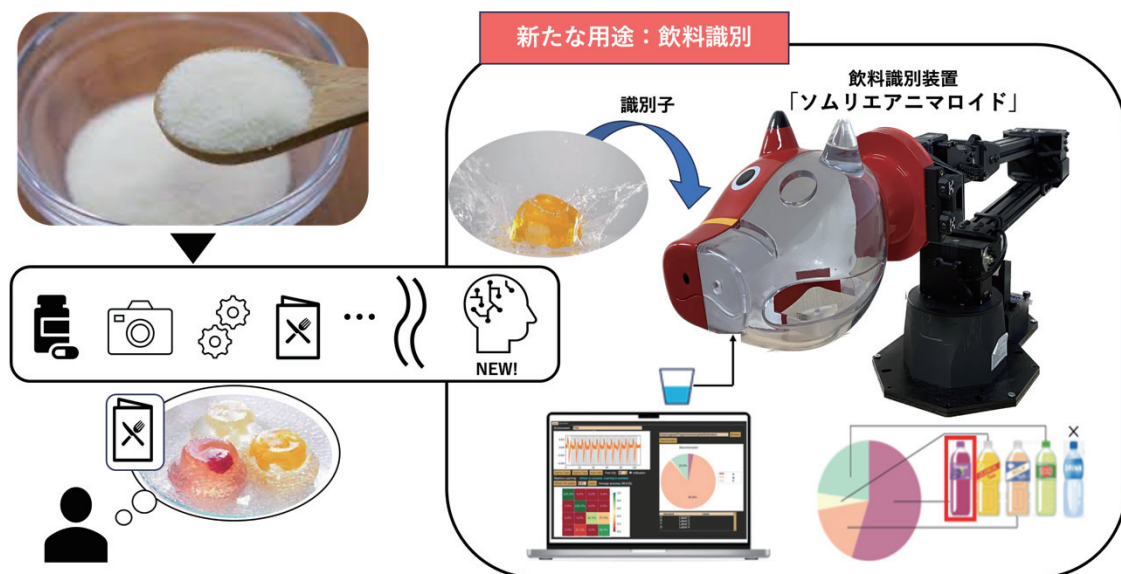


図 1 研究の概略図

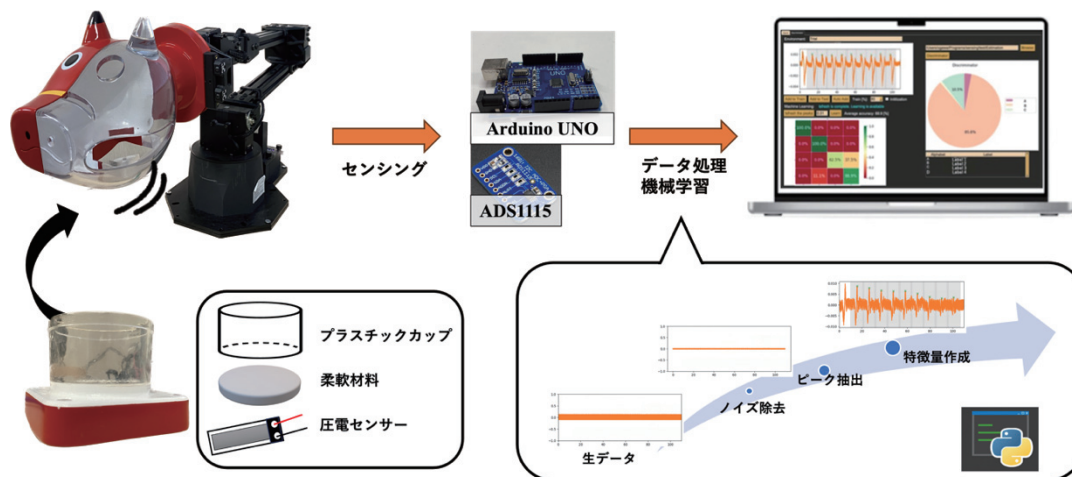


図 2 ソムリエアニマロイド概要図

1. 諸言

本研究の概略を図 1 に示す。

ゼラチンは食用、写真用、医薬用、一般工業といった幅広い分野において使用されており、その効果もゼリー化、起泡作用、接着・結合効果、増粘作用など多岐に及んでいる[1]が、一般的に知られているゼラチンの用途としてはゼリー化を利用した食用ゼラチンであろう。今日にはゼラチンを使用した食品が大量に生産、消費されている。ゼラチンは口の中で溶けるような口当たりや独特のプルプルとしたやわらかさが特徴であるが、本研究ではこの「やわらかさ」に着目し、ゼリーの食用以外の新たな可能性を模索するため研究を行った。

私はこれまで圧電センサーを用いて飲料のテクスチャ識別を行う装置「ソムリエアニマロイド」の開発を行ってきたが、飲料の識別において柔軟材料が大きな効果を与えることが判明している[2].今までは柔軟材料としてシリコンを使用し、特性の異なる飲料の識別や炭酸飲料の時間経過によるテクスチャの変化を捉える実験を行い、高い精度で識別を行うことができた[3].本研究ではより良い結果を目指すためにシリコンに加えてゼリーを使用して識別学習を行い、使用したゼリーの硬さや形状が飲料のテクスチャ識別に及ぼす影響を調査する。

2. 飲料テクスチャ識別装置

「ソムリエアニマロイド」の概要

この章では、私が開発を行なっている飲料のテクスチャ識別装置「ソムリエアニマロイド」の設計と構築、実際に本装置を用いたデータの取得、分析および機械学習の手法について詳述する。図 2 に 2 章の概要図を示す。

2.1 装置設計と構築

我々の提案するソムリエアニマロイドは、人間が飲料を「口で転がす」動作を模倣し、その感覚を人間の代わりに体験し、物理リザーバー計算を利用して

その感覚を分析する装置である。

本装置は 5 軸ロボットアームにより人間の口腔内の飲料の流動と移動を再現しており、先端には赤べこを模したエンドエフェクタが取り付けられている。エンドエフェクタ内部には飲料を格納する取り外し可能な容器が内蔵されており、容器の中には上から飲料を注ぐカップ、ソフト材料 Smooth-On, Inc. 社製の Ecoflex00-30)、圧電センサーが配置されている。本研究では新たな要素として水と粉末ゼラチンを混合し固めたゼリーを飲料を注ぐカップの中に追加した。また、飲料を流動させた振動を圧電センサーによって捉えることによって得られるアナログデータは、Arduino uno と A/D 変換器によってデジタル信号に変換され、機械学習に使用される。

2.2 データの取得・分析と機械学習法

まず、本装置によるデータの取得方法について説明する。2.1 において述べた、飲料を注ぐカップ内に識別する飲料を注入し、赤べこを模したエンドエフェクタに格納する。その後、ロボットアームを駆動させて首を左右に捻るような動きにより飲料を流動させ、その間に起こる振動を柔軟材料と圧電センサーを用いてセンシングする。この首を左右に捻る動きはデータ取得 1 セットにつき 10 回ずつ行い、また、1 回首を捻るごとに 5 秒間の静止時間を儲けることでヒステリシスの影響を低減させている。データ取得 1 セットにかかる時間は約 2 分間であり、その間に発生する全ての振動は圧電センサーによってデータとして取得される。

圧電センサーによって得られるアナログ電圧値は Arduino uno によって取得され、Adafruit ADS1115 を用いて 12bit(データ範囲:-2048~+2048)のデジタル信号に変換され、Python スクリプト上でシリアル通信を介して PC 上に受信される。受信したデータそのままでは機械学習に使用することが困難であるため、データ処理を行う。行う処理はノイズ除去、ピーク抽出、特徴量作成の 3 段階である。

ノイズ除去には線形除去と高速フーリエ変換を用いたローパスフィルタを使用し、カットオフ周波数 10000Hz 以下のデータを除去している。ノイズ除去を行ったデータについて、50 データごとにピークを設定し、その前後 10 データずつを抽出し、tsfresh[4] というライブラリを使用し特徴量を作成する。tsfresh は時系列データから多次元の特徴量を自動的に生成することを可能とするライブラリである。

これらの手順による特徴量作成は、識別対象それぞれのラベルについて行われ、訓練データ 80%、テストデータ 20%に分けられ、機械学習モデルに渡される。ここでは、分類学習の手法としてロジスティック回帰を使用する。[5]

2.3 柔軟材料を使用したフレキシブルセンシング

諸言でも述べたように、柔軟材料を介したフレキシブルセンシングは飲料のテクスチャにおいて有効であることがわかっている。本研究で使用する圧電センサーは飲料が流動することで生じる微小な圧力を検知しているが、センサーと測定対象の間に何も無い、または変形しづらい硬い材料が挟まれている場合、得られるデータの波形は短くなってしまいが、変形しやすい柔軟材料を経由することで微小圧力を材料のダイナミクス変形に変換することでデータの波形を長くすることができる。[6]この差異が識別学習の精度において大きな影響をもたらしている。

須藤らは圧電センサーを用いた接触部位識別装置を開発し、ソフト材料を経由した接触情報によるクラスタ分析が有効であることを示した。[7]また、廣瀬らは、柔軟材料を含む複数の高分子材料と圧電フィルムセンサーからなる咀嚼ロボ「Gel Biter」を開発し、ひとつの食品に対する接触信号を異なる材料から同時取得することが微細なテクスチャーの差異の高精度識別に寄与しうること示している。[8]

3. ゼラチン識別子を用いた識別実験

3.1 形状による影響の調査

本実験ではゼリーの形状が飲料識別に与える影響を調査するために、3 種類の形状のゼリーを用いて 4 種類の飲料の識別実験を行った。また、ゼリーの有無が飲料識別に対して有効の調査も併せて行った。

本実験に使用したゼリーの形状と識別対象となる 4 種類の飲料を図 3 に示す。A は果肉が混ざったオレンジジュースであり、スラリー液である。B は炭酸飲料、C は比較的低粘度である水、D はとろみのある飲むヨーグルトである。

識別子と使用するゼリーは 100mL の水に対して 0.6g の粉末ゼラチンを加え、加熱したのちに冷やすことで作成した。

上記の識別対象と識別子を使用し、2.2 で示した手法でデータの取得、分析、機械学習を行った。また、データの取得は各飲料につき 3 回ずつ行った。図 4 に識別学習を行った結果を示す。

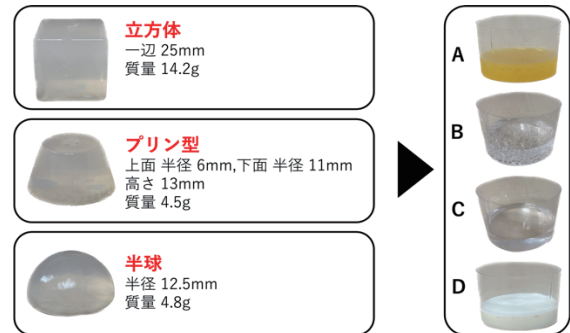


図 3 識別子と識別対象

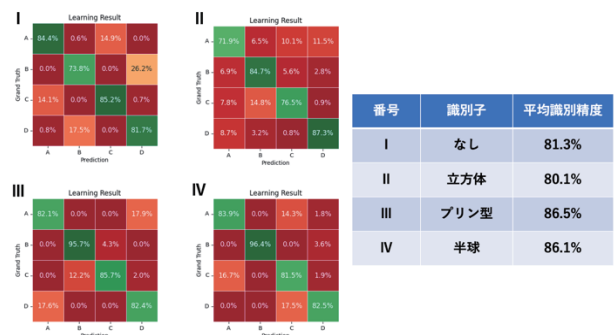


図 4 各形状の識別子による識別結果

図 4 より、識別子としたゼリーの形状 3 つのうち 2 つが識別子を使用しなかった場合よりも平均識別精度が上昇していることがわかる。これは、ゼリーを識別子として使用することは飲料の識別において有効であることを示している。また、プリン型ゼリーと半球型ゼリーの識別結果を見比べてみるとその内容が非常に似通っていることがわかる。これら 2 つの識別子は 形状や質量が近いものであった。対して、形状が大きく異なる立方体型識別子は識別精度が低かった。考えられる理由としては体積の大きさが挙げられる。立方体型識別子は他 2 つの識別子に比べて 3 倍近くの体積を持っており、実験の際もプラスチックカップの大部分を占めていた。そのため、大きすぎる識別子が飲料の流動を妨げていた可能性がある。

以上より、識別子の形状は飲料識別において大きな影響を与えており、適した形状の識別子を使用することで、識別精度を向上させることが可能である。

3.2 硬さによる影響の調査

次に、ゼリーの硬さによる影響を調査するために、3.1 で使用したゼリーの形状のうち、立方体に注目し、ゼリーの硬さを変化させながら識別実験を行った。ゼリーの硬さを変化させる手法としては同量の水に混合させる粉末ゼラチンの量を調節した。今回作成した硬さの異なるゼリーはそれぞれ水 100mL

に対して、粉末ゼラチンを 0.4g, 0.6g, 1.0g, 1.5g 混合した。これらのゼリーのヤング率を示したグラフを図 5 に示す。ゼリーのヤング率は粉末ゼラチンを 0.4g, 0.6g, 1.0g, 1.5g 混合した場合それぞれ 15.34kPa, 52.97kPa, 62.04kPa, 188.6kPa であった。

上記の識別子を使用し、3.1 と同様の手法を用いて識別実験を実施した。結果を図 6 に示す。

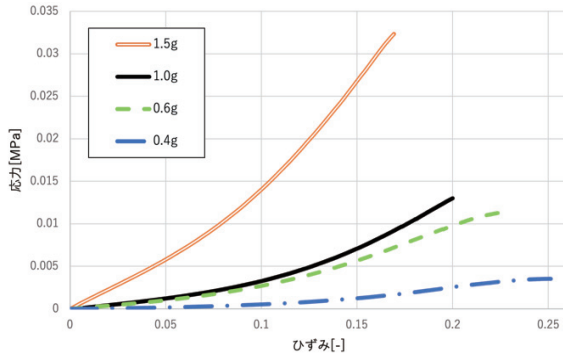


図 5 ゼラチン混合量ごとのゼリーのヤング率

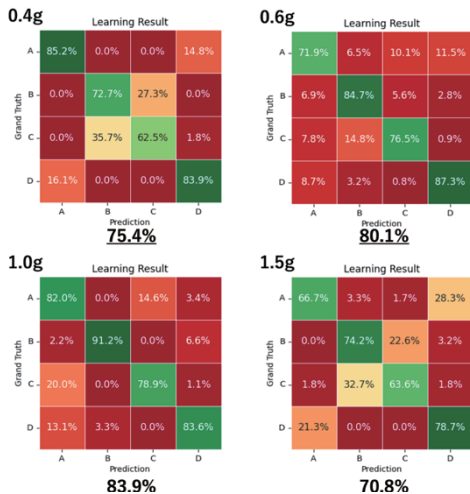


図 6 ゼラチン混合量ごとの識別結果

図 6 より、ゼラチン混合量が異なると、識別精度も変化していることがわかる。しかし、ゼラチン混合量が 0.4g の場合と 1.5g の時の識別精度が低いことから識別子のヤング率と識別精度の相関は単調ではないと言える。また、今回フレキシブルセンシングに使用した柔軟材料である Ecoflex00-30 のヤング率が 60~80[kPa] であり、これに一番近いヤング率を持つゼラチン混合量 1.0g の識別子が最も識別精度が高いことから、飲料の流動による振動を効果的に伝えることができる柔らかさが存在し、その柔らかさに近いヤング率を持つ識別子を使用することが飲料識別において重要であるということが明らかとなった。

4. 結言

本研究では、本来食品として用いられるゼラチンを飲料識別における識別子として使用し、その形状

や硬さが識別精度に与える影響を調査した。研究を通して、適切な形状、硬さの識別子を使用することで識別結果を向上させることができることが判明した。特に、識別子の硬さに関しては、硬さの調節が重要であることから、ゼラチン混合量の調節によって硬さを変化させやすいゼラチンは識別子として非常に有用であることを示した。

今後の展望としては、今回調査して得られた結果をもとに、識別子が飲料の流動を最も効果的に伝えることのできる硬さの特定を行い、さらに高精度の飲料識別を行うことを目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H04936, JP22K17972, 管理法人 NEDO の委託業務 (JPNP14004 と JPNP20004) によって支援を受けたものである。

参考文献

1. 白井邦郎. "食用ゼラチン." 調理科学 11.1 (1978): 23-30.
2. 長瀬駿介, 廣瀬航佑, 小川純, 渡邊洋輔, MD Nahin Islam Shiblee, 古川英光, 『口で転がす』機械学習法の提案: 柔軟材料を介するフレキシブルセンシングの信号処理に基づく飲料識別, 第 22 回情報科学技術フォーラム (FIT2023), (2023)
3. 長瀬駿介, 廣瀬航佑, MD Nahin, Islam Shiblee, 渡邊洋輔, 小川純, 古川英光, 炭酸飲料の品質評価に向けた実応答型テクスチャ識別装置の検討, 第 41 回日本ロボット学会学術講演会, (2023)
4. M. Christ, N. Braun, J. Neuffer, and A. W. Kempa-Liehr, Time series feature extraction on basis of scalable hypothesis tests (ts-fresh - a python package), Neurocomputing, vol.307, pp. 72-77, (2018).
5. F. Pedregosa et al, Scikit-learn: Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research, vol.12, pp. 2825-2830, (2011).
6. T. Kameyama, J. Ogawa, Y. Watanabe, M. N. I. Shiblee, A. Khosla, M. Kawakami, H. Furukawa, Soft-Matter Robot That Communicates Humans by Contacting, ECS Transactions, vol. 98, no. 13, pp. 65, (2020).
7. F. I. Sudo, J. Ogawa, Y. Watanabe, A. Khosla, M. Kawakami, H. Furukawa, Local discrimination based on piezoelectric sensing in robots composed of soft matter with different physical properties, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 34, no. 2, pp. 339-350, (2022).
8. K. Hirose, I. Sudo, J. Ogawa, Y. Watanabe, M. N. I. Shiblee, A. Khosla, M. Kawakami, H. Furukawa, Gel Biter: food texture discriminator based on physical reservoir computing with multiple soft materials, Artificial Life and Robotics, vol. 27, pp. 674-683, (2022.)

大型 3D プリンタによる「まちアイテム」制作を通じた Freeline.Tube 技法の検証

Verification of the Freeline.Tube Technique through the fabrication of 'Urban Items'

by Large-scale 3D Printer.

荒井 将来¹, 田中 浩也¹, 高橋美帆¹

Masaki ARAI¹, Hiroya TANAKA¹, Miho TAKAHASHI¹

¹慶應義塾大学

¹Keio University

【要約】

昨今,大型 3D プリンタで面格子のようなパネルを造形し,パーティションなどに応用する事例が登場してきており,オランダのデザインスタジオ Aectual では,大型 3D プリンタとリサイクル材料から造形されるパーティション「Freeline.Tube」を展開している。本研究は,Freeline.Tube 技法を応用し,鎌倉市で必要とされる新たな公共財「まちアイテム」である「可搬型 DJ ブース」を,リサイクル材料を原料とする大型 3D プリンタを用いて,合計 3 種類制作した。本研究は,制作を通じて Freeline.Tube 技法の特徴に関する検証や,その応用可能性について述べる。

キーワード: 大型 3D プリンタ,リサイクル材料,ツールパス,デザイン

【Abstract】

Recently, examples have emerged in which large 3D printers are used to create panels that look like lattices, which are then applied to partitions and other products. Aectual, a Dutch design studio, has developed a partition called "Freeline.Tube," which is made from a large 3D printer and recycled materials. This research applied the Freeline.Tube technique to create three types of "portable DJ booths," a new public good "town item" needed in Kamakura City, using recycled materials and a large 3D printer. Through the fabrication process, this study verifies the characteristics of the Freeline.Tube technique and describes its potential applications.

Keywords : large-scale 3Dprinter, Recycled materials, toolpath, design

1. 序論

本研究の舞台となる神奈川県鎌倉市には,国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)」において,地域共創分野育成型プロジェクトとして採択された「デジタル駆動超資源循環参加型社会共創拠点」の地域研究活動サテライト拠点として開設された研究拠点「リサイクリエーション慶應鎌倉ラボ」があり,地域内資源循環を目指した様々な取り組みを行っている。

本研究は,地域内資源循環を目指した取り組みの一環として『鎌倉市で回収された廃プラスチックから鎌倉市で必要とされる新たな公共財「まちアイテム」をつくり,地域で長く使ってもらおう』アプローチを構想し,今回が第一弾となる。

まちアイテム第一弾は,鎌倉市のローカル FM である「鎌倉エフエム」・パーソナリティーの小松あかり氏による提案・要望を基に「可搬型 DJ ブース」とした。デザインは慶應義塾大学の学生 3 チームが担当し,可搬型 DJ ブースに求められる要件や特徴に近い,オランダのデザイン事務所 Aectual が手掛けるパーティション「Freeline.Tube」[2]の技法を参考にデザインを決めた。リサイクル材料を原料とする大型 3D プリンタで造形し,ジョイントの設置などの後処理を経て,合計 3 種類制作した。制作した可搬型 DJ ブースは実際にラジオの

公開収録で使用された。本研究では,制作を通じた Freeline.Tube 技法に関する検証をしつつ,その応用可能性を探る。

2. 先行事例

本研究の先行事例として,オランダのデザイン事務所 Aectual が手掛けるパーティション「Freeline.Tube」を挙げる。Aectual は 3D プリントに特化したオランダのデザイン事務所で,リサイクルプラスチックと 3D プリンタを用いて建築の内壁やパーティション,店舗のディスプレイ等を手掛けている。その中でも Freeline.Tube は,ユーザーがデザインしたグラフィックパターンを基にパネル状で 3D プリントし,ジョイントを用いて組みあげ,パーティションとしている。

Freeline.Tube は,空洞が多く比較的軽量で,持ち手となりえる箇所が多く可搬性に優れるだけでなく,折り畳むことで使用時と輸送時のモードを変えられるといった実用性もあると考えられる。また,パターンそのものが構造体と文字広告(ロゴや記号)の機能を併せ持つといった点が特徴として挙げられる。これらの特徴は,今回制作するまちアイテム(可搬型 DJ ブース)に求められる要件と合致し,本研究に「Freeline.Tube 技法」が適していると考えた。

また, Freeline.Tube には, Aectual から発行されるプロダクトシート内にデザインのガイドライン[2]があり, 孤島のように離れたパターンは避ける, 平行線は 25mm 以上間隔を空けるなど, 3D プリントを成功させるためのポイントがまとめられている。本研究では, このガイドラインを基に, パターンデザインや 3D プリントのツールパス設計を進め, 発展させていった。

3. 製作

3.1 製作手順

本研究は, はじめに依頼者である小松氏から可搬型 DJ ブースの要望・要件をヒアリングし, ①鎌倉エフエムの周波数 82.8 をデザインに取り入れてほしい, ②鎌倉エフエムのシンボルとなるような形, ③車で持ち運びが可能なこと, ④保管時に形をコンパクトに出来ること, といった要望をいただいた。ヒアリングを基に学生 3 チームでそれぞれコンセプト・デザインを練り, FFF 方式卓上 3D プリンタやスチレンボードを活用して手早く DJ ブースのミニチュアサイズプロトタイプを作り, 小松氏にコンセプトやデザインの説明, プロトタイプを用いた輸送時・使用時のイメージを伝えた。

3D プリント用のデータ作成には”Fabrix”[3]を用い, Illustrator で形状(≒ツールパス)をデザインし, Fabrix で GCode に変換, 大型 3D プリンタでパネルを造形する。最後に, ジョイントの取付や組立などの後処理を施すといった手順で製作を行った。

3.2 製造装置

本研究では, 慶應義塾大学とエス.ラボ株式会社で共同開発した FGF(Fused Granular Fabrication)方式大型 3D プリンタ「ArchiFAB TATAMI」で造形した。ArchiFAB TATAMI は樹脂ペレットまたはプラスチック製品を粉砕したフレーク状の材料を原料とし, 最大で 1m 角の造形範囲をもつため, 椅子やベンチ, テーブルといった家具スケールの物を作るのに適しているといった特徴をもつ。



図 1. ArchiFAB TATAMI

3.3 材料

本研究では, 2 種類のリサイクル材料をブレンドしたものを使用した。1 つは, 花王株式会社が 2015 年より鎌倉市を含む全国 5 地域で行う”リサイクリエーション”活動

を通じて回収された, 洗剤・シャンプーなどの”つめかえパック”をリサイクルした材料である。

もう 1 つは, 冷蔵庫由来のリサイクル材料で, 冷蔵庫に用いられるポリプロピレン(PP)と冷蔵庫の断熱材として用いられるグラスファイバー(GF)が混ざった材料である。

つめかえパックのリサイクル材料は熱収縮率が高く, 3D プリント時の変形・反りが大きく造形が困難であった。そこで, 熱収縮の抑制効果があるグラスファイバー入りの家電リサイクル材料と混ぜる材料改質を施し, リサイクル材料のみを用いつつ 3D プリント可能な材料とした。

本研究では, 50%ずつの割合で 2 種類のリサイクル材料をドライブレンドすることで, 熱収縮(反り)を抑え, 3D プリント可能な材料に改質した。



図 2. 使用したリサイクル材料
(画像左: つめかえパックリサイクル材料, 画像右: 冷蔵庫リサイクル材料)

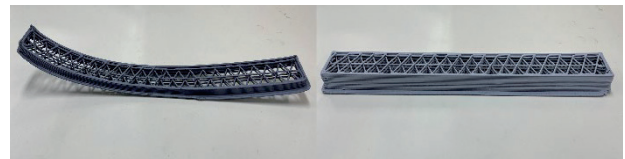


図 3. 材料改質前後の反りの様子
(画像左: 改質前, 画像右: 改質後)

3.4 ツールパス設計

可搬型 DJ ブースのデザインが平面充填パターンやロゴなど, 線から構成されていることから, 一般的な 3DCAD ソフトウェアではなく Illustrator と Fabrix を用い, パスを直接 GCode に変換する手法をとった。

ツールパス設計において最も重要なのは, パターンを一筆書きとすることである。一般に, FGF 方式大型 3D プリンタでは, 樹脂の吐出と停止を瞬時にコントロールするのが難しく, 一時的に吐出を停止してから移動動作を行うと, 糸引きといった造形エラーを生じたり, 一時停止後にスクリューを回転させても吐出までにラグが生じたり, 吐出が安定するまでの間の造形クオリティが低下する傾向にある。このような理由から, 造形エラーを極力なくし造形品質を上げるには 1 レイヤー毎のツールパスを一筆書きとすることが求められるため, 本研究では 1 レイヤー毎のツールパス(パターン)を一筆書きとしている。

本研究では, 実際にパネルの造形に入る前, 予備実験としてツールパスの経路やパス間の距離を変えながら造形テストを重ね, ツールパス・造形品質の改良を進

めた。図6に、ツールパス改良の一例を示す。改良前は、ツールパスの間隔が狭く、吐出した樹脂同士が強く押し付けあうことによる造形の荒れや、鋭角のカーブにおいて樹脂の吐出量が局所的に増え、造形が荒れるといった造形エラーが生じた。ツールパスの間隔を適切に設定する、鋭角のカーブはアールをつけて丸める、ツールパスの経路を変更するといった方法で、造形品質を向上させた。



図4. ツールパス改良の前後

3.5 機構とジョイント

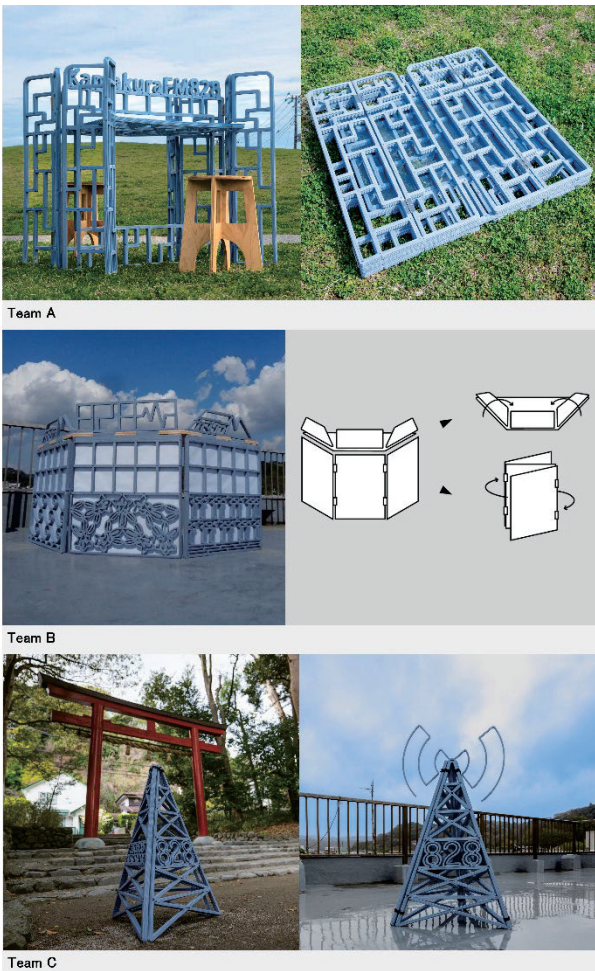


図5. 3種類の可搬型DJブース

図5に、本研究で製作した、チームごと合計3種類の可搬型DJブースを示す。TeamAは、ヒンジで連結された6枚のパネルから構成され、迷路のようなパターンと鎌

倉FMのロゴを基調としたデザインとなっている。観音開きのように、2枚の戸が中央から左右に両サイドに開く機構とすることで、4か所の軸で固定する安定性と、コンパクト性の両立を意図している。また、最後に樹脂製天板を載せることで、机として機能する。

TeamBは、ヒンジで連結された3枚の大パネルと木製天板とヒンジで固定された3枚の小パネルから構成される。大パネルは障子をモチーフとし、下半分が笹竜胆、海鳥居といった鎌倉にまつわるパターン、上半分は障子の格子をイメージしたパターンで、パネルに障子紙を貼っている。3枚の小パネルは欄間をイメージし、鎌倉FMの周波数や、ロゴデザインを基にしたデザインである。

TeamCは、3枚1組のパネル6枚、アンテナをイメージしたアイテムから構成される。3角形のパネルをマジックテープで結び合わせることで、電波塔をモチーフとした構造体が完成し、フックを取り付けることで、ホワイトボードなどを固定するスタンドや、鎌倉FMのアイコンとして機能する。パネルには鎌倉FMの周波数82.8MHzをモチーフとしたロゴや、鎌倉FMのキャッチコピー「ハート to ハート」から着想した、8と2を組合せたハート型のパターンで装飾されている。

5. まとめ

本研究で製作した可搬型DJブースは、完成後に車に載せて鎌倉FMに引き渡し、実際のラジオ公開収録[4]を皮切りに、継続して使用されている。

本研究は、地域内資源循環を目指した取り組みの一環として、地域で回収したりサイクル材料から「まちアイテム」をつくり、鎌倉市に還すにあたり、まちアイテムとして想定されるもの(ベンチや遊具など)は一般に大きく、重いため、特に可搬性は鍵となる要素であった。Freeline.Tube技法を応用した今回のDJブースは、持ち手となり得る場所が多く、折れる、折り畳めるといった工夫を加えることで使用時と輸送時のモードを分けることができ、可搬性に優れていることが分かった。

軽量性については、使用したリサイクル材料の靱性が低く、比較的脆い材料であり、構造強度を十分持たせるためにパターン1本の太さを太くしたこともあって、想定よりも重くなってしまった。また、層間接着(Z方向)は問題なかったものの、ツールパスによってはXY方向の接着が弱いといった課題もでてきた。Freeline.Tube法を活かすには材料面も重要であり、XY方向の接着が期待できる程度の粘性が必要で、それなりの靱性・強度を備える必要がある。

また、Freeline.Tube技法は平面充填パターンとの相性が良く、企業のロゴや、地域の特徴やイメージに沿ったパターンを当てはめることで、その地域や場所に即したユニークなデザインや、広告・記号的な役割を付与することができることが分かった。そして、可搬性や軽量性、パターンのユニークさを活かすには、構造設計(パターンデザイン)、ツールパス設計、材料など様々な要素が統合される必要がある。

今後は、可搬型 DJ ブースの使用に伴う経過を注視しつつ、まちアイテムを二の矢、三の矢と広げていきたい。



図 6. ラジオ公開収録時の DJ ブース

9. 謝辞

本研究は、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2111 の支援を受けたものです。

本研究は、まちアイテムの提案者である鎌倉エフエムのパーソナリティー・小松あかり氏、特別研究プロジェクトとして本研究に参加し、可搬型 DJ ブースのデザイン・設計を担当した学生である磯崎学氏、上野祥太氏、河合慈英氏、小林誠弥氏、佐藤諒弥氏、白井雅也氏、高橋美帆氏、千葉楓夏氏、平井瑛大氏、三浦稔貴氏、矢田美涼氏の協働によるものである。この場を借りて深く感謝する。

参考文献

1. JST 共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)リストでつながる「共生アップサイクル社会」共創拠点, <https://coinext.sfc.keio.ac.jp/#contact>(参照 2023-09-29)
2. Freeline.Tube,Aectual,<https://www.aectual.com/systems/freeline-tube>(参照 2023-09-29)
3. Fabrix, <https://www.fabrix.design/>(参照 2023-09-29)
4. FM82.8 KAMAKURA GOOD MORNING STATION, [82.8 鎌倉 FM 2023.4.1.OA]地域資源循環の要！これからのものづくりを支える「リサイクリエーション 慶應 鎌倉 ラボ」に注目！, https://note.com/good_morning_828/n/n085f1b5c9f32?fbclid=IwAR3Vue9hniPBEw2Bb9pZumHFTSBjvHc1Pn949IE5Zdo_bqif9496W4VZGoQ(参照 2023-09-29)

デジタルファブリケーションによる日本画表現に基づく彩色手法の検討

A Basic Study of Painting Method Based on Japanese Painting Expressions with Digital Fabrication

溝脇 由女¹, 笥 康明²

Yume MIZOWAKI¹, Yasuaki KAKEHI²

¹ 東京大学大学院学際情報学府 ² 東京大学大学院情報学環

¹ Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

² The Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

【要約】

日本画では素材の表面張力を生かしてマチエールを表現する盛り上げ技法により、実体感のある豊かな質感表現を可能にする。本研究では、デジタルファブリケーション技術を用いて岩絵具を用いた盛り上げ表現を機械的に実現し創作を支援する手法開発を目指す。今回このために、筆者らは 3D プリンタとディスペンサを連動させ、入力データに基づいた岩絵具による描画システムを実装した。本発表では、関連研究の整理、システム設計や素材の構成の詳細、基礎的実装の結果を報告する。

キーワード: デジタルファブリケーション, 日本画, 絵画, 伝統技法, 岩絵具

【Abstract】

In Nihonga (Japanese painting), the surface tension of the materials is utilized to express 'matière' through a technique of raising the paint, enabling a rich texture representation with a tangible sense of substance. In this study, we aim to develop a method to mechanically realize this raised texture using mineral pigments with the help of digital fabrication technologies. To achieve this, we integrated a 3D printer with a dispenser to implement a painting system based on input data using mineral pigments. In this paper, we report on the review of related research, details of the system design and material composition, and the results of the preliminary implementation.

Keywords: Digital Fabrication, Japanese Painting, Painting, Traditional Craft, Mineral Pigments

1. はじめに

日本で古くから伝わる絵画の技法を引き継ぐ日本画は、西洋の油彩画では乾性油を用いるのに対して、膠を媒材として画材に用い、岩絵具などの顔料を接着する。岩絵具は、水晶や翡翠、マラカイト、トパーズ等の鉱物を粉碎・精製した粉末を膠液に攪拌し、和紙や絹本、木材に塗布して利用される。粉末の粒度が高いものは鉱物特有の光の反射があり、粒度が低ければ絵具はマットな質感となる。岩絵具は彩色後も保存性が高く、劣化した場合は蒸気によって基底材の損傷を抑えながら剥離・修復が可能であるという特徴がある。

日本画の彩色は、絵具を薄く広げて塗る平塗り、面相筆などによる細密描写や縁をぼかす隈取り等、さまざまな技法が開発されてきた。中でも盛り上げ技法は現代日本画の特徴的な彩色表現である(図1)。これは、図2に示すように岩絵具を画面の上に厚みを持って塗布し、さらにその上に絵具を重ねることでエンボスのように 2.5 次元的で実体感のある絵画表現を可能にするものである。一方で、岩絵具は膠液の粘性が低いため、立体的な描画にはスキルを必要とし、また筆を用いた手作業による描画には長い作業時間を要する。

そこで筆者らの研究では、今回 3D プリンタを用いて岩

絵具を出力し、盛り上げ技法に基づく彩色を機械的に行う技術開発を行う。岩絵具の持つ質感を活かし、伝統的な日本画表現をデジタルファブリケーションに取り込むことを目指す。これは、機械による日本画表現の自動化のみならず、人間の描き手による描画と機械描画の組み合わせによる新たな表現開拓や、初心者の描き手に向けた描画作業の補助など、幅広い展開が考えられる。

本稿では以下、関連研究をまとめた後に提案手法の詳細、システムの設計と実装、描画結果について述べる。

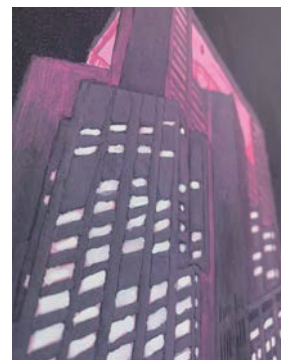


図 1. 日本画の盛り上げ表現

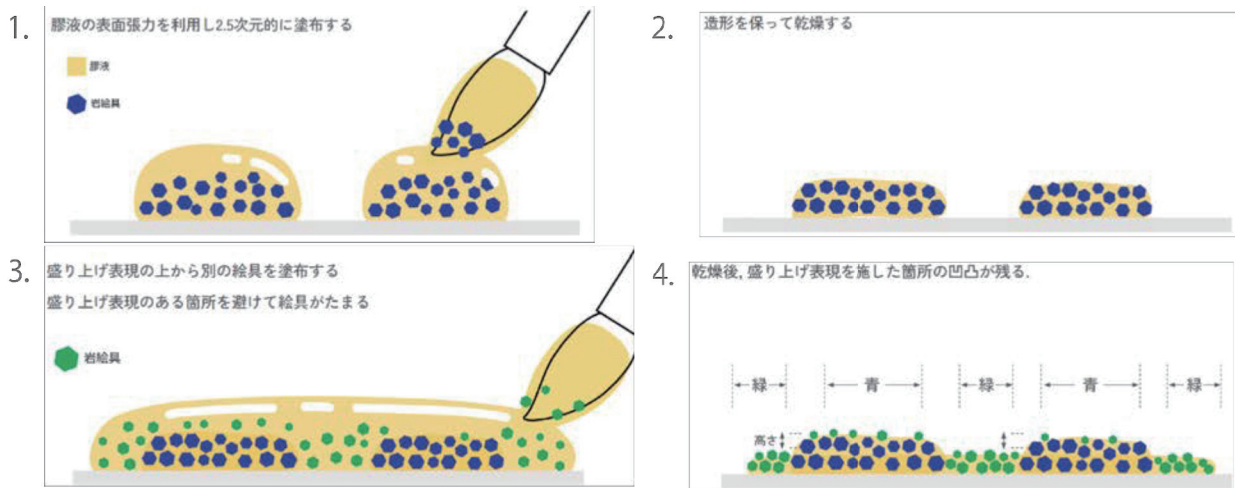


図 2. 筆による一般的な盛り上げ表現の手順

2. 関連研究

近年は伝統技法にデジタルファブリケーション技術が介入している事例がある。Ronald Raelらの陶芸の3Dプリントでは同一オブジェクトの効率的な造形と、複雑な細部のカスタマイズ・微調整が可能になり、これまで人の手だけでは達成が難しかった表現が行われている [2]。本研究ではデジタルファブリケーション技術を応用することで膠による復元可能な彩色のアイデンティティを残しながら、より柔軟な創作活動を支援する手法の開発を目指す。

日本画の岩絵具彩色の自動化に関する先行事例として、河相らが絵画表面を2.5次元的に再現した岩絵具調複製面の開発を行っている [3]。これは絵画をインクジェット印刷したものに日本画のざらつきや凹凸の風合いを付与するために岩絵具に近い鉱物の粉末を上部の透明な樹脂レイヤにスクリーン印刷するものである。また角谷は岩絵具と透明バインダーを混ぜたインクを布にスクリーン印刷しアイロンの熱で固定する技法を開発、衣類のデザインに応用した [4]。これらのスクリーン印刷を用いたアプローチは、粒子の大きさが様々な顔料に対してもスクリーンのメッシュの粗さによって対応可能で、版が完成すれば迅速に大量生産できるという利点がある。一方で、多色や多層の印刷には版を複数制作する必要があり、版のサイズに印刷のサイズの制限を受けるほか、状況によって柔軟に彩色をおこなう創作活動には不向きである。

3. 提案とシステム設計

本研究では、膠および岩絵具を含むゲルを3Dプリントすることで、日本画の盛り上げ技法に基づく着彩手法を提案する。具体的には絵具を充填したシリンジを3Dプリンタのノズル部分に組み込み、空気圧ディスペンサによって指定した圧力で射出描画を行うことにより、表

面張力を利用した造形である盛り上げ表現を機械的に行う。

3.1 材料

膠の成分はゼラチンと比べるとわずかな不純物を含む特徴があるものの、主に食品用ゼラチンと同様の動物性のコラーゲンで構成される。通常の膠をシリンジから押し出す場合、ゲル化する温度の閾値が低くゲル状に固まるまでに時間がかかり、3Dプリンタでの造形は難しいという課題があった。この課題に対する先行研究として、Warnerはゼラチン液にカップカラギナンを添加することによりゲル化温度を上昇させ、保温されたシリンジ内ではゾル状の液が射出後すぐに寒天状にゲル化することで押出積層式3Dプリンタによる精細な出力を可能にした [5]。

今回筆者らはこの手法を参考に、熱湯に5%の粒膠と3%のカップカラギナンを混合した媒材と岩絵具（岩黒5番）を2:1の割合で混合しながら65°Cに温度を低下させ、約70°Cの湯煎器に設置されたシリンジに充填する。基底材には雲肌麻紙を用いた。

カップカラギナンは海藻由来の食品添加物で、40°C以下で寒天状にゲル化し、70°C以上でゾル化する物性をもつ。温度変化による反応が早く、65°Cまで温度を低下させると粘度が上昇し、岩絵具が液中に分散した状態を保つことでシリンジによる射出を可能にする。カップカラギナンは絵具の添加物として加えると、媒材が膠のみの通常の彩色と変わらずに彩色後も水分と熱によって基底材から分離し、貴重な資源である岩絵具を元の粉末状態に戻すことが可能である。

3.2 ハードウェア構成

今回設計したハードウェアの全体構成を図3に示す。

3D プリンタ(Genkei LEPTON2)のヘッドに後述するシリンジを取り付け、3D プリンタヘッドの移動をコンピュータから制御すると共に、それと同期する形でディスペンサを介してシリンジからの材料射出を制御する。

図4はシリンジ周囲の詳細図である。シリンジの中には3.1で述べたカラギナン添加絵具を入れる。シリンジの周囲に水を格納する湯煎装置を取り付け、フレキシブルヒータおよび温度センサで中の水の温度を70°Cに保つ。

また、エアコンプレッサ(Spray Work HG Compressor Revo II)をディスペンサ(Nordson ULTIMUS V)に接続する。

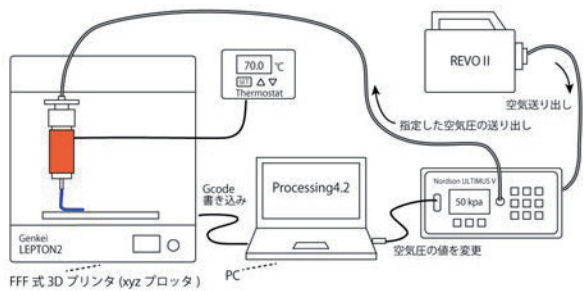


図3. 描画装置の構成

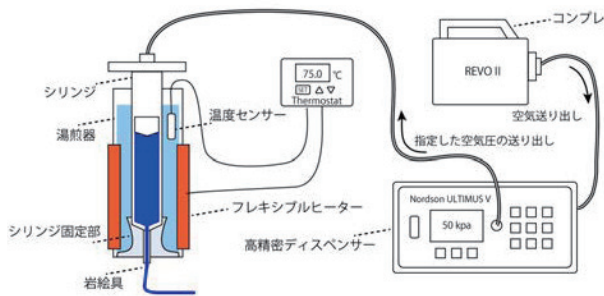


図4. 湯煎によるシリンジへの加熱とディスペンサ

3.3 制御システム

今回は基礎的な制御システム実装として、以下のような手続きで描画制御を行なった。まず、カラギナン添加絵具はノズル先端が冷えて詰まりやすいため、描画開始前に50 kPaで先端のノズルづまりを解消するまで射出する。その後、3Dプリンタとディスペンサを連携させ、シリンジの位置を移動させながら10~30 kPaでゲルを押し出し、一筆描きによる描画を行う。

PCから3DプリンタへのGcodeの送信およびディスペンサの射出圧の制御は、Processing 4.2のシリアル通信を用いて実装した。ディスペンサの射出タイミングの制御は、今回は手動で行なった。

3.4 描画データ

今回は描画中に絵具の射出・射出停止制御を行う必要のない一筆描きのプリントラインをIllustratorで描き、Grasshopperを用いてGcodeを生成した。以下に描画デ

ータの例を示す。

植物の葉(図5): 日本画には彫り塗りと呼ばれる描線を避けて絵具を塗る手法があり、葉の造形を一筆書きによる彫り塗りが可能になるラインを制作した。余計な直線は射出直後に冷えて寒天状に固まるため簡単に取り除くことができる。

立涌文様(図6): 日本では伝統的な文様が数多く、着物の柄などで絵画に頻出する。その中から一筆書きによる描画が可能な文様を選択した。

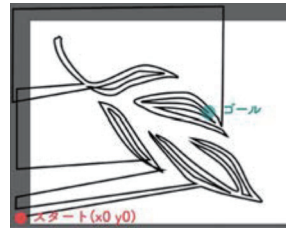


図5. 植物の葉

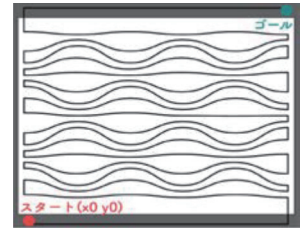


図6. 立涌文様

4. 出力結果

図8の(a)~(e)は左図が射出直後、右図は乾燥後の様子である。(b)では射出後に余計な直線を取り除いた。各図の下の数字は左からノズル径、GcodeのF値、ディスペンサの射出圧であり描画精度や断面の形状に関わるパラメータを示す。ノズル径と射出圧は小さくなるほど、F値は大きくなるほど細い線を描くことができるが、描線が細いほど断面が筒状になり乾燥後の定着が悪くなるのがわかった。

射出描画された(a)~(e)は岩絵具彩色の特徴的なラメ状の光沢を残しているが、カップカラギナンが白濁した成分であるためわずかに彩度が落ちるほか、筆による描画と比べると均質でなめらかに仕上がる。また、同じ濃さの膠液であってもシリンジから射出したほうが、筆によって絵皿の絵具をすくって塗布するよりも均質に媒材と岩絵具が混ざっている絵具で描画されるため、彩色部の膠の成分が濃くなる。

5. まとめと今後の展望

本稿ではゼラチンの3Dプリント技術を応用し、日本画の彩色手法のひとつである岩絵具による盛り上げ表現をデジタルファブリケーション技術に取り込む手法を提案した。

今回は実装の簡単のために一筆書きによる描画を行ったが、Gcodeに応じて自動でディスペンサに射出・射出停止命令を行うことによって、より自由度の高い描画を可能にする開発を進め、これまで筆による描画が難しかったパラメトリックな表現を用い

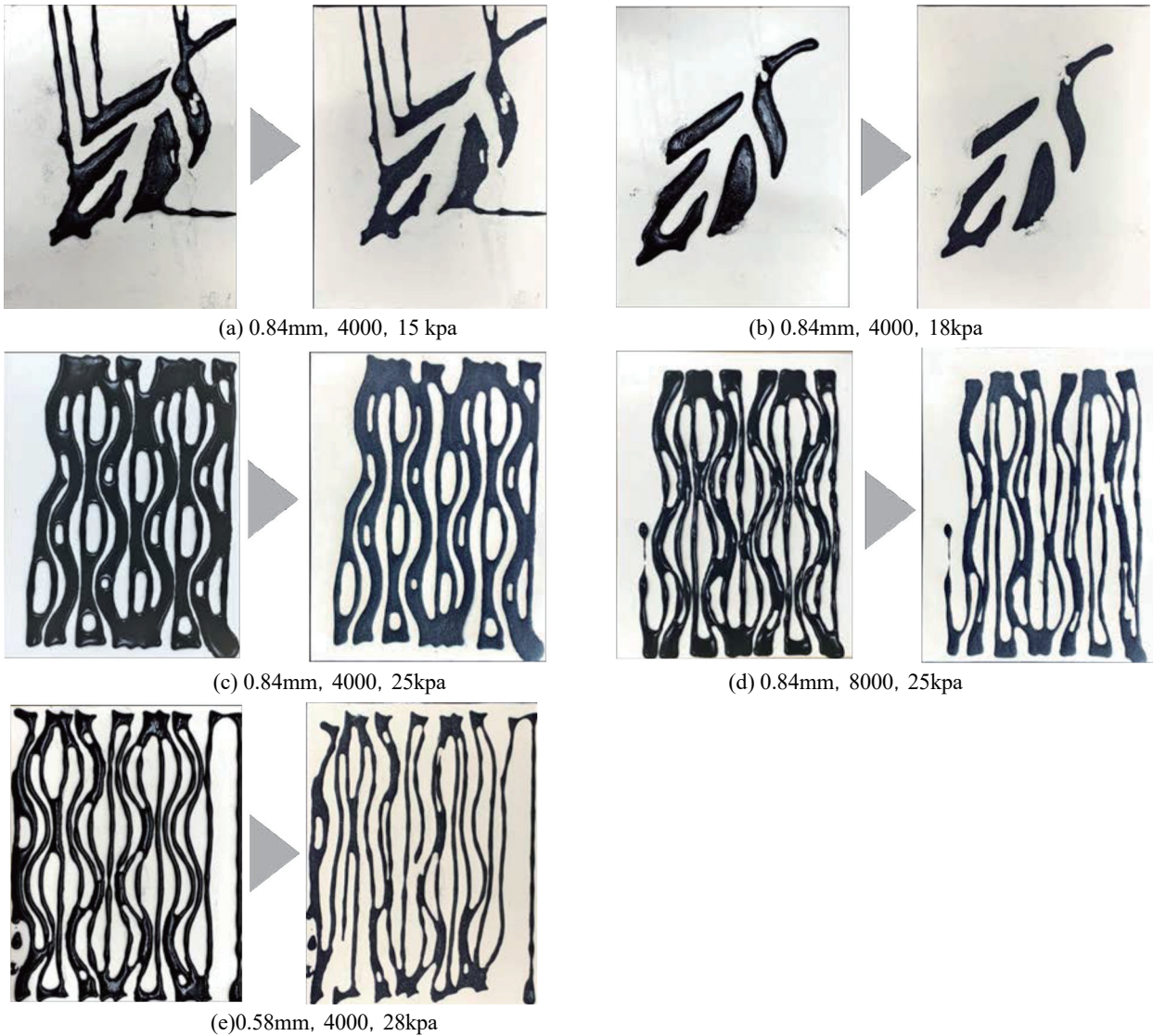


図 8: 出力結果(数値は左からノズル径, Gcode の F 値, ディスペンサの射出圧)

た作品制作を行う。描画結果から本手法では定着に課題を抱えており、媒材の成分割合や基底材の状態など、定着を良くするための条件を探索する必要がある。

また本手法による彩色の印象評価や、彩色表面の機械的な測定を行い、鮮やかさ、光沢、凹凸が筆による彩色と比べてどのように異なるか検証する。また本手法を作家に共有し、制作への効果についてフィードバックを得る。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 石踊 紘一, 高木 三郎:「日本画の表現技法—日本画におけるマチエールの可能性を追求」美術出版社, 1978.
- [2] Ronald Rael, Virginia San Fratello, Clay Bodies: Crafting the Future with 3D Printing, Architectural

Design, 87(6): 92-97, 2017.

- [3] 河相彰, 佐々木健: 立体的に再現した岩絵具調複製画の作製方法の開発. 日本印刷学会誌, 44(2), 98-102, 2007.
- [4] 角谷彩子: 岩絵具を用いたスクリーンプリント技法の研究. 文化学園大学紀要, 47, 9-16, 2016.
- [5] E.L. Warner: Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications. Journal of Food Engineering, 246, 58-66, 2019.

光造形 3D プリントによるシリカガラス製ジャイロイド構造体

Fabrication of Silica Glass Gyroid Structures via Photopolymer 3D Printing

伊藤 慎一郎¹, 高木 祐輝¹, 藤野 茂²

Shinichiro ITO¹, Yuki TAKAGI¹, Shigeru FUJINO²,

¹京都産業大学, ²九州大学

¹Kyoto Sangyo University, ²Kyushu University

【要約】

高純度 SiO₂ からなるシリカガラスは高い機械強度, 耐久性, 光学的透明性, 耐熱性, 耐薬品性などの物性において優れる素材として知られている。しかし, シリカガラスを素材とした光造形式 3D プリント技術による複雑形状の報告は少ない。本研究では, シリカガラスを素材とした光造形 3D プリント技術により, ジャイロイド(Gyroid)構造体の作製成果を報告する。3DCAD ソフトウェア Rhinoceros と Grasshopper を用いてパラメトリックモデリング手法にてジャイロイド構造体の 3D データを作成した。20mm の立方体ユニットを 3D 出力, 焼結し, マイクロスコープで観察することで亀裂の有無を検証した。最後に, 本研究で得られた成果に基づき, シリカガラス製ジャイロイド構造体のデザインへの展開可能性について議論する。

キーワード: 3D プリント, シリカガラス, ジャイロイド

【Abstract】

Silica glass made from high-purity SiO₂ is known as an excellent material due to its high mechanical strength, durability, optical transparency, heat resistance, and chemical resistance. However, there have been few reports on the fabrication of complex shapes using photopolymer-based 3D printing technology with silica glass as the material. In this study, we report the successful fabrication of Gyroid structures using photopolymer 3D printing technology with silica glass. 3D data of the Gyroid structure was created using parametric modeling techniques with the 3DCAD software Rhinoceros and Grasshopper. A 20mm cubic unit was 3D printed, sintered, and observed under a microscope to verify the absence of cracks. Finally, based on the results obtained in this study, we discuss the potential for designing silica glass Gyroid structures.

Keywords: 3D Printing, Gyroid, Silica Glass

1. 序論

高純度 SiO₂ からなるシリカガラスは高い機械強度, 耐久性, 光学的透明性, 耐熱性, 耐薬品性などの物性において優れる素材として知られている[1]。また光造形 3D プリント技術によるシリカガラス造形の研究は近年報告されているが[2], シリカガラスを素材とした DLP (Digital Light Processing) 式光造形 3D プリント技術による緻密な複雑形状の報告は少ない。本研究では, シリカガラスを素材とした光造形 3D プリント技術により, ジャイロイド(Gyroid)構造体の作製を試みた。

2. シリカガラスを素材とした 3D 造形

藤野による特許 7178103 「無機成形体製造用組成物, 無機成形体の製造方法」では, シリカガラスを主成分とした組成物を用いた光造形 3D プリント技術に関する新たな手法が提案されている[3]。

本手法では, 非晶質 SiO₂ を含むシリカナノ粒子と光硬化性樹脂を備えた組成物を, 光を照射することで硬化し, 3D 造形の第 1 成形体を形成する。その後, 焼成により光硬化性樹脂を除去し, 無機粒子を主材料とする第 2 成形体を得る。さらに, この第 2

成形体を焼結することで, 高純度シリカガラス成形体を得る。組成物の塗布や光照射の工程を交互に行うことで, 硬化物の積層体として 3D 造形物が形成される。この方法により, 光造形式 3D プリントを用いてシリカガラスを主成分とする成形体を造形する。

この手法は, シリカガラスの特性である高い透明性を持つ複雑な形状の無機成形体の製造を可能とするものであり, シリカガラスを用いた 3D プリント技術の新たな可能性が広がることが期待される。

本研究では, 高純度シリカガラス素材の 3D 造形可能性とデザイン応用可能性の拡張のために, 特許 7178103 「無機成形体製造用組成物, 無機成形体の製造方法」の手法を用いる。

3. シリカガラス素材のジャイロイド構造体の 3D 造形

3.1. 3D データ

3DCAD ソフトウェア Rhinoceros と Grasshopper を用いてパラメトリックモデリング手法にてジャイロイド構造体の 3D データを作成した(図 1). 20mm 四方のジャイロイド構造立方体を 3 種類作成した. 3 種類の構造の違いを図 2 にまとめる.

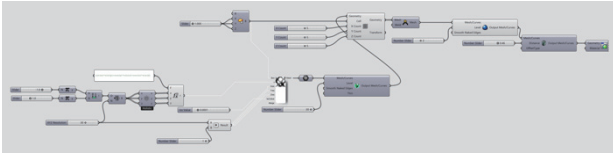


図 1. 3DCAD ソフトウェア Rhinoceros と Grasshopper のプログラム

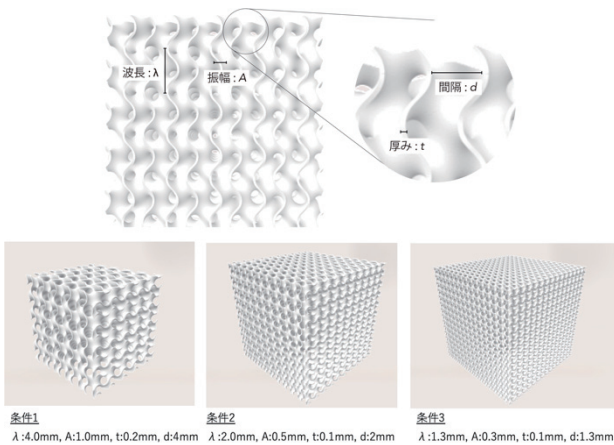


図 2. ジャイロイドデータの条件

3.2. 3D 出力条件

3D プリントには, 武藤工業製 DLP 式 3D プリント ML-48 を用いた. 出力条件は光源波長 405nm, 1 層あたりの露光時間 10 秒とした.

3.3. 結果

各条件のデータを 3D 出力し焼成した焼結体をマイクロスコップで観察した. 第1焼成及び第2焼成後に亀裂が確認されず成形できた条件は, 第1焼成時の昇温速度条件は昇温速度を室温から 850°Cまで 5°C/min とし, 焼成時間 30 分, 第 2 焼成温度を 1580°Cとしたジャイロイドデータ条件 1 のものであった(図 3).

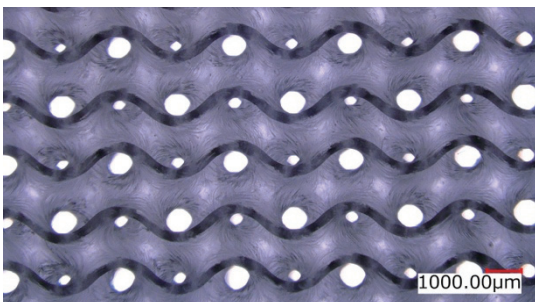


図 3. 条件(1)のマイクロスコップ撮影

4. シリカガラスのジャイロイド構造体のデザイン応用性

本実験で作成したシリカガラス素材のジャイロイド構造体を応用したデザイン展開として, ジャイロド構造のキューブ型照明を試作した(図 4). これはシリカガラスの透明性とジャイロド構造の複雑さを光の透過によって視覚的に感じるものである. 焼成体の透明性を高めることで, 光透過度を高めることが課題として示唆された. 焼成温度を上げることで焼結体の透明度を高める可能性があるが, 高温での焼成により変形が生じやすくなる.

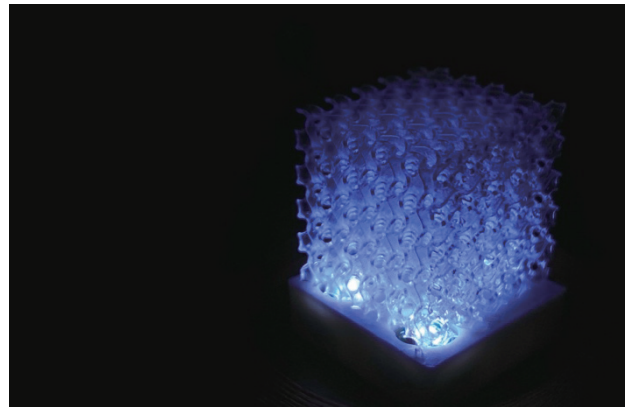


図 4. ジャイロド構造のキューブ型照明の試作品

5. まとめと展望

本研究では, パラメトリックモデリング手法にてジャイロイド構造体の 3D データを作成し, 非晶質 SiO_2 を含むシリカナノ粒子と光硬化性樹脂による組成物を素材として 3D 造形を試み, シリカガラスの透過性を活かしたデザイン展開可能性を見出した. データ条件 2 および 3 に示す緻密な構造を持つ焼成体造形のためには組成物の粘性と表面張力ならびに, 組成物中のシリカ粒子の濃度, 光造形条件の詳細な検討が必要である. 更には, 第 2 成形体の最適焼結条件(温度, 時間)と透明性を検討することで, デザイン展開のバリエーションを増やすことが今後の課題である.

参考文献

1. 藤野 茂, “切削不要・微細表面構造を有する透明シリカガラス焼結体の作製”, 粉体および粉末冶金, 69(2) (2022), pp.73-77.
2. Joseph T. Toombs et al. ,”Volumetric additive manufacturing of silica glass with microscale computed axial lithography”.Science376,308-312(2022)
3. 藤野 茂, “無機成形体製造用組成物, 無機成形体の製造方法”, 特許 7178103 (2022), 日本国特許庁.

ノニオン系ポリマーを用いた 3D プリンティング向け熱可塑性樹脂材料の機能化

Functionalization of Thermoplastic Material for Additive Manufacturing via Nonionic-polymer

川上 結子, 中村 達人, 浅川 慕子, 野村 和清

Yuko KAWAKAMI, Tatsuhito NAKAMURA, Motoko ASAKAWA, Kazukiyo Nomura

株式会社 ADEKA

ADEKA Corporation

【要約】

本研究では静電気拡散剤として新規に開発したノニオン系ポリマー(3D-AS01)を使用し、高い静電気拡散性と着色性の両立が可能な積層造形用材料の開発を目指した。3D-AS01 を配合した ABS 樹脂フィラメントを用いて MEX 式 3D プリンタで積層造形試験片を作成した結果、静電気拡散レベルの表面抵抗率を達成した。また顔料による任意の着色も可能であった。さらに、造形方向を変更した場合でも安定した静電気拡散性能が発現した。従って 3D-AS01 は樹脂に高い静電気拡散性付与が可能なノニオン系ポリマーであり、意匠性と安定した静電気拡散性が求められる積層造形樹脂材料に好適な樹脂改質剤であるといえる。

キーワード: 熱可塑性樹脂, 材料押出方式, 積層造形, 静電気拡散性, 意匠性, 異方性

【Abstract】

In this study, we have tried developing the material for additive manufacturing by addition of nonionic-polymer (3D-AS01) to achieve both good static-charge dissipation properties and good designability. Test specimen was prepared from filament based on ABS resin and 3D-AS01 by using MEX-type 3D printer, and it achieved static-charge dissipation level of the surface resistivity. In addition, optimal coloring was achieved by pigments. Moreover, stable performance was exhibited regardless of build orientation when using 3D-AS01. Therefore, nonionic-polymer 3D-AS01 is a suitable modifier for the materials which are prepared by MEX-type 3D printing and are required both good designability and stable static-charge dissipation performance.

Keywords: Thermoplastics, Material Extrusion, Additive Manufacturing, Static-charge dissipation, Designability, Anisotropy

1. 序論

3D プリンタを使用して立体構造部材を作成する技術は積層造形(Additive Manufacturing)と呼ばれており、世界中で高い注目を集めている。積層造形技術の中でも、熱可塑性樹脂フィラメントを材料として用いる材料押出方式(以下 MEX と略称)は最も普及が進む造形方式の一つである。MEX は DIY や試作用途だけではなく工業部材といった最終製品の製造にも用いられており、このような用途では材料に高強度や高耐熱といった機能が求められている。

こうした機能化ニーズの一つとして材料の静電気拡散がある。電気・電子分野では少量多品種化に対応するため、筐体や部材を MEX で作製する事例が増加している。これらの用途では蓄積した静電気による電気・電子部材の破壊を防ぐため、電気拡散処理が必要であり、炭素繊維やカーボンナノチューブ(CNT)といった導電炭素が配合された導電性フィラメントが MEX 材料として使用される¹⁾。導電炭素材料は根本的に黒色、かつ配合量が多く顔料による着色ができないため、静電気拡散フィラメントは黒色しか市場に存在しない。材料の着色は最終製品の意匠性を高めることにつながるため、そ

の可否は重要であり、改善の余地があると考えられる。

本発表では新規に開発したノニオン系ポリマー 3D-AS01 を使用し、高い静電気拡散性及び顔料による任意の着色性の両立可能な積層造形材料の検討を行った。

2. 実験

二軸混練押出機を使用し、ABS 樹脂(MFR=9 dg/min.)とノニオン系ポリマー(3D-AS01)からなるコンパウンドを混練温度 230°C で作製したのち、単軸混練押出機を使用し混練温度 230°C にて該コンパウンドを押出加工することで、φ1.75mm の連続したフィラメントを作成した。

得られたフィラメントを MEX 式 3D プリンタに取り付け、ノズル径 0.4mm、ノズル温度 260°C、ビルドプレート温度 90°C、チャンバー温度 40°C、積層ピッチ 0.2mm、造形向き XY、ラスター配向 45° / -45° の条件で積層造形を行い、試験片(45 mm × 54 mm × 3 mm 厚)を作成した。

試験片を温度 25°C、50% 相対湿度の雰囲気下にて保存し、同雰囲気下で(株)三菱化学アナリティック製ハイレスタ UX ハイレスタ(MCP-HT800)抵抗計を用いて表

面抵抗率を測定した。

3. 結果

ABS 樹脂に対して 3D-AS01 を添加した際の試験片の表面抵抗率を Fig.2 に示す。3D-AS01 の添加によって表面抵抗率は低下し、10wt%の添加で静電気拡散レベルである $1 \times 10^{11} \Omega/\text{sq}$ を下回る表面抵抗率を達成した。また 3D-AS01 の添加によるフィラメントならびに造形試験片に大きな色調変化は認められず、その外観は ABS 樹脂単独の場合と同等であった (Fig.1)。

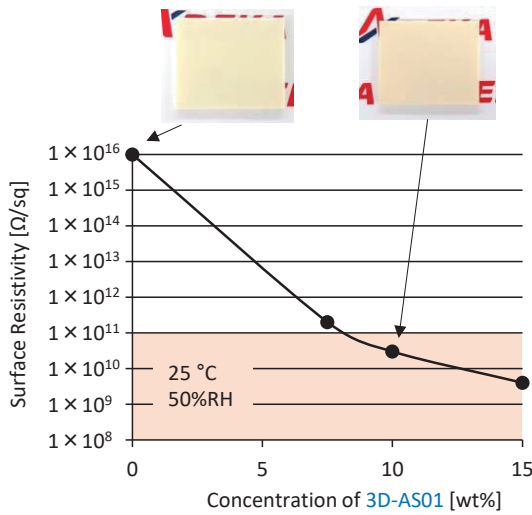


Fig.1 ABS 樹脂と 3D-AS01 からなる試験片の外観及び表面抵抗率

次に、3D-AS01 を使用した際の材料の着色性について確認した。ABS 樹脂に 10wt%の 3D-AS01 と所定量の顔料 (ピグメントブルー 29 及びピグメントグリーン 7) を配合したコンパウンドを作成したのち、2.に記載の方法でフィラメントおよび試験片を得た。その結果、低い表面抵抗率と任意の着色を両立した (Fig.2)。また顔料を配合した試験片の表面抵抗率は顔料無添加の試験片の表面抵抗率と同等であった。

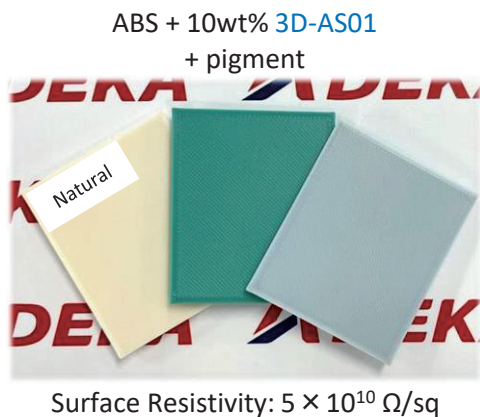


Fig.2 顔料による着色

次に今回開発した材料について、導電炭素が配合さ

れた材料との比較を行った。比較材料としては市販されている CNT 配合 ABS 樹脂フィラメントを用いた。該フィラメントを用いてこれまでと同条件にて試験片を作成したところ、黒色であり調色はできないものの、静電気拡散レベルの表面抵抗率を示した (Fig.3)。一方で試験片を造形する際の向きを XY 方向から XZ 方向に変更したところ、表面抵抗率が大幅に上昇し、静電気拡散レベルを満たさない性能となった。これは、CNT 配合材料は造形向きによる性能の異方性が大きいことを示唆している。CNT による静電気拡散は CNT の配向に大きく依存するため、配向と垂直方向に積層を重ねる XZ 方向での性能が低下したものと考えている。

一方で 3D-AS01 を 15wt%配合した ABS 樹脂フィラメントを用いて検証を行ったところ、XZ 方向の性能は XY 方向と同等であり、異方性が非常に小さく、造形方法に依らず静電気拡散レベルの性能を達成することが判った。

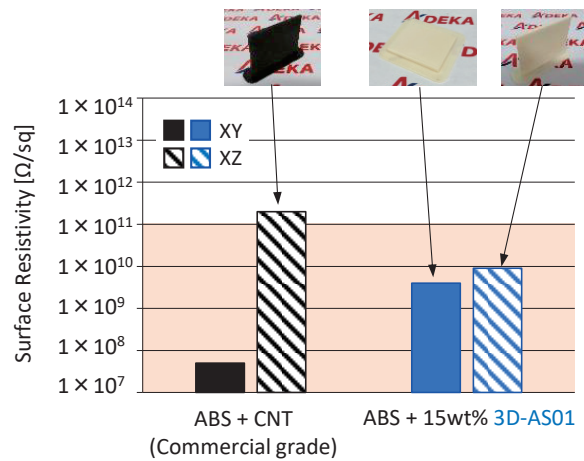


Fig.3 CNT または 3D-AS01 配合 ABS 樹脂試験片の外観及び表面抵抗率の異方性

4. 結論

3D-AS01 は樹脂に対して造形方向に依らず高い静電気拡散性付与が可能なノニオン系ポリマーであるとともに、顔料による任意の着色も可能であることから、安定した静電気拡散性と意匠性が求められる積層造形樹脂材料に好適な改質剤であるといえる。

参考文献

1. M. S. Thompson, *J. Vinyl Addit. Technol.* **2022**, 28(1), 3.

館-三浦の多面体の 3D プリンティングによる造形と座屈変形の可視化

Modeling by 3D Printing of Tachi-Miura Polyhedron and Visualization of Buckling Deformation

嶋貫 研人¹, 富田 直¹, 梅本 和彦¹

Kento SHIMANUKI, Sunao TOMITA and Kazuhiko UMEMOTO

¹株式会社豊田中央研究所

Toyota Central R&D Labs., Inc.

【Extended Abstract】

1. 館-三浦の多面体の造形と衝撃試験による座屈変形の可視化

衝撃エネルギー吸収構造による物体の保護では、最大荷重の制約下で、より大きなエネルギー吸収量を得ることが重要となる。初期ピーク荷重を低減してフラットな荷重特性を実現できる衝撃エネルギー吸収構造として、折紙の幾何学を利用した研究がある。例えば、館-三浦の多面体 (Tachi-Miura Polyhedron: TMP)⁽¹⁾は、3次元空間を充填できる、幾何学形状の設計によって安定な運動が分岐する折畳み角が存在して耐荷重性が変化する、衝撃エネルギーを加えたときに初期ピーク荷重が発生しないという特長がある。本研究では、これらの特長を利用して、マルチセル構造の衝撃エネルギー吸収特性を制御できることを衝撃試験により検証する。

試験片として、館-三浦の多面体の幾何学形状に基づくマルチセル構造を3Dプリンティングで作製する。マテリアライズ社のソフトウェアMagics (ver. 24.01)の「ラッピング」機能を用いて、3次元形状データ(STL)の面に1.5 mmの厚み付けを行い、3DプリンタにMarkforged社のOnyx Pro, 材料に同社のNylonを使用してマルチセル構造体を造形する(図1)。また、造形後の材料の脆性的な性質を改質するため、造形物を真空乾燥機にて80℃で12時間乾燥させた後、恒温水槽を用いて50℃の湯に約20時間沈めて吸水させたものを試験片として用いる。

上記試験片に衝撃試験を実施し、ロードセルと高速度カメラを用いて座屈変形および荷重-変位曲線を計測した結果を図2に示す。結果として、見かけのポアソン比が正または負となる座屈変形や圧潰中に発生する全体座屈の様子を可視化できた。また、荷重-変位線図より、見かけのポアソン比が正の試験片は広がるように座屈変形が起きるために、圧潰中に約3 kNの荷重値を維持して衝撃エネルギーを吸収し、見かけのポアソン比が負の試験片は構造が凝集するために、約9 kNの荷重値でエネルギー吸収することを検証できた。



図 1. 3D プリンタによるマルチセル構造の造形

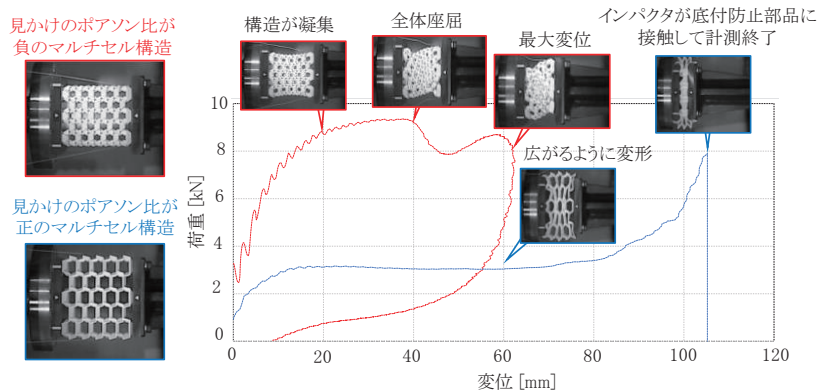


図 2. 衝撃試験による座屈変形と荷重-変位線図

2. 結論

本研究では、TMPの幾何に基づいて変形モードが異なるように折畳み角を変えて空間充填したマルチセル構造体を3Dプリンタで造形し、衝撃試験によって圧潰することで、座屈変形の差異とエネルギー吸収特性の変化を検証した。結果として、折畳み角により構造体の見かけのポアソン比を正または負に制御でき、変形モードとエネルギー吸収特性を可変にできることを示した。

参考文献

(1)Miura, K., Tachi, T., "Synthesis of rigid-foldable cylindrical polyhedra", *Symmetry: Art and Science*, Vol. (2010), pp. 204-213.

回収ボトルキャップの再資源化および Fused Granular Fabrication による大型 3D プリンティング

Recycling of Collected Bottle Caps and Large-scale Additive Manufacturing by Fused Granular Fabrication

中野 雄太¹, 織茂 亜希子¹, 濱崎 トキ², 大日方 伸³

Yuta NAKANO¹, Akiko ORIMO¹, Toki HAMASAKI², Shin OBINATA³

¹三菱ケミカル株式会社, ²株式会社 Boolean, ³株式会社積彩

¹Mitsubishi Chemical Corporation, ²Boolean Inc., ³Sekisai Inc.

【要約】

ペットボトルの国内におけるリサイクル率は高い水準にあるが、ラベルとキャップ部分についての資源活用は限定的である。これには、材料種の判別が困難である事などの理由が挙げられる一方で、回収から再資源化までの具体的なマテリアルフローが不透明であり、消費者における 3 分別回収のモチベーションが湧きにくいという側面もある。今回、弊社の材料設計技術でボトルキャップの造形性を改善し、Fused Granular Fabrication による再活用を行うことで、ミニテーブルを製造した。小規模回収された再生材を低コストで再資源化できる小回りの良さや、回収したキャップが製品になる過程を可視化しやすい観点からも、3D プリンティングは有用な手法である事を再認識した。

キーワード: 熱可塑性樹脂, 材料押出方式, FGF, 再生材, LSAM, LFAM

【Abstract】

While the domestic recycling rate of PET bottles is high, the utilization of their labels and caps remains limited. This limitation is due to factors such as the challenge of distinguishing the materials used and the lack of transparency in the material flow for recycling. Additionally, motivating consumers to engage in the sorting and recycling of these components is a persistent challenge. As part of our current empirical study, we undertook the reutilization of PET bottle cap through Fused Granular Fabrication to produce a table. Our results reinforced the utility of 3D printing as a method, especially considering its ability to efficiently recycle small quantities of reclaimed materials at a low cost. Furthermore, from a visualization perspective, 3D printing offers a comprehensible process in which collected caps are transformed into final products.

Keywords: 3D, Thermoplastics, material extrusion, FGF, recycled material, large-scale AM, large-format AM

1. プロジェクト背景

当社では、2022 年 6 月から 2023 年 3 月の間、広島県大竹市の自治体プラットフォームを活用したペットボトルラベルの水平リサイクル実現に向けた実証試験を行った[1][2]。本取り組みの目的は、ペットボトルのラベル to ラベルリサイクル社会の実装に向けた、選別技術の調査・検証及び、自治体や消費者と連携したペットボトル 3 分別回収の実証、啓蒙活動である。飲料用ペットボトル全体の再資源化促進に寄与するため、今回は、現状そのほとんどがマテリアルリサイクルされているキャップ部分に着目し、大型 3D プリンティングを用いた再活用の手法を提案した。ボトルキャップの回収については、広島県大竹市の小学校などにも協力いただき、大型 3D プリンターで製造した最終製品は現地の小学校へ寄贈されるスキームにて活動が実施された。

2. Fused Granular Fabrication について

3D プリンティングには様々な方式が存在するが、今回用いた方式は Fused Granular Fabrication(FGF)と呼ばれる。これは広義には熱可塑性樹脂を用いた材料押出

方式 3D プリンティングに分類される技術であり、樹脂ペレットを原料形態として用い、スクリー押出機で可塑性・熔融した樹脂を任意の経路上に堆積することで樹脂成形体を製造する成形方法である。FGF と比較される技術として、Fused Filament Fabrication(FFF)が挙げられる。FFF では原料形態として樹脂フィラメントを用い、押出ギアで搬送されたフィラメントが加熱されたノズル部分で熔融され、吐出される。FGF 及び FFF の概略図を図 1 に示す。

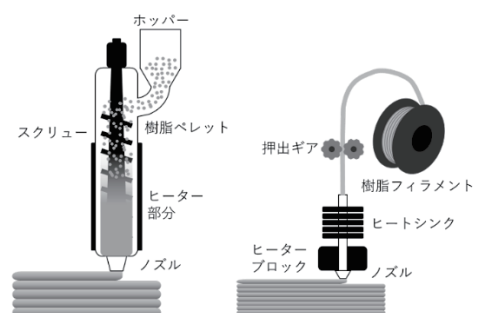


図 1. 各方式の概略図 (左: FGF, 右: FFF)

3. ボトルキャップの改質

飲料用ペットボトルから回収されるキャップにはポリエチレン (PE) 又はポリプロピレン (PP) が使用されており、使用済みペットボトルからキャップを回収した場合はこれらの樹脂が混合されていると考えられる。そこで、回収した材料について分析するため、回収・粉碎後に、均質化したサンプルの DSC 測定を行った。その結果、PE 及び PP に由来する結晶融解ピークが同時に確認されたことから、実際にこれらの樹脂の混合物であることが確認できた。また、ボトルキャップに含まれる PE や PP の混合物そのままでは結晶化度が高すぎるため、結晶化収縮による造形時の反りが懸念される。目的の成形体を安定して出力できるように種々改質用材料を添加する検討を行った。

まず、樹脂の結晶化度を小さくするため、結晶性の低いオレフィン系樹脂を選定し、添加した。また、タルクやシリカなどの無機系フィラーを添加する事で、樹脂全体の線膨張係数が小さくなるような配合を検討した。以上の検討を重ねた結果、反りが抑制され、かつ十分な層間接着性を示す改質配合を見出した。

4. 最終製品のデザイン

今回、大竹市の小学校へ大型 3DP で製造した造形物を寄贈することとなっていたが、種々条件を鑑みて、ディスプレイ台などとして使用することができるミニテーブルを製造することに決定した。製品の設計については、ペットボトルの再資源化スキーム確立による海ごみ削減への貢献で広島豊かな海を守る意味合いから、青系の色を選定し、また、波を表現するために Non-planner 3D printing の技法を用いた表現を取り入れる事とした。Non-planner 3D printing とは、造形中のノズルが平面ではなく曲面でスライスしたパス上を動く事で、Z 軸方向への連続的な動きを含んだ出力が可能となる技術である。これは、表現の幅が広がる一方で、造形データ (G-code) の作製から、3D プリンターによる樹脂の成形加工までを最適な条件に調整する必要があるため、従来の 3D プリンティングに比べて高度な技術が必要とされる。デザイン及び G-code の設計は株式会社積彩にて行われた。ミニテーブルのデザインコンセプトを図 2 に示す。

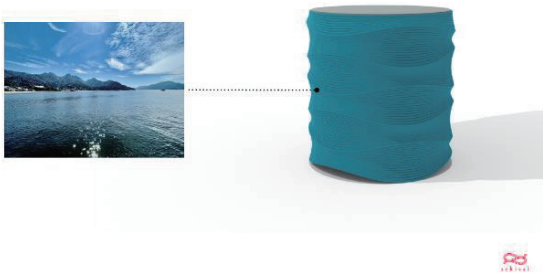


図 2. ミニテーブルのデザインコンセプト

5. 最終製品の製造

最終製品の製造に用いるため、回収ボトルキャップに改質を施した改質コンパウンド約 300kg を作製した。FGF による大型造形はエス・ラボ株式会社の装置を用いて行った。成形条件の最適化及び、製造オペレーションは株式会社 Boolean にて行われた。製造時の様子を図 3 に示す。



図 3. 製品製造の様子

6. 総括

最終成果物のミニテーブルを図 4 に示す。今回当社が実施した取り組みのうち、飲料用ペットボトル全体の再資源化促進のためには、3 分別時に回収が期待される「キャップ」の活用方法の提案が重要なテーマであった。今回のプロジェクトを通じて、Fused Granular Fabrication による大型 3D プリンティングは、以下の特徴が挙げられることを再確認した。①少量生産が可能であることから、ローカルで小規模に回収された廃材の再利用がしやすい。②従来の工法よりも材料ロスが少なくリードタイムが短いため、サプライチェーン全体での省資源・省エネルギー・省コスト化が実現可能である。③従来の工法では実現不可能な高機能・高性能あるいは高い意匠性を有した製品の実現による社会・環境へのポジティブな影響が期待できる。

上述した大型 3D プリンティングの利点を最大化できるよう、材料開発や造形技術開発に引き続き貢献していきたい。



図 4. 最終成果物のミニテーブル

参考文献

1. <https://gship.jp/cases/other/168/>
2. https://www.mcgc.com/news_release/01289.html

マルチスペクトルカメラによるインデックスマッピングと それらのフルカラー3D 造形

Index mapping by multispectral camera and their full-color 3D modeling

内田 孝幸¹, 杉山 尚輝¹, 栗崎 駿¹, 柴田 太樹¹

Takayuki UCHIDA¹, Naoki SUGIYAMA¹, SHUN Kurisaki¹, Taiki SHIBATA

¹東京工芸大学

¹Tokyo Polytechnic University.

【要約】.

UAV やそれらに搭載できる高性能カメラ, LiDAR さらにはマルチスペクトルカメラなどの技術の進展と SfM の普及に伴って 3D モデルの PC 上での構築が身近になってきた. このような背景の中, フルカラーの 3D 造形の技術に注目が集まっている. 本ショーケースでは, 紙積層型フルカラー3D プリントによって造形した, 地形, 建築物, 車, 人といったモデルを展示した. さらに地形のモデルには可視光の 3D モデルだけでなく, 赤外や NDVI といった 3D のインデックスマッピングを示し, その発展の一例を示した. 色のフルカラー表示は, 加法混色が基本原理であり, それは CMY のインク以上に元のベース白色が重要である. この基本の材料が白く, 歴史がある材料である紙の優位性を再認識するような展示を行った.

キーワード: 3D, NDVI, フルカラー3D, 紙積層型, フォトグラメトリ

【Abstract】

With the advancement of technologies such as UAVs and their onboard high-performance cameras, LiDAR, and multispectral cameras, as well as the spread of SfM, 3D modeling on PCs is becoming more and more familiar. Against this backdrop, full-color 3D modeling technology is attracting attention. In this showcase, models of landforms, buildings, cars, and human created by paper-laminated full-color 3D printing were exhibited. In addition, the terrain models showed not only visible light 3D models, but also 3D index mapping such as infrared and NDVI, which is an example of the development of this technology. The basic principle for full color display is additive color mixing, which is important for the original base white color as well as for CMY inks. The exhibit was designed to reaffirm the superiority of paper, a material that is white and has a history of this basic material.

Keywords: 3D, NDVI, full color, paper laminates, photogrammetry

1. 序論

フォトグラメトリは古くは「写真測量」という意味であったが, 近年の 1) UAV (無人航空機) やジンバルの性能向上によって, あらゆる視点からの画像・映像が安定して取得できるようになったこと. 2) カメラの小型化, 高性能化が進んだこと, 3) カメラ位置の座標の確定にかかわる, GNSS (GPS を代表とする, 全地球航法衛星システム) ならびに, それらの精度を向上させる RTK-GNSS などの技術によって, cm オーダーまで位置精度も向上している. 4) そして何より, これらの莫大な画像・位置情報を現在の意味であるフォトグラメトリ (多視点からの 3D) 構築技術が進展したこと, すなわち SfM のソフトウェアの技術向上と, それらをつかさどる PC (GPU) のマシンパワーの格段の向上が, 上記の技術進展を複合的に高め合いながら, 目覚ましい開発のスピードで社会の多くの分野に広がっている.

本研究では, マルチスペクトルカメラを搭載した UAV を用いて, 山や水田, 建築物などを撮影し, その画像から SfM によって, 3D モデリングさらには, その 3D データをもとに, 紙積層型フルカラー3D プリンタを用いて, それらを 3D 造形した. さらに,

インデックスマッピングにおいてはリモートセンシングなどでよく用いられる NDVI (正規化差分植生指数) を用いて, 植生のマッピングを行った. 通常, このマッピングはその用途から 2D に留める場合が多いが, 今回は 3D モデルならびに上記の紙積層型フルカラー3D プリンタを用いて 3D 造形も行った.

2. コンセプト

通常の撮影用の UAV は可視画像を取得するものであるため, カメラは単眼 (FOV 複合型を除く) であるが, マルチスペクトルカメラはその名の通り, 数バンドでの特定の帯域に特化したカメラを搭載している. 一例として, 図1に, 今回用いたマルチスペクトルカメラの外観とその帯域を示す. インデックスマッピングとは, 測定者や解析者が必要とする, 注目すべき特徴にフォーカスを当て, その特徴の大きさによって, マッピングを行うものである. 分かりやすい例として, サーモグラフィがあり, この場合, 抽出すべき特徴は温度であり, その温度の高低差を被写体にマッピングするものである. そのインデックスは, その図面の作者に委ねられるが, 一般には, 直感的に分かりやすくアサインする方がよく, 温度であれば, 高温

側を「赤」に低温側を「青」にアサインする。

今回はインデックスとして植生すなわち植物の育成の状態を示す NDVI (正規化差分植生指数) を用いて、各撮影画像における NDVI を算出した。NDVI は図1のカメラの画像データ (TIFF) をもとに①式で与えられる。

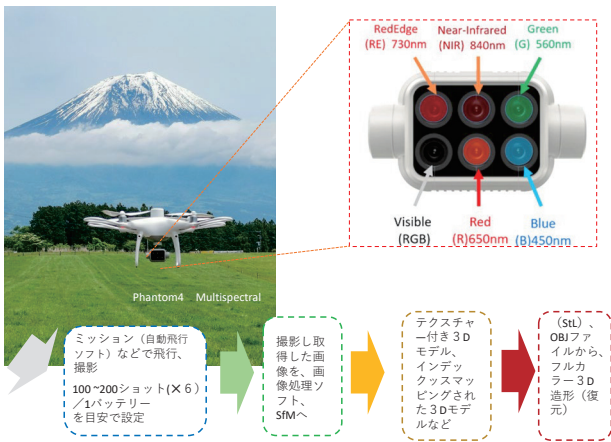


図1. マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによるインデックスマッピング作成の流れ

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \dots \textcircled{1}$$

この値はその名の通り、「近赤外 (NIR) と赤 (R) の差分」をその項目 (NIR と R) の総和で割った = 規格化したものであり、この値の範囲は -1 ~ 1 までの値となる。低い値が植生が不良、+1 側が植生が良好であることを示している。前にも述べたが、この式は極めて単純であるが、衛星画像などでの解析でもよく用いられていることから、比較的、指標として信頼がおかれている。なにより、「規格化」されていることから、光量補正がなされているため、天候や気象の変動に対して、補正がかかった値を示す。(スペクトルバランス変わる場合を除く)。

今回は NDVI を算出できる SfM として、Pix4D Fields, 3D として MetaShape を主に使用した。これらで得られた、オルソ画像や 3D モデルを、単色の場合は STL でカラー 3D については、主に OBJ 形式で出力し、そのファイルを紙積層型フルカラー 3D プリンタ専用のスライサーソフトウェア (ColourIT) を用いて処理した。

この分野の予稿では説明の必要もないが、フルカラープリンタに関して 3D プリントの方法にはプラスチックフィラメントをノズルから吐出する FDM (Fused deposition modeling: 熱溶解積層造形方式)、UV 硬化樹脂を用いた光造形インクジェット方式、粉末燃結方式、粉末固着 (接着) 方式などがある。これらは、材料を吐出させ熱 (冷却) や UV の光エネルギーで硬化させるか、粉体などの材料にバインダーを吐出して硬化させ造形させるのが主流である。現在、その造形の再現性や精度は格段の向上がみられ、工業製品の試作のみならず、粉末冶金に匹敵する金型レスのレーザーアブレーションを伴った金属 3D やエラストマーのフィラメントである熱可塑性ポリアウレタン (TPU) フィラメントの材料開発も進み、

上述の工業製品のみならず、医療などの分野でも広く応用が進んでいる。

このように、3D プリンタの技術は進んでおり、カラー化においても、3D プリントで一番ポピュラーな FDM でも、数種のカラーフィラメントを装着しているものなどがある。しかし、エリアカラーで造形できるものはあるが、現在、紙にプリントするような、例えば 24 (8×3) ビットフルカラーで 3D 造形できるものは数少ない。現状で代表的なものを上げると、CMYKW 各色の UV 硬化樹脂と水溶性のサポート用 UV 硬化樹脂を用いたタイプの^{1), 2), 3)}、石膏の粉末に CMY インクを塗布し、その後、バインダを加え 1 層ずつ硬化させていくもの⁴⁾がある。最近では、コンシューマー向けとしてはあるが FDM の熔融状態に特殊な CMY インクを加え、造形するものも市販に至っている⁵⁾。

そもそも、物体への色の表示は「減法混色」が基本であり、その色の要素は CMY であるが、その暗黙の原点は、ベースの色が「白」であることが重要である。この観点に立って、フルカラー 3D を見直したとき、前述した UV 硬化樹脂を用いた光造形インクジェット方式も CMY の UV インクを吐出する前に、W (白) をまずコーティングする。

この観点に立って 3D の材料を考えたとき、紙という材料は、すでに、色を表示するための様々な検討がなされており、その点での優位性は確固たるものがある。

今回のショーケース (展示) では、この色のリアリティを付与した、様々な 3D 造形物を用意した。これらは、これから述べる「紙積層型フルカラー 3D プリンタ: (Mcor IRIS)⁶⁾」を用いている。

この紙積層型 3D プリンタの最大の特長は、カラー 3D モデルのための着色を、前処理としてそのスライスデータの輪郭の部分だけに、紙 1 枚ずつに対して汎用のインクジェットプリンタによって着色を行う点である。その 3D プリントの概要を図 2 に示す。この図の右側の紙束が、3D のスライスカラーデータに対応しモデルの輪郭周辺のみをフルカラー印刷したものである。

近年、フルカラープリンタの技術の進展に伴って、オフィス向けの高速度大容量インクの機種が発売さ

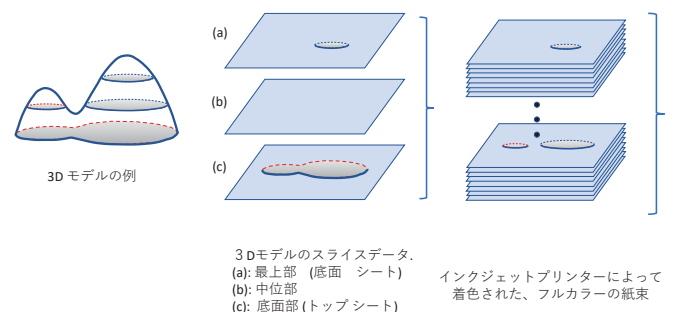


図2. 紙積層型フルカラー 3D 造形の構成要素の概略図⁷⁾

れるに至り，この前処理過程の両面印刷速度や色出力性能が格段に向上した．これに伴って，最近，このタイプのプリンタの有用性・有効性が再認識されるようになった．

例えば，この特長を活かして衛星画像などのリモートセンシングの分野では，この紙積層型フルカラープリンタを用いた地理空間情報の立体模型への展開といった報告もなされている⁸⁾．

図3に紙積層型フルカラー3Dプリンタの造形過程の概要を示した．前処理によって各輪郭をカラー印刷した紙束をメインの装置にセットして，1枚ずつフィード，糊付け，輪郭のカット（紙1枚のみ）を繰り返して，目的の3D造形物を得るものである．

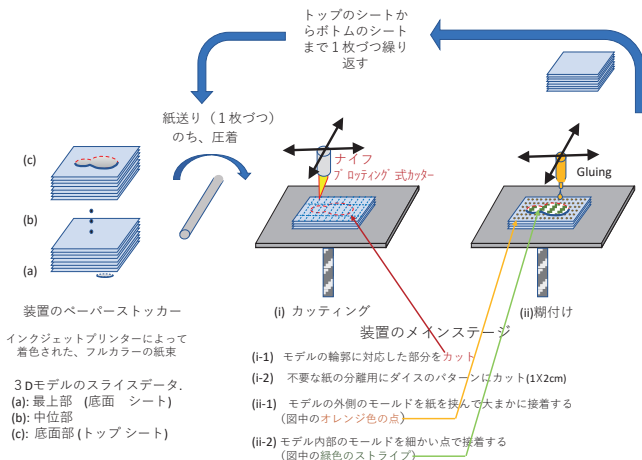


図3. 紙積層型フルカラー3D造形の積層過程概要図⁷⁾

従来の多くの3Dプリンタは，熱や光を利用するものに関わらず，フィラメント，UV硬化樹脂といったプラスチックを用いている．昨今のSDGsやカーボンニュートラルの動きに伴って，プラスチック資源循環法が施行されたため，これらに代わる代替材料の検討が喫緊の課題と位置づけられ，この点でも，公害が少なく，リサイクル可能な「紙」の新たな技術は注目に値する．

3. 展示物について

前にも述べたように，今回展示した3Dモデルは，地形，建築物，車，人など多種多様なものを用意した．3Dプリンタは上述の紙積層型フルカラー3Dプリンタを用い，紙のサイズはA4であり，紙束の外周をそのまま残して，展示用にアクリルケース(特注)にそれぞれ入れてある．(人形のモデルを除く)

地形として，

①(a)十国峠，①(b)その山頂部分の可視光3DモデルとそのNDVI⁹⁾(図4)．

②(a)本厚木カンツリークラブ，その10番ホールの可視光3DとNDVI(図5)．

なお，NDVIは植生が良好なもの(+1側)を緑に，不良

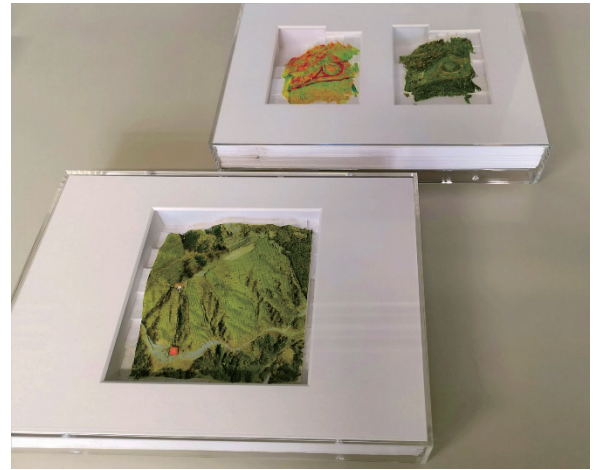


図4. (a)十国峠，(b)その山頂部分の可視光3DモデルとそのNDVI⁹⁾．

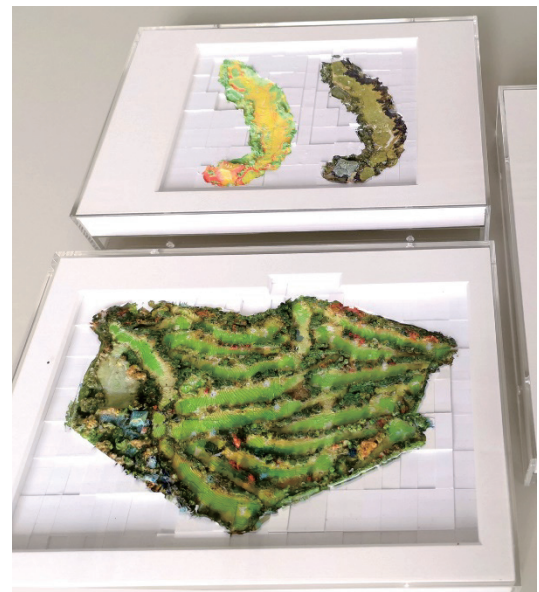


図5. (a)本厚木カンツリークラブ，(b)10番ホールの可視光3DモデルとそのNDVI．

なものまたは無機物(-1側)を赤としてカラーをアサイ



図6. 東京工芸大学厚木キャンパスの3D造形

ンした。

建築物としては

③東京工芸大学, 厚木キャンパスの3Dモデルを示した(図6). 通常よくみかける建築物や都市の3Dモデルは, 単色の模型に後から着色する場合が多い. この場合, 各構成物の素材の色に着色する場合が多く, 臨場感が乏しい. それに対して, 実際に撮影しテクスチャーとして貼り付けた画像の場合, 影の陰影などが忠実に再現される. このため, 例えば, ビルの窓の凹凸なども, 3D造形の解像度としては, それほどクリアでなくても, 各窓の陰影を色で表示することで, 窓の凹凸の臨場感を示すことが出来ている. このような事からも, 3Dモデリング, シミュレーションで行われているような, 照明の位置, 反射, 散乱, 鏡面においてはその映り込みなどを忠実に着色してプリントする技術は, これまで以上に必要になってくると思われる.

車(自家用車)としては

④車(自家用車)のモデルは, 地形撮影で用いた, 平面でのミッション飛行(図7の左に相当)でなく図7(b)に示すようにUAVをノーズインサークルさせて, 車全体の画像を撮影した後, SfMによってモデリングした.

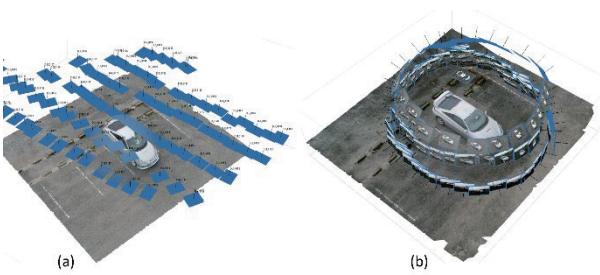


図7. 自家用車に対する UAV の撮影位置とそれによって作成された 3D モデル

(a)平面飛行、(b)ノーズインサークル

人(人物)としては

⑤人の例としては, iPhone12 proMAXに搭載されているLiDAR(カメラ(光源: VCSEL(垂直共振面発光レーザー)))を用い, iPhoneのソフト, polycamを用いて3Dモデル化し, obj形式で3Dプリンタにインポートし, 3Dプリントした. 一例を図8に示す.



図8. 紙積層型フルカラープリントによる人物の造形例



図9. 紙積層型フルカラープリントによる種々の造形例

以上①～⑤に加え, 国土地理院のGSIMAPsなどの3Dデータ¹⁰⁾を利用し, 図9のような様々なフルカラーの造形物を展示する予定である.

4. 結論

UAVやそれらに搭載できる高性能カメラ, LiDARさらにマルチスペクトルカメラなどの技術の進展とSfMの普及に伴って, 3Dモデルの構築が身近なってきた. このような背景の中, そのモデルの復元に当たる, フルカラー3D造形のニーズが高まっている. 今回紹介した紙積層型フルカラー3D造形は, 3Dプリント黎明期に一時展開されたのみにとどまっている. しかしながら, 上述の様々な3D構築を支える飛躍的な技術の進展によって, 形, 特に色の再現力の高いこの方法が見直されるものと思われる. そういった点で, 今回のショーケースでは, 地形, 建築物, 車, 人といったモデルを展示した. さらに地形のモデルには可視光の3Dモデルだけでなく, 赤外やNDVIといった3Dのインデックスマッピングを示し, その発展の一例を示した.

参考文献

1. 八角 邦夫: “フルカラー3Dプリンター, —2D印刷から3D印刷へ—”, 化学と教育, vol. 68, No. 2, (2020), pp. 66-67.
2. 八角 邦夫: “UVインクジェット法によるフルカラー3Dプリンター”, 日本画像学会誌, Vol. 60, No. 4, (2021), pp. 358-365.
3. <https://www.stratasys.co.jp/3d-printers>, accessed online, 30 Sep. 2023.
4. 春日寿利: “3Dプリンタの7つのプリントエンジンの仕組みと特徴”, 成形加工, Vol. 26, No. 4, (2014), pp. 154-157.
5. <https://www.xyzprinting.com/ja-JP/stories/coral-with-3d-print>, accessed online, 30 Sep 2023.
6. Ekelund, Daniel Ihlen: Master thesis of NTNU (2015).
7. 内田 孝幸, 美田 翼, 久原 泰雄, 東 吉彦, 日本印刷学会誌/59, 4, pp. 192-197, (2022)
8. 大塚康弘: 国土地理院, 平成30年度調査研究年報, 地理空間情報部, (2018), p. 56.
9. 内田孝幸, 小嶋優輝, 行谷時男, 小林信一, 安田洋司, 越地福朗, 高橋章浩, 日本写真学会誌86, I, pp. 50-55 (2023)
10. 地理院地図, GSI Maps, 国土地理院. <https://maps.gsi.go.jp>, accessed online, 30 Sep. 2023.

ものづくりの満足感を向上させるための身体動作を入力とした 3D モデリングインタフェースの開発

Proposal for Advanced 3D Modeling Environment

高木祐輝, 伊藤慎一郎

Yuki TAKAGI, Shinichiro ITO,

京都産業大学

Kyoto Sangyo University

【要約】

本研究では 3D プリンティングのプロセスに着目し、ものづくりの満足感を向上させるための身体動作を入力とした 3D モデリング手法を提案する。手仕事を伴うものづくりは、製作者に特有の満足感を与える。しかし、デジタル工作機器のデータ作成と出力というプロセスでは、製作者に満足感を与えるかは明らかになっていない。そこで、工芸の手仕事のように身体を動かす行為がものづくりの満足感を与えるという仮説のもと、身体動作を入力とした 3D モデリングのためのインタフェース開発を試みた。具体的には、身体の一部に取り付けた 6 軸センサと 3DCAD ソフトウェア Rhinoceros とそのプラグインである Grasshopper を用いて、6 軸センサより取得した身体動作のデータを 3D モデルのパラメータに反映するシステムを実装した。3D モデリングの経験のない初学者を対象に、本システムを使用してもらい、様子の観察とヒアリングを行い使用感を検証した。この調査から、「立体的な動きをするのが難しい」「新鮮だった」などの意見が得られた。マウスやキーボードなどの従来の入力では難しい身体障害を持つユーザー等にとっても本提案は有用であると考えられる。

キーワード: 3D モデリング, インターフェース, デジタルファブリケーション, 3D プリンティング

【Abstract】

Focusing on the process of 3D printing, this study proposes a 3D modeling method that uses physical actions as inputs to improve the satisfaction of making. Making that involves manual handwork gives a particular sense of satisfaction to the maker. However, it is unclear whether the data creation and output process of digital fabrication machine tools gives satisfaction to the maker. Therefore, we attempted to develop a 3D modeling interface that uses body movements as input based on the hypothesis that the act of moving the body, like handwork in crafting, gives satisfaction to the creator. Specifically, using a 6-axis sensor attached to a part of the body, the 3D CAD software Rhinoceros, and its plug-in Grasshopper, we implemented a system that reflects body movement data acquired from the 6-axis sensor in the parameters of a 3D model. Observations and interviews were conducted to verify the usability of the system by having inexperienced and novice users with no experience in 3D modeling use this system. We believe this proposal will be useful for users with physical disabilities who have difficulty using conventional input methods such as mouse and keyboard.

Keywords: 3D modeling, interfaces, digital fabrication, 3D printing

1. 序論

工芸や DIY のような手作業を伴うものづくりは、作りに特有の満足感をもたらす。この満足感は身体を動かす行為に起因すると仮定する。通常、工芸や DIY では造形の際に身体や道具が直接的なインタフェースとして機能する。一方で、3D プリンティングのための 3D モデリングではマウスやキーボードが主なインタフェースとなる。

現状、身体動作を基に 3D プリントデータを作成する事例は存在する[1]が、これらは主に身体を 3D モデルを生成するものであり、身体動作を基に異なるプロダクトの形状を生み出す例は少ない。そこで、本研究では 3D モデリングに身体をインタフェースとし、身体動作を入力としてプロダクト設計の 3D モデリングに取り入れることで、直感的な操作でものづくりの満足度を向上

させることを目的としてインタフェースの開発を行なった。

2. コンセプト

身体動作を取り入れて、デジタル上でしか実現できないような体験にするため、基本となる形状の内側から外側に表面を押し出すことでモデリングを行うシステムを構築した。基本形状は、球と円柱の二種類を用意した。内側にはユーザーが操作部位をイメージしやすいよう、先端に球がついた棒状のモデルを表示、それが腕の動きと連動し、基本形状は球がある場所から外側に向かって押し出されるものとした。(図 1)

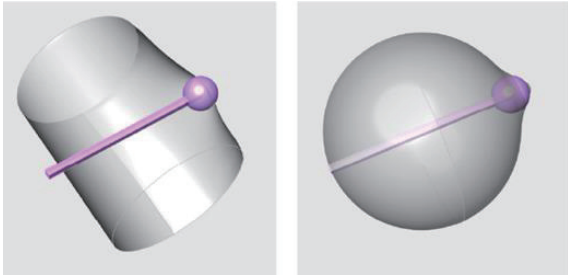


図 1. 操作モデル(ピンク)で押し出されてる基本形状

3. 実装

提案するインターフェース及びソフトウェアは、小型マイクロコントローラ ESP32 を搭載した IoT デバイス開発ツールキットの M5stickC Plus と 3D モデリングソフトウェアの Rhinoceros とプラグインである Grasshopper を用いて実装した。さらに、Grasshopper と M5stickC Plus の通信には、Grasshopper の通信用プラグインである gHowl を使用した。(図 2)

M5stickC Plus は内蔵されている 6 軸センサ (MPU6886) で本体の傾きを取得し、UDP 通信でデータを Grasshopper に送信する。PC 側では、Grasshopper でプログラムを作成し、受信したデータを操作する 3D モデルのパラメータの入力として反映させた。

3D モデルの変形は次の手順で行う。基本形状のサーフェス上に、「Divide Surface」コンポーネントで、サーフェスを分割し、グリッド状に並んだ点群を作成する。点群から、操作している 3D モデルの先端と最も近い点を抽出し、その点とその他の点群それぞれの距離に応じて点群を外側へ移動させる。これにより、外側に押し出されたような点群が生成される。最後に、これらの点群から「Surface From Points」コンポーネントを使用してサーフェスを生成することで、擬似的に外側へ押し出されるようなモデルが完成する。

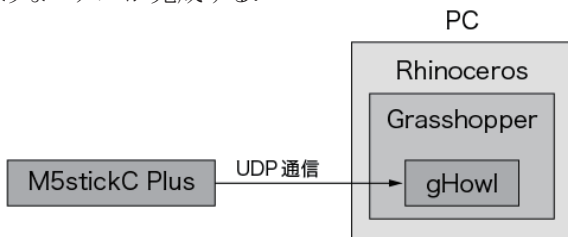


図 2. システムの概要

4. 検証

京都産業大学にて、2023 年 8 月 5 日と 6 日に 3D モデリングの経験のない高校生 10 名、9 月 20 日に 3D モデリング経験のある大学生 4 名に対して、本システムを使用してもらい、使用している様子の観察とヒアリングを行なった。

高校生には、基本形状を球体とし、操作を教えて慣れて貰った後に、自由にシステムを使用してもらった。視点は適宜マウスを使用して操作してもらった。

大学生に対しては、基本形状を円柱として、ランプシェードを 3D プリントすることを前提に 3D モデリングを

行なうよう指示をし、使用してもらった。モニターには図 3 の 3 つの視点に分割したビューを表示し、さらに必要に応じて実験者が視点の操作を行なった。はじめに操作の説明を行ない、慣れるために数回練習した後に、最終の形状を作成した。

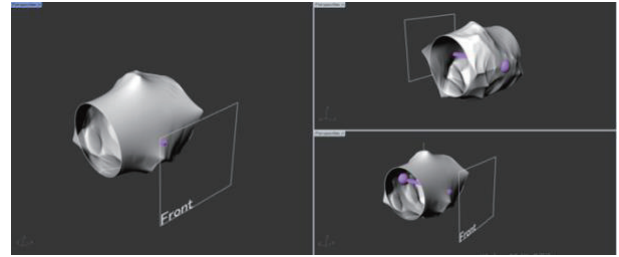


図 3. 視点のビュー画面

5. 結果と考察



図 4. 大学生が制作した 3D モデル

検証から三つの課題が明らかになった。

一つは、インターフェースの操作性と精度についての課題である。M5StickC Plus の 6 軸センサを使用しているため、姿勢計測の精度が低い点があげられる。地磁気センサが無いため、特に水平方向への姿勢変化の計測精度が低い。そのため、被験者は思い通りに動かすことができずに、腕を振り回すなど投げやりな行動が見られた。これは、上述したように地磁気センサを搭載することで解決できる。しかし、M5StickC Plus では 3 次元空間の動きのセンシングには限界があるため、深度センサ付きカメラを使用した画像処理などの方が、より精度高くセンシングできるのではないかと考える。

二つ目は視点の操作性である。3D モデリングでは、さまざまな角度からモデルを確認する必要がある。しかし、現在のシステムではマウスによる視点移動しかできないため、一人では非常に操作しにくく、二人組で片方が視点のみを操作する場合は、そこで意思疎通が発生してしまうため、モデリングの妨げになる。

三つ目は、常に外側に押し出しのオンオフ機能がないため常に押し出しが行われてしまい、任意の形状を作りづらくなっている点である。つまり、陶芸の成形時にろくろにずっと手を当てているような状態になっているということである。

今後の展望として、本システムは、身体動作を入力としているので、GUI ベースの 3D モデリングよりもより直感的なモデリングが可能にしたい。3D プリントに代表されるデジタルファブリケーションは、機器が市民に開かれ、オープンソースソフトウェアの文化であるが、GUI ベ

ースの CAD ソフトウェアの習得においては学習を要する。本システムにより、3D モデリングの敷居を下げ、より多くの人々がデジタルファブリケーションの文化に触れる機会を増やすことが期待できる。さらに、マウスやキーボードなどの従来の入力では難しい身体障害を持つユーザ等にとっても本提案は有用であると考えられる。

最後に、本稿ではプロトタイプに留まり、ものづくりの満足度に関する定性的な検証を行うまでに至らなかったため、今後このシステムの改善と併せて行う。

参考文献

1. SakashitaMose, SuzukiKenta, KawaharaKeisuke, KazukiTakazawa, YoichiOchiai., “Materialization of motions: tangible representation of dance movements for learning and archiving”, ACM SIGGRAPH 2017 Studio (SIGGRAPH ’17), pp.1-2.

バクテリアコロニーパターンのマテリアルデザインとしての利用法

How to use bacterial colony patterns as material design

杉浦真也¹, Matthew Waldman¹, 岩崎秀雄², 山岡潤一¹

Sugiura Masaya¹, Matthew Waldman¹, Iwasaki Hideo², I Yamaoka Junichi¹

¹慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科, ²早稲田大学 理工学術院

¹Keio University, ²Waseda University

【要約】

バクテリアはマクロで観察できるレベルのフィルムを形成することで、有利な生育環境を獲得してきた。その中でも本研究では瑠璃色を呈する鉄バクテリアの仲間と運動機能遺伝子を欠損させたシアノバクテリアを使用して、バイオデザインの領域で表現の拡張を検討した。鉄バクテリアは鉄を酸化する度合いを検討することで金箔、虹箔の変化を色味の表現として提案している。運動性欠損株であるシアノバクテリアは運動性による軌跡を辿った染色とパターンの形成を抗生物質で制御することを検討している。また、今回はバクテリアの色味や模様、染色方法を検討した後の操作として、吸水性素材への転写技術を加えることでデジタル制御を検討したいと考えている。今後は、微生物を利用したパターンの制御を行い、新たなマテリアルデザイン領域として研究を進めていきたいと考えている。

キーワード: バイオデザイン, バクテリアアート, バイオインク, バイオマニュファクチャリング, DIY バイオ

【Abstract】

Bacteria have acquired an advantageous growth environment by forming films that can be observed macroscopically. Among these, in this study, we used a member of the iron bacterium that exhibits a lapis lazuli color and a cyanobacterium in which a motor function gene has been deleted, and examined the expansion of expression in the area of biodesign. By examining the degree to which iron bacteria oxidizes iron, we are proposing changes in gold leaf and rainbow leaf as color expressions. We are investigating the use of antibiotics to control the staining and pattern formation of motility-deficient cyanobacteria that follow motility trajectories. In addition, after considering the color, pattern, and dyeing method of the bacteria, we would like to consider digital control by adding transfer technology to water-absorbing materials. In the future, we would like to control patterns using microorganisms and advance our research as a new area of material design.

Keywords: Biodesign, Bacteriaart, Bioink, Biomanufacturing, DIYbiology

1. 序論

微生物のコロニーパターンは高度機能生物の細胞移動などのモデルとして研究されていることが多く、流体力学的側面から、物理計算予測の分野でも注目されてきた。例えば、近年では粘菌のコンピュータのようなライフラインへの応用例などが有名である。このように微生物が環境に適用する形が、人間社会にも模倣されることで、デザインの側面と数理的モデルでの応用研究が進んでいる。今回は生物システムの自立性(バクテリアの滑走性)を活用して、従来の素材よりも低コストで GHG 排出量を抑えることを目的としている。また、バイオマテリアルの工業化を行うため、バイオインク(バクテリアが代謝産物)がメディウムとして拡張性を持っていることの基礎実験を行った。

研究概要としては、コロニーパターンの行動制御を外部刺激により行うことで、バイオマテリアルへの転用を実

践した。今回、バクテリアは鉄バクテリアとシアノバクテリア(ILC1693)の2種を使用する。

まず、一つ目に使用する鉄バクテリアは二価の鉄イオン(Fe²⁺)を酸化して得られるエネルギーを利用して生育活動を行う化学合成栄養細菌である。生息地としては、鉄分が富んだ土壤に広く分布している。また、鉄バクテリアは酸化皮膜を作るが、その主成分は水酸化第二鉄(Fe(OH)₃)であり、空気調の酸素が溶け込むなどの特定の条件下で生成される。また、酸化皮膜は時より油膜と似た見た目であるため、混同してしまう。沖縄県衛生環境研究所の環境科学班らは「酸化皮膜には、一度、膜が壊れると直ぐに元には戻らない。油の臭いはしない。」¹⁾と主張している。今回使用する鉄バクテリアは神奈川県厚木市愛名緑地で採取した鉄バクテリアである。また今回このバクテリアを選定した理由としては、光の反射角度によって確認できる瑠璃色や金色の輝きを保存し、バイオイン

クとしての工業化を考えることができたためである。二つ目に紹介する運動性シアノバクテリア(ILC1693 株)は早稲田大学院岩崎秀雄研究室の櫛田ら²⁾が解析したものであり、野生株の遺伝子欠損株である。この株は野生株と比べて運動機能が強く、コロニーの成長をマクロな視点で観察できる。通常、コロニーパターンのマクロ的視点で用いられるバクテリアとしては枯草菌の仲間などが代表例ではあるが、今回は ILC1693 株を使用した。その理由としては、ILC1693 株は独特な運動性を示すからである。岩崎ら³⁾によると Disk, Comet, Bundle の三つの行動パターンが読み取られると言われている。今回、この動きのパターンの種類を明条件下における照度変化や油脂成分におけるバクテリアの軌跡の変化の検討を考えている。このように、今回はバクテリア自体の動きやバイオフィルムに着目し、それらを素材として転用することの取り組みと、バイオマテリアルとして保存と実装に向けた萌芽的取り組みの研究を行った。

2. 関連研究

まず、コロニーパターンの研究についてまとめる。

Eshel Ben-Jacob ら⁴⁾は細菌が環境変化に適用するために複雑な増殖パターン形成に関して記載されたものである。この論文ではコロニーパターン形成の研究でのモデルとして枯草菌の仲間を使用するが、今回は光に走行性のあるシアノバクテリアを使用している。そのため、枯草菌の仲間の菌糸によるパターン形成だけでなく、シアノバクテリアは3つの形態考慮しながらパターンの変化を追っている。

次に、アートプロジェクト分野では今回使用する2種類のバクテリアに分けて紹介する。

鉄バクテリアの分野では AZU KIMURA の Landscape of Iron⁵⁾で酸化皮膜を染めた実験が行われている。このアートワークでは、鉄バクテリアが産生する酸化皮膜をから培養して画用紙に染色することを目的ではなく、未だに酸化皮膜の生成培養は理学的研究の観点から見ても行われていない。

シアノバクテリアの分野では岩崎秀雄の Culturing <Paper>cut⁶⁾が代表例である。このアートプロジェクトは論文自体にシアノバクテリアを培養して染めたものであり、意図的な形やパターンを出すことを目的として生やし

たものではない。また、Eve Frankel ら⁷⁾は、バクテリアアートは「芸術の普遍言語」を通じて、抽象的な科学概念を含む多くの社会的概念や先入観に疑問を投げかけができるアートワークであることを示唆している。そこでは、歴史的事例と実験プロトコル、科学と芸術の人為的分離についての議論が展開されているが、バクテリアをメディウムとして利用するためのデザインの様式の方法を提案しているものではない。

最後にデザイン研究の分野をあげる。Claretta J. Sullivan ら⁸⁾は、*Cellulophaga lytica* という細菌を用いて、自己印刷のフォトニックインクとしての可能性を探っている。この論文との差異はこの論文で使用している細菌が持つ特性を二分した形のバクテリアで研究している。*Cellulophaga lytica* という滑走運動性を持つ細菌は、自己集合して多結晶構造を持つバイオフィルムを形成し、きらびやかな輝きを示すことが報告されている。今回使用する鉄バクテリアが産生する酸化皮膜の反射特性と滑走運動性を持ったシアノバクテリアに特性が似ている。

3. システム構成

3-1 鉄バクテリア

鉄バクテリアは神奈川県厚木市の愛名緑地の沼地で採取した。(Fig. 1) 今回、鉄バクテリアの具体的な菌種名を特定はしていないが、島田らの論文⁹⁾から推測すると *Leptothrix ochracea* 属であると考えられる。



Fig. 1 写真1は愛名緑地の沼地、写真2はミネラル成分を計測した。

鉄バクテリアの染色実験では、酸化皮膜を水圧転写で画用紙に染めた。(Fig. 2)

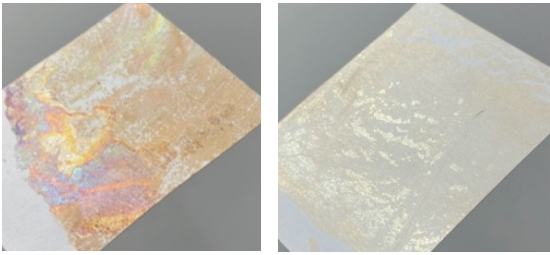


Fig. 2 酸化皮膜を水圧転写で染めた様子

次に、バイオマテリアルの工業化に向けて、鉄細菌が産生する酸化皮膜の生成法を検討した。(Fig. 3)

今回、鉄細菌が形成する酸化皮膜を人工的に作り出すことを目標とした。そのため、鉄細菌の酸化皮膜形成を行うための培地の組成を紹介したい。酸化皮膜の生成を検討する中で、pH の最適化、温度の最適化、光照射条件、条件の切り替え(1日～2日程度振盪させ十分に菌が生育した後、静置培養に切り替えて皮膜形成させる)などを培養条件とした。実際にミネラル分や pH 濃度を検討するべく、水質試験紙でテストした結果鉄成分が多く検出できた。その後、沼地から採取した沼 20g、沼水 10g、二価の鉄 32.5ml を混合し、1週間静置後、酸化皮膜の形成を確認した。



Fig. 3 酸化皮膜生成槽

3-2 シアノバクテリア

シアノバクテリアを植菌する培地(BG-11)を岩崎秀雄研究室で作成した。BG-11の組成は以下の図の通りである。培地作成後、シアノバクテリアを希釈した液体培地から 50 μ l を寒天培地上に添加し、コンラージ棒で塗り広げた。その後、寒天培地上に蒸気滅菌した油取りがみを添付した。その後は、2週間(25°Cの明条件下)静置させた。シアノバクテリアの染色実験では、培地(BG-11)を岩崎秀雄研究室で作成した。BG-11の組成は以下の図の通りである。培地作成後、シアノバクテリアを希釈した液体培地から 50 μ l を寒天培地上に添加し、コンラージ棒で塗り広げた。その後、寒天培地上に蒸気滅菌した油取り紙を添付した。その後は、25°Cの明条件下で静置させた。2週間後、シャーレ内の油取り紙を取り出すと、培地上

には細菌が繁殖していなかった。仮説上では細菌が油取り紙上を滑走せず、油取り紙と培地の境界部分に向かって繁殖すると考えていた。結果として、油取り紙上は染色され、染色の度合いを以下の3つの写真で示した。染色の結果から、油取り紙に BG-11 を染み込ませてからシアノバクテリアで染める実験を行った。結果としては油取り紙上でもシアノバクテリアが滑走し、染色された。(Fig. 4)



Fig. 4 シアノバクテリアの染色度合い(左から 1, 2 枚目: 染色の確認をした様子。左から 3, 4 枚目: 油取り紙の内外で染色の濃度変化を観察した様子)

次にシアノバクテリアの模様を制御する実験を行った。先行研究で、シアノバクテリアは赤色光と緑色光のバランスを感知して効率よく光合成を行う「補色純化」という機能があることが知られている。今回、滑走性のシアノバクテリアを使用することで特定の波長による逃避行動が見られると考えたため、一枚のシャーレに赤色光、緑色光を照射し、滑走運動性を観察した。すると、シアノバクテリアは赤色光から遠ざかるように緑色光の方へと滑走性を示した。また、コントロールのシャーレと比較した時、模様がひび割れたような動きのパターンを形成していた。比較面積は以下に示す。(Fig. 5)

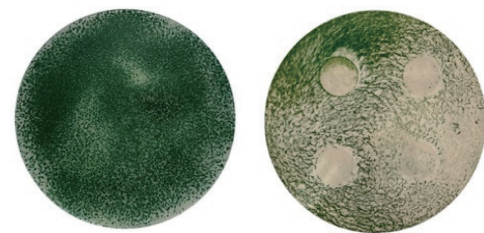


Fig. 5 左図は通常の ILC1693 のコロニーパターン

右図はシャーレの左側に赤色光、右側に緑色光を照射した。

最後に、紫外線による生育実験を行った。シャーレ全体を培養後、紫外線を 1 日照射した。照射理由としては、紫外線照射により、運動機能を欠損させたシアノバクテリアの作成が可能かを試した実験である。照射後は、光合成色素が抜けて黄変した。1週間経過後、緑色の光合成色素が再生し、少し違った緩やかな Bundle が確認された。この理由として考えられることは、紫外線を 1 日照射

したことで、シャーレ内の温度が上昇し、湿度が高まることで、培地が液状化したため動きが緩やかになったのではないかと考えている。(Fig. 6)

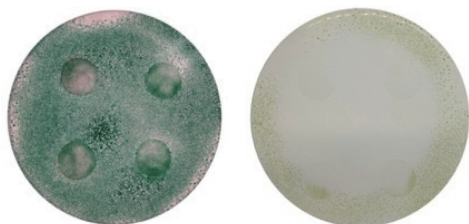


Fig. 6 紫外線照射後の経時的変化(写真1は2週間,明条件下で培養,写真2は紫外線を1日照射)

4. 考察と展望

微生物が環境に適用するための自律性を活用することで、バクテリア素材の需要が高まるだろう。しかし、バクテリア素材は外部環境に曝すことでコンタミネーションを引き起こし、素材自体が劣化してしまう。そのため、バクテリア素材を工業化させるには有機物を新たに保存できる方法(Fig. 7)などの提案も必要であると感じている。以下に示したシアノバクテリアは約2年間冷凍保存しているものだが、シアノバクテリアの色味やパターンなどは失われていない。また、今回使用した鉄バクテリアであれば、コンタミネーションを引き起こしても酸化皮膜を保存することができるため、バクテリアの酸化物をメインとして素材を展開する方法も可能だと考えている。今後は、微生物の環世界を人間社会で体現できるようなバイオマテリアルの開発と実装を考えている。近い未来の環境は多種の生物が設計し実装されたものが多く存在しているかもしれない。私たちは他種の環境適応性を感覚的に享受することで、機能的価値を見出し利用することができるかもしれない。それは、他種の環世界を洞観することで機能性と感覚の内面的繋がりによる萌芽的な研究になるだろう。



Fig. 7 約2年間冷凍保存しているシアノバクテリア

参考文献

1. 沖縄県衛星環境研究所 環境科学班, 「水たまりに油膜??実は鉄の酸化皮膜!!」衛環研ニュース(25),2013
2. 榎田和花奈, 戸井田一磨, 山本宏輝, 藤田祐一, 下川卓志, 岩崎秀雄, 「糸状性シアノバクテリア *Leptolyngbya boryana* の滑走運動とコロニーパターンに関する新規遺伝子の道程と解析」日本ゲノム微生物学会年会要旨集(15),2021,p44
3. 岩崎秀雄, 「シアノバクテリアのマクロなコロニーパターンの構築原理」科学研究費助成事業 研究成果報告書,2015
4. Eshel Ben-Jacob, Ofer Schochet, Adam Tenenbaum, Inon Cohen, Andras Czirók & Tamas Vicsek, “Generic modelling of cooperative growth patterns in bacterial colonies” *Nature* (368),1994,p46-49
5. AZU KIMURA, “Landscape of Iron”2022
6. 岩崎秀雄, “Culturing <Paper>cut”文化庁メディア芸術祭,2013
7. Eve Frankel, Jasmine Temple, Eliz Dikener, Mehmet Berkmen, “Bridging the gap with bacterial art” *FEMS Microbiology Letters*(370),2023, fnad025
8. Claretta J. Sullivan, Kennedy Brown, Chia-Suei. Hung, Joseph Kuo-Hsiang Tang, Mark DeSimone, Vincent Chen, Pamela F. Lloyd, Maneesh Gupta, Abby Juhl, Wendy Crookes-Goodson, Milana Vasudev, Patrick B. Dennis & Nancy Kelley-Loughnane “Iridescent biofilms of *Cellulophaga lytica* are tunable platforms for scalable, ordered materials” *Nature*(13192), 2023
9. 島田 武典, 本田 数博, 「愛名緑地ビオトープの鉄細菌による赤褐色沈殿物の観察」*神奈川自然誌資料* (29),2008,p61-64

3D フードプリンタを用いた食感デザインの検証

Verification of Texture Design Using 3D Food Printers

中須賀 絵莉¹, 若杉 亮介², 船井 翔³, 浅井 睦⁴, 斎藤 健太郎⁵, 山岡 潤一¹

Eri Nakasuga¹, Ryosuke Wakasugi², Kakeru Hunai³, Mutsushi Asai⁴, Kentaro Saito⁵, Junichi Yamaoka¹

¹慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科, ²Byte Bites 株式会社, ³東京大学大学院学際情報学府

¹Keio University Master of Media Design, ²Byte Bites Co., Ltd., ²The University of Tokyo Graduate School of Interdisciplinary Information Studies

⁴Metalium 合同会社, ⁵株式会社 FabCafe Nagoya

⁴Metalium LLC, ⁵FabCafe Nagoya Co., Ltd.

【要約】

食感は食事体験において非常に重要な要素であり、その食品の構造が大きな役割を果たす。また、現代の 3D フードプリンティング技術の進化により、食品の複雑な構造設計が可能になった。しかし、具体的な形状とそれが生み出す食感との関係は未だ不明確であり、新しい食品のデザインを行う際、意図した食感を再現することは困難である。この研究では、食品の構造と食感との相関を探り、誰もが簡単に食感をデザインできるシステムの開発を目指す。具体的には、日本のオノマトペによる食感表現を活用し、特定のオノマトペが示す食感を 3D プリンティングモデルで再現する。その結果、ユーザーに対し、自身の好みに合わせた食感を直感的にデザインできる体験を提供する。本研究により、個々のユーザーに合わせた食感の設計、食品の多様性の拡大が期待される。

キーワード: 3D フードプリンタ, デザイン, オノマトペ

【Abstract】

Texture plays a pivotal role in our dining experiences, greatly influenced by the structure of the food. The evolution of modern 3D food printing technology has made it possible to design intricate food structures. However, the specific relationship between shape and the resulting texture remains unclear. When designing new foods, replicating the intended texture is challenging. In this research, we aim to explore the correlation between food structure and texture and aspire to develop a system where anyone can easily design textures. Specifically, we leverage the expressive power of Japanese onomatopoeias that describe texture. We then reproduce the texture indicated by a particular onomatopoeia using a 3D printing model. As a result, we offer users an experience where they can intuitively design textures tailored to their preferences. This research holds the promise of bespoke texture design and expanding food diversity for individual users.

Keywords: 3DFoodPrinting, Design, Onomatopoeia

1. 序論

食感は食において重要な要素の 1 つである。食感は「素材の物性・調理方法・形状」によって構成されている。[1]その中でも形状による食感へのアプローチの実践例は少ない。一方で、近年 3D プリンタ技術が発展し、その範囲は食品製造にも及んでいる。3D フードプリンタは介護食や、代替肉の培養、菓子の造形に使用されており、最近では、ユーザが栄養素をカスタマイズできるパーソナライズ食品なども登場している。3D フードプリンタはその高度な再現性と複雑な形状の制作を可能にすることから新たな技術への応用が期待されている。今回の取り組みでは 3D フードプリンタを活用し、より自由な成形による食感制御の実践を行った。

日本では食感を表現する際、オノマトペなどの感性的な表現が多く使用されている。早川らによると日本語のテクスチャ用語は 445 語あると報告されている[2]。中村らは、現在の食品開発では感性的なオノマトペ食感表現で示される質感の表現が求められていると述べて

いる[3]。この感性的な表現と食品の構造を結び付けることができれば、誰もが簡単に食感をデザインすることができると考えた。

2. 先行事例

中村らは、「おいしさ」を食品構造から追求し、特においしい食感(とろ〜り)についてプリン(プリン)の構造との関係について述べている[3]。数種類のプリンの破壊構造を観察し、「とろ〜り」食感には咀嚼の始めが柔らかく、つぶした後はなめらかでざらつきが小さいことが寄与していることとしている。

堀内は、食品の口内での壊れるメカニズムに着目し、3D フードプリンタを用いて、建築の内部構造に使用される構造を設計することで、内部構造の変化による食感変化を試みた[4]。建築構造を元にしたそれぞれの内部構造を食感のオノマトペ表現を用いて評価し、素材の質量や密度ではなく、構造で食感が変化すると述べている。

本研究では、食感と構造の関係を探り、オノマトペに対応する構造を設計することで、誰もが食感をデザインできることを目的として食感制御の実践を行う。

3. 食感のリサーチ

3.1 食感とは

口内で食感を感じる部位は2種類あり、口あたり、舌触り、喉ごしを感じる粘膜や舌と、歯ごたえや歯ざわりを感じる歯根膜に分けられる[5]。人間は、なめらかさやみずみずしさ、粒子状態などを粘膜や舌で認識し、硬さやもろさ、弾力性、粘度などを歯根膜で識別している。

3.2 オノマトペと食品の関係性の調査

オノマトペから想起される食品について調査した。特に製菓においてはパッケージに食感を表すオノマトペが表示されていることも多い。今回はそれぞれのオノマトペから想起される食品を20代から30代の男女6人を対象にアンケート調査を行った。アンケートの結果の一部を以下に示す。

サクサクから想起される食品:

ポテトチップス、パイ、クッキー、ビスケット、米菓、フライドチキンの衣、天ぷら、薄く焼かれたピザ生地

パリパリから想起される食品:

クロワッサン、天ぷら、チョコレート、キャベツ、ナチョス、

ポリポリから想起される食品:

じゃがりこ、ポッキー、いもけんぴ、豆菓子、揚げパスタ、野菜スティック、たくあん

サクサクから想起される食品は比較的水分量が少なく、隙間量が多いと考えられる。ポリポリから想起される食品は比較的棒状である傾向があり、特に製菓では比較的水分量が少ないと考えられる。中にはチュロスのように棒状であるがポリポリが想起されない食品があることが分かった。

その他、ポテトチップスや、フライドポテトなど素材は同一であるが、その構造や製造方法により食感に違いがある食品が存在する。例えば、ポテトチップスには厚切りやギザギザにカットしたものが存在し、フライドポテトには細くカットされたシューティングや、三日月状にカットされたウェッジカットが存在する。

3.3 実食による考察

食感と構造の関係を探るため、形状や食べ方によってどのような示唆が生まれるか製菓を実食し検証を行った。食感を評価する中で、食感には厚みと隙間量(製菓全体における空洞の量)が関係する傾向があった。

既存の製菓の形状の比較や食べ方の比較による実験での気づきと仮説を以下に示す。

(実験1)ポテトチップスの評価

最初はパリパリの食感から砕いていくうちにサクサク

食感へ変化したことから、感じ方は噛む場所(前歯/奥歯)と因果関係があると考えられる。

(実験2)ポテトチップスとポテトデラックスの比較

ポテトデラックスはザクザクとした食感であったため、パリパリ食感は製菓の厚み、広がり因果関係があると考えられる。

(実験3)ポテトチップスの重ね食べ

一枚のみよりもサクサクに感じられたため、サクサク食感隙間量と因果関係があると考えられる。

(実験4)ポテトチップスとギザギザポテトの比較

破断の大きさに違いがみられる。ギザギザポテトはより大きな粒に破断され、ザクザクとした食感であったことから、ザクザク食感破断後の粒のサイズと因果関係があると考えられる。

(実験5)ポッキー(大・小)・豆菓子の比較

どれもポリポリから連想される製菓であるが、ポッキーは実際にはサクサクしている。ポッキー(小)、豆菓子は比較的ポリポリ食感を感じられ、どちらも断面が詰まっていたため、ポリポリは太さと密度と因果関係があると考えられる。

また、人が感じる食感はその商品名やパッケージに書かれているオノマトペの影響を大きく受ける傾向があることが分かった。加えて、棒状の食品をポリポリと感じることから、食品の見た目も食感に影響する可能性がある。

4. 制作

4.1 データ作成

データの作成には3DCADソフトのRhinoと、そのモデリング支援ツールプラグインのGrasshopperを用いて構築した。Grasshopperでは設計要件の値を変数として設定することで、スライダーによる変数の調整により形状の変更が可能である。(図3)

3.3の仮説から以下の3つのオノマトペについて、パラメトリックモデルの構造設計を行った。今回の取り組みでは、水分量が少ない食品が比較的素材に依存せず、構造での変化が起こりやすいと考え、水分量が少ない食品によく使われているオノマトペを選定した。

(1) SAKUSAKU

サクサク食感隙間量に由来するとし、Y軸方向に波を作り層が多くなるよう設計した。

(2) PALIPLAI

パリパリ食感厚み、広がり由来するとし、X軸方向に幅が広がるよう設計した。

(3) POLIPOLI

ポリポリ食感は太さに由来するとし、細くなるよう設計した。

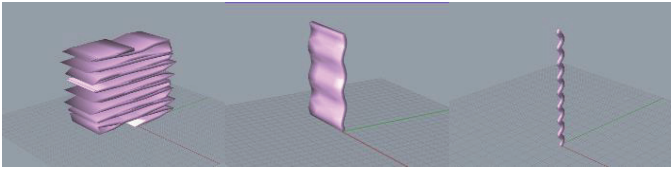


図 1. 形状の例

(左:SAKUSAKU 中央:PALIPLAI 右:POLIPOLI)

実験 5 で評価したポッキーは、ポリポリから連想されるにも関わらずサクサクとしていたことから、視覚的印象もオノマトペに食感のオノマトペに関わるとして、上記の3つのオノマトペに加えて以下の2つのオノマトペについて構造設計を行った。

- (4) GIZAGIZA
X 軸方向に波ができる。
- (5) MOCHIMOCCHI
波の数が増え、全体的に丸みを帯びる。

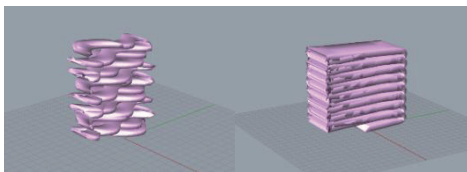


図 2. 形状の例

(左:GIZAGIZA 右:MOCHIMOCCHI)

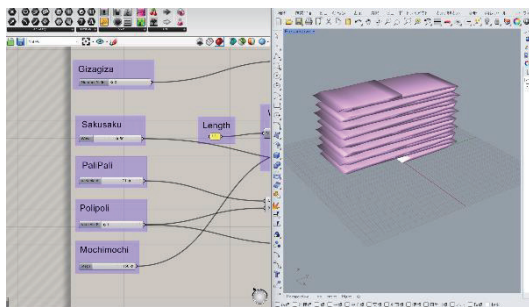


図 3. Grasshopper でのシステム

4.2 3D プリント

今回はフードプリントでの造形が比較的容易であるマッシュポテトを素材とした。プリントデータは前述した Grasshopper にて、G-code を生成している。今回使用したプリンタは Wiiboox 社の LuckyBot である。

Layer height	1.7mm
Initial Layer height	1.7mm
Top Bottom layer	0.8mm
Infill	100%
Print speed	20.0mm/s
Support	None
Flow	2.0%
Wall speed	20.0mm/s
Travel speed	120.0mm/s
Initial layer speed	20.0mm/s

図 4. プリントセッティング

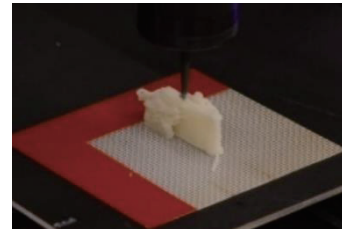


図 5. 出力例

5. 結論

本研究では食感の研究と、特定のオノマトペの構造モデリング、プリントを行った。食感の研究により、オノマトペが表す形状に特徴があることが分かり、その構造を設計することができた。オノマトペ変数の調節によって同一素材から違う構造をプリントし、ユーザーが自身の好みに合わせた食感のデザインができる可能性が示された。

今後は、プリントされた構造の食感の評価を進めていく。また、素材の選定、調理方法の確立により、よりオノマトペに近い食感を制作することを目指す。

参考文献

1. Pâtissier 編集部, 「お菓子の完成度を高める香り・食感・デザイン: レシピから探るパティシエ 36 人の思考力と表現力」, 柴田書店, 2023, 208p
2. 早川 文代, 日本語テクスチャー用語の体系化と官能評価への利用, 日本食品科学工学会誌, 2013, 60 巻, 7 号, p. 311-322, 公開日 2013/08/31, Online ISSN 1881-6681, Print ISSN 1341-027X, <https://doi.org/10.3136/nskkk.60.311>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/nskkk/60/7/60.311/_article/-char/ja
3. 中村 卓, おいしい食感とスイーツの構造, 化学と教育, 2019, 67 巻, 1 号, p. 36-37, 公開日 2020/01/01, Online ISSN 2424-1830, Print ISSN 0386-2151, https://doi.org/10.20665/kakyoshi.67.1_36, https://www.jstage.jst.go.jp/article/kakyoshi/67/1/67.36/_article/-char/ja
4. 堀内美佑, 池田靖史「内部構造設計による食感デザインの可能性」慶應義塾大学環境情報学部

(2023)

5. 日本成人病予防協会, 「食感～おいしさの秘密～」, 日本成人病予防協会, 2019 年 8 月 9 日, https://www.japa.org/tips/kkj_1108/
6. 若杉亮介, 「3D プリンタを用いた新しい食感を有するフードデザインの実践」, 慶應義塾大学 SFCHiroyaTanakaLaboratory, KeioSFC(2019)

触感をみせる —3D ゲルプリンターを用いたやわらかアートの制作と展示—

Using a 3D Gel Printer to Create Soft Art and Exhibit its Tactile Qualities

臼井 昭子¹, 渡邊 洋輔², 古川 英光²

Shoko USUI¹, Yosuke WATANABE², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学有機エレクトロニクスイノベーションセンター, ²山形大学大学院理工学研究科

¹Innovation Center for Organic Electronics (INOEL), Yamagata university,

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata university

【要約】

ゲルという造形材料および 3D ゲルプリンターという造形手法を用いたアート表現の可能性を探ることを目的とし、(1) 3D ゲルプリンターの印刷物の触感を分類し、(2) 3D ゲルプリンターを用いた立体作品(やわらかアート)の制作、公募展への応募・展示を実施した。その結果、3D ゲルプリンターの印刷物は触感の四軸(硬-軟, 粗-滑, 乾-湿, 冷-温)において、暫定的に「軟, 滑, 湿, 冷」に分類された。やわらかアートは、現代アートの専門家から「生命体の生々しさを感じる」「オーガニックな被膜感は新たな造形の可能性を秘めている」等の評価を受け、その価値や魅力は、現時点では「軟, 滑, 湿, 冷」といった触感が生き物を彷彿とさせるそのインパクトにあることが示唆された。

キーワード: 3D ゲルプリンター, やわらかアート, 触感, 展示, 立体作品

【Abstract】

With the aim of exploring the possibilities of artistic expression using gel as a modeling material and the 3D gel printer as a modeling method, we (1) classified the tactile qualities of 3D gel printer prints, (2) created three-dimensional works using the 3D gel printer, submitted them to an open competition, and exhibited them for over one month. As a result, the 3D gel printer prints were classified as "soft," "smooth," "wet," and "cold" on the four tactile qualities (hard - soft, rough - smooth, dry - wet, and cold - warm). The Soft Art using 3D Gel Printer was evaluated by contemporary art experts as "a fresh work that gives a sense of the rawness of a living organism," etc. It was suggested that the value of Soft Art lies in the impacts of the creature-like tactile qualities of "soft," "smooth," "wet," and "cold" at this point in time.

Keywords: 3D Gel Printer, Gel PiPer, Soft Art, Tactile Qualities, 3D Works

1. はじめに

3D プリンターは学校教育での活用にも期待が寄せられており[1], 筆者らが高校生を対象に 3D ゲルプリンター[2]を用いて美術科の授業を模した実践をしたところ、高校生らは材料の工夫や鑑賞において学習目標を達成しており、3D ゲルプリンターが美術科の立体表現学習を支援している可能性が示唆された[3]。今後、美術科の立体表現学習で 3D ゲルプリンターの活用を加速させるには、児童生徒や教員がそれを使って表現することを楽しんだり面白く感じたりするなど、より興味関心を高めていくことが肝要である。そのため、3D ゲルプリンターを用いて制作する立体作品にどのような価値や魅力があるのか具体的に示していくことが求められよう。そこで、筆者らは、3D ゲルプリンターがどのような新しい表現を生み、鑑賞者にどのような価値を見い出してもらえるのか、専門家などによる客観的な意見を得て実証する必要があると考えた。

ところで、3D ゲルプリンターの印刷物はやわらかく湿っていることが特徴である[2]。従来型の美術館や展示会では、鑑賞者が作品に触れて鑑賞することはほとんどできないため、3D ゲルプリンターで制作した作品は、

「やわらかそうに湿っているように見える立体作品」として展示されることになる。こうした 3D ゲルプリンターで制作した立体作品(本研究では“やわらかアート”とする)にどのような価値や魅力があるかを実証するにあたり、次節以降で「触感」「鑑賞」「やわらか彫刻」「3D プリンターによるアート」について近年の関連研究を整理し、やわらかアートの位置づけを確認する。さらに、本研究の目的を示す。

1.1 触感

作品に触れることができない従来型の展示会において、やわらかアートは「やわらかそう」「湿っている感じがする」といった“触感のようなもの”も提示することになる。触感とは何であろうか。触感の研究は、日本では、例えば仲谷・笈・白土・三原・南澤・岡崎ほかによって深められており[4][5][6], 成果の一つとして触感の見本帳(帖)[6][7]がある。仲谷は触感について、「触ることによって生じる主観的な体験」、「(主観的であるため)科学で扱いにくい対象」、「五感やさらには言語や記憶のような高次の認知機能が触覚と組み合わせられることで一つの触感イメージとして感じられる」と述べ、図1のような触感の生成ダイアグラムを示した。さらに、触感には、硬-軟、

粗-滑, 乾-湿, 冷-温の軸があり, この四軸で触感の80%を説明できるとしている。

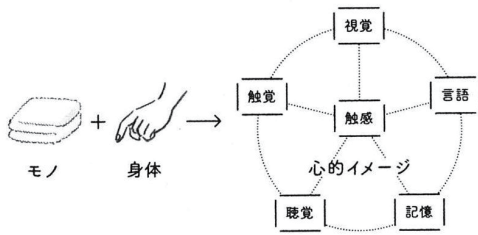


図1 触感の生成ダイアグラム(仲谷 2016)

1.2 鑑賞

「アートを鑑賞するとはどういうことか」という問いは長らく哲学や心理学の研究テーマであった。ジョン・デューイ(John Dewey)は、「鑑賞者の中で再創造の活動なくしては, ものが芸術作品として認識されることはない」としている[8]。こうした, 鑑賞者によって初めて美術作品が完成するという考え方を, ロバート・L.ソルソ(Robert L. Solso)は, 「美術」と「認知」という二枚の向かい合った凹面鏡のようにいつも互いを拡大しあい映しあっていると説明した[9]。近年でも上野は, 「作品は一人ひとりの心の中で完成する」と述べている[10]。

こうした鑑賞に関わる言説は視覚を使って作品を鑑賞することが前提になっていたと思われるが, 立体を知覚する方法には主に視覚と触覚が用いられるとされており[11], 近年は触覚を使って鑑賞する研究[12]や触覚的な展示やツアーを行うギャラリーも増えている[13]。さらには, 視覚も触覚も用いない鑑賞が目目されている。例えば, 全盲の美術鑑賞者と称される白鳥健二氏は「自由な会話を使ったアート鑑賞」という独自の鑑賞法を編み出し[14], 視覚も触覚にも頼らずに会話によって美術鑑賞を楽しんでいる。「触ったらおそらく～な感じ」といった触感の言語化は, 言語化する第三者の触感を通した新しい鑑賞につながると思われる。

1.3 やわらかい彫刻(ソフトスカルプチュア)

立体作品や彫刻は, 強固な材料で制作されることが一般的であるものの, 布や綿, ゴム等やわらかく形を変えやすい材料を用いた作品が 1960 年代から存在するようになった。こうしたやわらかい彫刻(ソフトスカルプチュア, ソフトアート等と称する場合もある)は, クレス・オルデンバーグ(Claes Oldenburg)によって興されたとされている。彼の作品は, 鑑賞者が空気を注入しない限りしばらくそのまま, 変形する過程が作品そのものとして提示された。建物を巨大な布で包むクリストとジャンヌ・クロード(Christo & Jeanne-Claude)の作品や, 草間彌生による布に綿を詰めた作品等, やわらかい彫刻は, 柔軟な材料の特性を通じて生まれる変化や瞬間のメッセージ性に特徴がある。現在は, パフォーマンスアートや多種多様な表現・鑑賞手法があるため, 「やわらかい彫刻」というカテゴリーは薄れつつあるが, 今日でも, 絵文字をビニールのバルーンで表現したもの[15]や糸を天井や壁一面に幾重にも絡めた作品[16]など, やわらかい材料

を用いた作品は継続的に発表されている。

また, 強固な材料を用いない点では, 水や光, 植物, 風, 磁性といった, 自然やその動力を造形材料にする作品も近年多くみられる。ロニ・ホーン(Roni Horn)の『Water Double』やパトリック・ブラウン(Patrick Blan)の『Vegetal Wall』など, デジタルが浸透した現代社会において, 自然や環境をテーマにした作品はより受け入れられる傾向にあると思われる。

1.4 3D プリンターによるアート

エンジニアとデザイナー, サイエнтиスト, アーティストの仕事が融合されつつある現代では, 3D プリンターから, 芸術的なプロダクトや作品, 革新的な創造物は数多く生まれている(例: [17][18][19])。他方で, ゲルを材料の主にした作品はほとんど見られず, 3D ゲルプリンターを用いたやわらかアートは, その存在価値の有無も含め, 未踏の領域と考えられる。

1.5 やわらかアートの位置づけ

先行研究をふまえ, 3D ゲルプリンターで制作したやわらかアートは, ゲルという材料が最大の特徴で, 鑑賞者各々の「やわらかい」「湿っている」という触感をともなった, これまであまり見られなかった作品になると考えられる。また, 「自由な会話を使ったアート鑑賞」をする場合は, 言語化された第三者の触感が加わり, より多面的な鑑賞をもたらすことが推察される。

1.6 目的

ゲルという造形材料と 3D ゲルプリンターという造形手法を用いたアート表現の可能性を探ることを目指し, 本研究では以下の2点を行う。

- (1) 3D ゲルプリンターの印刷物の触感を分類する
- (2) 3D ゲルプリンターで制作する立体作品(やわらかアート)にどのような価値や魅力があるか実証する

2. 3D ゲルプリンターの印刷物の触感の分類

2.1 手続き

3D ゲルプリンターの印刷物に触った体験のある 20 人を対象に, 4 種類の触感の軸(硬-軟, 粗-滑, 乾-湿, 冷-温)について, 各個人の主観を 4 件法(例: 硬い, やや硬い, やや軟らかい, 軟らかい)で求めた。なお, 対象者は 3D ゲルプリンターや 3D プリンターの扱いに比較的慣れている工学部の学生が主であり, 人数とその属性から結果が示す範囲は限定的である。

2.2 結果と考察

サンプル数を考慮し統計処理は行わなかったものの, 図 2 の結果に示す通り, 硬-軟, 粗-滑, 乾-湿の各軸で回答に偏りが認められた。冷-温の軸では, ゲルの印刷

	やや ←		→ やや		
硬	0	0	6	14	軟
粗	0	3	4	13	滑
乾	0	0	2	18	湿
冷	2	13	4	1	温

図 2 3D ゲルプリンターの印刷物の触感(主観)(人)

物はほぼ常温のため回答が分散したと思われるが、「冷たい」と「やや冷たい」で 75%を占めていた。粗-滑の軸では「やや粗い」が 3 人おり、3D プリンターの扱いに慣れた回答者の場合、造形物の分解能を意識し回答した可能性もある。3D ゲルプリンターの印刷物の触感、暫定的に、軟、滑、湿、冷に分類されると考えられた。

3. やわらかアートの価値や魅力の実証

3.1 手続き

以下の実践を通してやわらかアートの価値や魅力について実証を試みる。

- (1) 3D ゲルプリンターでやわらかアートを制作する
- (2) 公募展に応募し専門家から評価を得る(現代アート分野で受容されるか否か検証する)
- (3) やわらかアートの搬送と展示を行う(形状の維持, 長期間の展示に耐えられたか等を検証する)
- (4) 価値や魅力について考察する

3.2 結果

3.2.1 制作

制作にあたった 2022 年度上半期(4-9 月)時点で印刷可能なオブジェクトのサイズは約 5cm 立方であったため、印刷したオブジェクトを数十～百個程度組み合わせ一つ一つの作品を制作することにした。ゲルという時限的で自然に還りやすい材料から発想し、透明感を活かしながら枯山水のようなうねりを造形しようと考えた。十数回におよぶ試印刷を経て 5 本の突起を持つシンプルな形状(表 1 左)がゲルのやわらかさが表現できると判断し、最終的に、印刷したオブジェクト約 28 個を組み合わせ、やわらかアート(図 3)が完成した。インクとなるゲル溶液は、ICN ゲル(相互架橋網目ゲル)[20]を用いた。

3.2.2 公募展への応募と評価

アートの公募展は国内外で様々に展開されており、応募先の決定は、本研究の成果に影響を及ぼす。おおかたの公募展では一次審査で落選した場合、落選理由を含め審査講評を得ることが難しい。本研究は審査員からの評価を得ることが目的の一つであるため、作品の制作に加えて、できるだけ入賞を望める公募展のリサーチも行った。「募集ジャンルが現代アートを対象としているか」「立体作品への門戸が開かれているか」「新人作家でも入賞しているか」「国際的な公募展か」「3D ゲルプリンターといった新しい技術に好意的か」等について、審査員、過去の受賞作品、広報資料、応募者の SNS 等から検討し、「枕崎国際芸術賞展(詳細は表 2)」に決定した。一次の写真審査では、やわらかさ、水みずしさが



図 3 やわらかアート『だだん, だだんだ, だん』
サイズ 4×32×28cm

伝わるようプロの写真家に多方向からの撮影を依頼した。二次は現物審査で、霧吹き(後述)が必要なメンテナンス上のデメリットも開示し、審査の結果を待った。

結果は、表 2 に示した通りで、審査員からの評価では「増殖/生命体の生々しさ/ヌルヌルした質感/腔腸動物/まるで生きていて/今にも動き出しそう/オーガニックな被膜感」といった文言が抽出された。

3.2.3 搬送と展示

山形大学の米沢キャンパスで、表 1 左のオブジェクトを 100 個程度印刷し、水に浸した状態で、第一筆者の当時の居住地である福岡市まで宅配便で搬送したところ、印刷時の形状を保っていたのは 68 個程度であった。約三分之一が破損したことから、やわらかアートの搬送には課題が残った。展示は、2022 年 9 月 11 日～10 月 16 日までの 36 日間で、会場スタッフに依頼し毎日霧吹きを 10 回程度吹きかけて作品を湿らせてもらった。霧吹きには防腐剤フェノキシエタノール入りの精製水を使用し、カビの発生を抑えることができた。会期中は、作品を覆うアクリル天板が曇るといった現象がおき、天板を外し展示した日もあったという。展示会期終了後は、防腐剤入りの精製水に浸るようタッパーに保存し約 1 年後でもカビの発生をおさえ形状も維持できていた。

結論として、やわらかアートは、①搬送では一定数が破損することを想定し予備の印刷物を用意する必要があった、②毎日霧吹きで湿らせるメンテナンスをすることで、③1 か月以上の展示に耐え得ることがわかった。

3.2.4 価値や魅力の考察

審査員の評価「生命体の生々しさを感じずる今までにない新鮮な作品」「オーガニックな被膜感は新たな造形の可能性を秘めている」等が示すように、本作品は、作品の周囲を歩くとその振動で作品がプルプルと動くため、生き物を感じさせる触感をみせることができていたと思われる。やわらかアートの触感「軟」「滑」「湿」「冷」は、毛のない無脊椎動物のような生き物を彷彿させると考えられ、「増殖/生命体の生々しさ/ヌルヌルした質感/腔腸動物/まるで生きていて/今にも動き出しそう/オーガニックな被膜感」といった文言が生まれたと推察される。

4. おわりに

ゲルという造形材料と 3D ゲルプリンターという造形手法のアートの表現手法としての可能性を探ることを目的に、3D ゲルプリンターの印刷物の触感の分類、やわら

表 1 試印刷に用いた 3D データと印刷物の例

採用	不採用の一例
<p>データがシンプルでも突起が垂れ下がりがやわらかさが伝わりやすい</p>	<p>突起が鋭利で細かくとも印刷物のやわらかさは伝わり難い</p>

表 2 第 3 回枕崎国際芸術賞展の概要と結果、やわらかアートに対する審査員からの評価コメント

概要と結果	枕崎国際芸術賞展は鹿児島県枕崎市が主催し 2016 年から 3 年毎に行われている現代アートの公募展。2022 年に開催された第 3 回は国内外から 1,128 点の作品が寄せられ、4 名の審査員による審査の結果選ばれた 62 点の入賞・入選作品（平面 48 点、立体 14 点）が 2022 年 9 月 11 日から 10 月 16 日まで、枕崎市文化資料センター南浜館（なんめいかん）で展示された。やわらかアート「だだん、だだんだ、だん」は、大賞 1 点、準大賞 1 点に次ぐ第 3 位に相当する優秀賞を受賞した（優秀賞は全部で 3 点）。
評価 1	今日までどこでも見たことが無いほどの進取の気性を示した優秀作、想像をも越えた想像力がある（東京藝術大学名誉教授 絹谷幸二氏）
評価 2	今後の展開が楽しみな作品。増殖もキーワードに、床や壁一面ぐらいの大きな作品にしてみたらどうかとイメージが膨らんだ（染色アーティスト・東京藝術大学名誉教授 上原利丸氏）
評価 3	奇妙な生命体の生々しさを感じずる今までにない新鮮な作品（東京藝術大学名誉教授 保科豊巳氏）
評価 4	ヌルヌルした質感に驚かされた。腔腸動物の集合体にも似て、まるで生きていて、今にも動き出しそうに見えた。オーガニックな被膜感は、これからの新たな造形の可能性を秘めているかもしれない（アーティスト・東京大学名誉教授 河口洋一郎氏）

かアート作品の制作、公募展への応募・展示を行った結果、主に以下の事柄が確認された。

- (1) 3D ゲルプリンターの印刷物の触感は、暫定的に、軟、滑、湿、冷に分類されると考えられた
- (2) やわらかアートは、①搬送で一定数が破損する、②毎日霧吹きで湿らせメンテナンスをすることで、③1 か月以上の展示に耐え得ることがわかった
- (3) 現代アートの専門家の評価から、やわらかアートの価値や魅力は、現時点では、「軟」「滑」「湿」「冷」といった触感が無脊椎動物のような生き物を彷彿させ、そのインパクトにあることが示唆された

本研究は、ケーススタディとして報告した。芸術賞展での受賞は、ゲルという材料のユニークさによるビギナーズラックも背景にあり。審査員からは今後の展開が重要で継続して制作・応募するよう助言を受けた。そこで、別に制作したやわらかアートを、2022 年冬から今日にいたるまで二つの公募展に応募したが、残念ながらいずれも通過は叶わず評価は得られていない。

本来は表現したいイメージやメッセージから逆算して材料を選ぶのが理想であるが、本研究では材料から発想して作品を制作した。本研究の背景に立ち返り、学校の美術科教育で活用を目指す場合、学習指導要領解説には、「立体の表現では材料の選び方が重要で（中略）材料を限定することにより立体で表現する力を育成する」、「既存の表現手法に限らず、材料の特徴を活かして作品をつくること」が求められている。これを踏まえると、3D ゲルプリンターは、新しい表現手法でゲルという材料の特徴を活かして作品を制作する点で、子供らの表現力育成を支援する可能性がある。また、鑑賞の学習では、形や色に加えて材料も重要な要素となるため、触感を言語化した意見交換は新しい鑑賞法として子供らの学びを深めることが期待できる。3D ゲルプリンターが、アート作品の材料・造形手法としてより活用されるよう本試みを発展させていきたい。

5. 謝辞

枕崎市はじめ第 3 回枕崎国際芸術賞展の運営スタッフの皆さま、やわらかアートの印刷をサポートしてくれた糸井麻夏さん（当時山形大学工学部）に深く感謝します。

参考文献/資料

1. 門田和雄, “門田先生の 3D プリンタ入門 何を作れるのか、どう役立つのか”, 講談社, (2015).
2. 3D ゲルプリンター (Gel PiPer), <https://gelpiper.cc/>
3. 白井昭子, 登本洋子, 櫻井佑真, 渡邊洋輔, 古川英光, “学校教育における 3D ゲルプリンタを活用した立体造形の学習に関する一考察”, 4DFP2021 予稿集 (2021), pp.67-70.
4. 仲谷正史, 寛康明, 白土寛和, “触感をつくる——《テクタイル》という考え方”, 岩波書店, (2011).
5. テクタイル 仲谷正史, 寛康明, 三原聡一郎, 南澤孝太, “触楽入門 はじめて世界に触れるときのよう”, 朝日出版社, (2016).
6. 岡崎太祐, “触感見本帳 Tactrium の価値開発の実践ーデジタルファブリケーションを用いた硬軟、粗滑の設計を通じてー”, 修士論文, 慶應義塾大学, (2021).
7. HAPTICS OF WONDER 12 触 α GEL 見本帖, <https://taica.co.jp/gel/collection/haptics/>
8. デューイ, ジョン / 栗田修 訳, “経験としての芸術”, 晃洋書房, 京都, (2010).
9. ソルソ, ロバート L. / 鈴木光太郎, 小林哲生 訳, “脳は絵をどのように理解するかー 絵画の認知科学”, 新曜社, 東京都, (1997).
10. 上野行一, “私の中の自由な美術ー 鑑賞教育で育む力”, 光村図書出版, 東京都, (2011).
11. 堤浪夫, 佐久間義敬, 鈴木賢次郎, “立体の触覚・視覚と投影図形との関係について”, 図学研究, 29 巻 Supplement 号 (1995), pp.113-118.
12. 古屋祥子, “国内美術館・博物館における触覚を活用した美術作品鑑賞に関する調査”, 山梨県立大学人間福祉学部紀要, Vol. 18 (2023), pp.15-29.
13. 映画『手で触れてみる世界』, <https://le-mani.com/>
14. 目の見えない白鳥さん, アートを見に行く, <https://shiratoriart.jp/>
15. Shoei Matsuda, The Big Flat Now, (2022).
16. Chiharu Shiota, The Boat Which Carries Time, (2017).
17. Nell Shiin, MAT 一級建築士事務所, 東福寺光明院枯山水庭園「波心庭」に彫刻作品を設置, (2023).
18. WIRED, 「ポストデジタル・アート」10 選, <https://wired.jp/2015/01/21/postdigital-art-gallery-1>
19. 慶應義塾大学田中浩也研究室, <https://fab.sfc.keio.ac.jp/>
20. Yosuke W, Shota I, Azusa S, Masaru K, Hidemitsu F, “3D printable inter cross-linking network (ICN) gels for reversible transparency control with water content”, Microsystem Technologies, 28, (2022), pp.167-171.

デジタル・ファブリケーションを利用した木材流通のデザイン

Designs for timber transportation with digital fabrication

宮本 瑞基¹, 水野 大二郎²

Mizuki MIYAMOTO¹, Daijiro MIZUNO²

¹ 合同会社 Poietica, ² 京都工芸繊維大学

¹Poietica LLC., ²Kyoto Institute of Technology

【要約】

本研究は、生産と消費の関係性の再構築を目的としたデザイン・プロジェクトである。林業地域である京都市右京区京北地域を起点に、林業地域で生産される木材を都市部の空き家や木造家屋の改修材として活用する方法を検討し、里山と都市を繋ぐ暮らしを思索する。今回は山主、不動産業者、入居者による新しいスキームを提案するとともに、木造家屋の改修方法のひとつである柱材の根継に着目し、デジタル・ファブリケーションのひとつである CNC 切削加工機を用いた木材加工のプロトタイピングを行った。

キーワード: 林業、木材流通、CNC 切削加工、デジタル・ファブリケーション

【Abstract】

This research is a design project aimed at reconstructing the relationship between production and consumption. Starting from the Keihoku area of Ukyo-ku, Kyoto, which is a forestry area, we will examine ways to utilize timber produced in the forestry area for renovating vacant houses and wooden houses in urban areas, and explore ways of living that connect satoyama and city. In addition to proposing a new scheme involving mountain owners, real estate agents, and tenants, the project focused on the root jointing of post timbers, one of the methods for renovating wooden houses, and conducted prototyping of wood processing using a CNC milling machine, one of the digital fabrication methods.

Keywords: forestry industry, timber transportation, CNC milling, digital fabrication

1. 序論

1-1. 研究背景

今日、各国が国連の定める持続可能な開発目標 (SDGs) に取り組む一方、私たちは依然として、環境危機という地球規模の課題に直面している。デザイン対象が製品からサービス、行政にまで拡張するなか、デザイナーは持続可能な社会の実現に向けて、超包括的な社会・技術的問題に取り組む必要がある。ヴィクター・パパンエク (Victor Papanek) は自身の著書『生きのびるためのデザイン』(Papanek, 1971) [1]において、大量生産・大量消費を助長するインダストリアル・デザイナーを批判する一方で、専門家・非専門家を問わない、複数の分野のメンバーから構成されるデザインチームを提唱した。現在はクリティカル・デザインやスペキュラティブ・デザインといった領域において、大量生産・大量消費ではないデザインのあり方やありうる未来の思索の実践が提示されている。また持続可能性の観点からは「社会変革のデザイン (Design for Social Innovation)」、「移行期のデザイン (Transition Design)」といったデザイン環境が活発になっている。

本研究では、「生産と消費」という観点から、デジタル・ファブリケーションを利用した実践に着目した。デジタル・ファブリケーションとは、デジタルデータから直接ものをつくる機械であり、ものづくりのプロセスである。また、

ものづくりの民主化を後押しする技術であり、デジタルとフィジカルを繋ぐインターフェースとしても位置付けられる。

このデジタル・ファブリケーションを地域に開いた実践が「Fab Lab」であり、都市-地球スケールに拡張した実践が「Fab City」である。Fab City 構想ではものの製造におけるサプライチェーンに着目し、現在の持続不可能な形態 (PITO, Product in/Trash out) から、持続可能な形態 (DIDO, Data in/Data out) への移行を提案している [2]。これは環境負荷の低減や、知識・実践の民主化を目的としたサプライチェーンのリ・ローカライズ化であり、短期的な利用のために遠く海外の素材を使って生産、輸送し、廃棄する産業形態からの移行を図るものである。

本研究では、これを「生産と消費の関係性の再構築」として捉え、私の住む日本や本学のある京都における、ありうる未来を考察する。

日本の国土に注目して地域内での資源循環や経済圏を考えると、豊富な森林資源は素材として、また里山と都市は自然資源の生産地・消費地として適している。塩地博文らによる『森林列島再生論 森と建築をつなぐイノベーション「森林連結経営」』(塩谷他, 2022) は、生産地と消費地の密接、他国と比較した際の人工林の面積や森林備蓄量、それに対する木材使用量を挙げ、そのポテンシャルの高さを示している [3]。林野庁の発表に

よると現在森林備蓄量は約 52.5 億 m³[4]であり、その 6 割が人工林である。一方で国内における木材消費量は年間 7900 万 m³であり、木材自給率は 41.1%に留まっている[5]。この不健全な状況に加えて塩地は、国産材のサプライチェーンにおける課題の一つとして分業制の弊害を指摘する[3]。ここからは、仲介業者が多く、最上流の山主への利益分配がされにくい構造が構築されている点、また多くの場合、木材を利用する消費者にとっては、木材のサプライチェーン自体がブラックボックスである点が問題として考えられる。翻って京都に目を向けると、京都市北部には林業が盛んな京北地域があり、古くは 8 世紀、平安京造営時から都市部へ建材を供給してきた歴史がある。一方かつて建材の主な消費地であった京都市における空き家数は、2018 年 10 月時点で 10.6 万戸であり、総住宅数に対して 12.9%を占める[6]。

1-2. 研究目的

先述したいくつかの背景を踏まえ、本研究では、デザインリサーチを通じたオルタナティブな木材流通の思索と、技術的実現可能性の検証を目的とする。この実践では、京都市京北地域をフィールドとし、林業という地場産業と扱い、デジタル・ファブリケーションによるプロトタイピングを行うことで、説得力のあるありうる未来の思索がどのようにして可能かについても検討する。

2. 研究テーマ・コンセプト

2-1. テーマ

本研究のテーマは、生産と消費の関係性の再構築である。今回は京北地域を起点とし、デジタル・ファブリケーションを利用したオルタナティブな木材流通のデザインを行う。これは京北地域に山を持つ山主と、都市部に住む木材の潜在的な需要者を繋ぐサービスであり、里山と都市を繋ぐシステムの構築を目指す。

2-2. コンセプト

持続可能な社会の思索に向けた具体的なアプローチとして、①都市部における木材需要の確保、②山主への利益増加、③技術的実現可能性の 3 つを考える。

まず都市部における木材需要の確保である。先述した通り、京北地域では古くから建材を生産し、都市部に供給してきたため、以前と同様に新築の住宅や建築物の建材としての利用が考えられる。しかし持続可能性の観点では、短期的な利用と大量廃棄のモデルから、ものの修理を通じた長期的利用が求められている。これは製品だけでなく、建築物でも同様である。京都市の空き家は 10 万戸を超えている状況であり、また都市の持続可能性に目を向けたとき、建材を木造家屋の改修材としての需要と価値が見込めるのではないかと考えた。

次に森林の持続可能性と森林更新を目的とした、山主への利益増大である。仲介業者の少ないスキームの

構築により、山主への利益率を上げつつ、都市における需要者に負担のない価格で提供できる可能性が考えられる。

最後に技術的実現可能性である。素材丸太を生産する山主と比較して、加工品を供給する製材所やプレカット工場の単価は高い。デジタル・ファブリケーションを利用したプレカット方法を開発することで、高付加価値の製品として販売することができると考えられる。またサービス利用者の UX や加工時の歩留まり、輸送時の積込みまでを考慮し、利用者によるデジタルデータの自動生成を目指す。

3. 研究手法

3-1. ステークホルダーへの取材

1 か月の長期滞在を含む京北地域へのフィールドワークを複数回実施し、製材所や原木市場、森林組合への取材を行った。林業従事者を中心としたフィールドワークを通して、かつて河川を利用した木材流通とそれらを取り巻く経済圏が存在したこと、また原木市場を通さない一般的でない木材の流通経路が存在することを確認した。

また木造家屋の改修に必要な木材の規格、加工方法を把握するため、京都で町家改修事業を手掛ける事業者への取材を行った。京町家の改修は、新築と比較して 1 軒あたりの木材の使用量は多くないため、多品種少量生産が適していると考えられる。また加工が比較的簡易な板材のほかに、根継を目的とした継手を製作することがわかった。京町家の根継に主に利用されるのは目違継ぎ、蟻継ぎ、鎌継ぎ、金輪継ぎの 4 種類である。これらを必要な寸法に応じてカスタマイズしながら、デジタル・ファブリケーションで加工することで、木造家屋の改修プロセスの民主化につながると考えた。

3-2. 継手のプロトタイピング

先述の取材結果より、デジタル・ファブリケーションのひとつである CNC 切削加工機を用いた、継手のプロトタイピングを行った。デジタルデータの作成には Rhinoceros のアドオンである Grasshopper、Fusion360 を利用した。またプロトタイプ製作には、京都工芸繊維大学 KYOTO Design Lab の大型 CNC 切削加工機を利用した。

今回継手を加工する際の制約として、使用するエンドミルの種類と Z 軸の移動量に制限を設定した。一般に 100 万円以下のような安価な CNC 切削加工機の対応シャンク径は 6mm であることが多い。また木材加工に特化した CNC 切削加工機はサブロク合板に対応するため加工面積は広いが、一方で高さ方向の移動量には期待できず、105 角や 120 角といった規格の柱材を一度に切削することは難しい。今回は 105 角の規格材に対し、直径 6mm のフラットエンドミルのみを利用し、Z 軸の移動量は 60mm 以内とした。

3-2. サービスシナリオのプロトタイピング

ありうる未来の木材流通サービスを思索するため、実際にサービスの利用者や提供者と同じプロセスを実践しながらシナリオ構想を行った。今回は、①都市部に木造家屋を持つ家主が柱を 3D スキャンする場面、②京北地域の山主・製材所から都市部へ木材を輸送する場面を実践した。京都の空き家を扱う不動産協力の元、京都市内にある空き家の 3D スキャンを行った。3D スキャンには、京都工芸繊維大学 KYOTO Design Lab が保有する Focus Laser Scanner (Faro 社製) のほか、3D スキャンが可能な iPhone 14 Pro (Apple 社製) とアプリケーション 3D Scanner App (Laan Labs 社製) を利用した。また京北森林組合から柱材を購入し、自ら軽トラックを利用して木材輸送を行った。

これらの実践から、スマートフォン等の小型ハンディスキャナを前提としたサービスフロー、サービスシナリオの内容を決定した。

4. 成果物

4-1. 新たな木材流通サービスの提案

本研究を通して、里山と都市の持続可能性の向上を目的に、新しい家の建設ではなく、空き家の改修を通じた、木材の生産者と利用者を直接繋ぐプラットフォームを思索した。木材を生産する山主、都市部に空き家を持つ不動産業者、空き家への入居者の三者による新しいスキームを図 1 に示す。これは人々が地域の木材を直接購入することを可能にする、オルタナティブな木材サプライチェーンである。またデジタル・ファブリケーションを活用することで、高度な職人技が要求される木造家屋の改修材をプレカットすることが可能である。このプラットフォームを利用することで、山主は、高付加価値の木材によって利益を得ることができ、その一部を山へ還元することができる。また入居者自身が空き家を改修することで、安い賃料で住むことができる一方、不動産業者は資産価値の向上が見込まれる。

また CNC 切削加工機に必要な 3D データをプロシージャルに生成することで、希望の規格に応じたデータを自動的に生成することができる。山主にとって、空き家の改修という安定した需要に加えて、改修に必要な木材の量が正確に分かることもメリットである。

4-2. CNC 切削加工機を利用した継手の加工方法

CNC 切削加工機を用いて製作した、目違継ぎ、蟻継ぎ、鎌継ぎ、金輪継ぎの 4 種類の継手を図 2、図 3 に示す。それぞれ 1 面加工から 4 面加工までが必要となったため、それぞれの CAD データ、CAM データに加え、図 4、図 5 に示す加工面を変更可能な治具の製作も行った。3 面加工が必要で最も時間のかかる金輪継ぎであっても、加工時間の合計は 2 時間 40 分であり、十分実用的であると考えられる。

5. 結論

本研究を通して、京都市右京区京北地域の木材流通を起点とした、オルタナティブなサプライチェーンを提案した。これは、地域の森林資源と既存の空き家を活用した、里山と都市における持続可能で自律的な暮らしを支えるインフラとして機能する。また複数のステークホルダーへの取材やフィールドワーク、実践を通じたプロトタイピングを通して、持続的な社会に向けた、より具体的な未来を思索できたと考える。

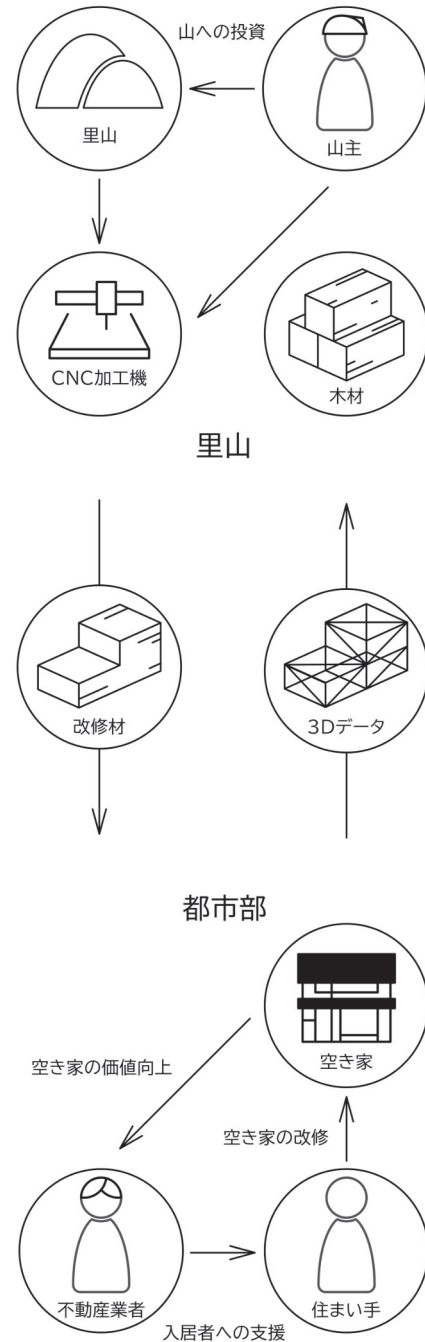


図 1. 山主・不動産業者・入居者によるスキーム



図 2. 鎌継ぎ、蟻継ぎ、目違継ぎ



図 3. 金輪継ぎ



図 4. 加工面を変更可能な治具



図 5. 治具を利用した継手加工

参考文献

1. ヴィクター・パパネック、阿部公正訳: 生きのびるためのデザイン、晶文社、p.9, pp.210-215, 1974
2. Tomas Diez: Fab City Whitepaper: locally productive, globally connected self-sufficient cities., pp.2-9, 2016, https://fab.city/assets/documents/FabCity_Whitepaper.pdf
3. 塩谷博文他: 森林列島再生論 森と建築をつなぐイノベーション「森林連結経営」、株式会社日経BP, pp.33, pp.46, 2022
4. 林野庁: 森林資源現況総括表、2017, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/3.html>
5. 林野庁: 令和3年度木材需給表、pp.2-4, 2022, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/attach/pdf/220930-2.pdf>
6. 京都市総合企画局情報化推進室統計解析担当: 平成30年住宅・土地統計調査「住宅及び世帯に関する基本集計」の概要、p.1, 2019, https://www2.city.kyoto.lg.jp/sogo/toukei/Publish/Analysis/News/111Housing_Report2018.pdf

食品残渣由来バイオマス配合樹脂による、 地域内資源循環型ものづくり検討

Study of regional resource recycling type manufacturing
using biomass compounded plastic derived from food residues

湯浅亮平¹, 荒井将来¹, 高橋昭人², 田中浩也¹

Ryohei YUASA¹, Masaki ARAI¹, Akito TAKAHASHI², Hiroya TANAKA¹

¹慶應義塾大学, ²株式会社放電精密加工研究所

¹Keio University, ²Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co.,Ltd.

【要約】

神奈川県鎌倉市において地域回収されたコーヒー粕と植物由来樹脂をコンパウンドした材料を用い、同じく鎌倉地域内に設けられた 3D プリント設備を活用して公共のベンチ製作と設置を行なった。この事例の検討段階や経過観察を通して得た地域内資源循環型ものづくりの検討における知見「適正量の資源回収スキーム構築の必要性」「公共物としての使用に耐える素材選択」「適正量の材料製作のためのコンパウンド手法」「3D プリント対応設計」などについて報告する。地域資源と 3D プリント技術を用いて、その街らしい公共のアイテムを作ることにより、資源循環だけではなく街への愛着向上にも寄与するものづくりを進めていきたい。

キーワード: 資源循環, 公共物, 食品残渣, 植物由来材料, 3D プリント,

【Abstract】

Using a compound of locally collected coffee grounds and plant-derived resin in Kamakura City, Kanagawa Prefecture, we used 3D printing equipment located in the Kamakura area to create and install public benches. We will report on the knowledge gained through the study stages and follow-up observations of this case. By using local resources and 3D printing technology to create public items that are unique to the city, we would like to promote manufacturing that not only contributes to resource recycling but also to increasing attachment to the city.

Keywords: Resource recycling, public property, food residues, plant-based materials, 3D printing

1. 序論

近年、CO2 排出抑制や資源循環の観点から、3D プリントなど小規模生産が可能な設備を用いて、使用場所に近い地域で適正量を製作するコンセプトのものづくり事例が盛んに報告されている[1]。この際、植物由来樹脂や地域内で排出される再生樹脂等の環境対応材料が素材として用いられ、環境負荷の低い製造が試みられている。しかし、廃棄物削減の観点では、放置竹林や食品残渣から回収可能な未利用バイオマス資源も地域内で排出される廃棄物中の多くの割合を占めているため[2]、樹脂に限定しない資源回収スキームの構や資源活用先開発が求められる。

2. コンセプト

本検討は、神奈川県鎌倉市を舞台に、廃棄物削減と地域資源循環スキーム構築の一環で行われたものである。地域において食品残渣など、通常は焼却処理される未利用資源の回収スキーム構築と、回収された植物性資源をフィラー材として樹脂とのコンパウンドを行い、市内の公共物を製作するための材料として活用する。

本稿での製造アイテムは地域の公共空間で使われるベンチである。ベンチのうち木製のもの、雨風等で劣

化・腐食するため、定期・不定期のメンテナンスが必要となる。この課題に対し、樹脂製の公共物を製作する。製造は、同じく地域内に設置された 3D プリント製造設備を備えるリサイクリエーション慶應鎌倉ラボにて行われる。

3. 素材選定と回収方法検討

ターゲットとする製作物によって材料に求める物性は異なる。今回は屋外に設置され長期使用する公共物の製作を目的とするため、紫外線や風雨に対する耐候性能が重視される。ベースとなる樹脂材料は耐候性の高い植物由来樹脂であるデュラビオ D5380-IUR(三菱ケミカル製)[3]を選択した。

ベース樹脂に配合する植物由来フィラーは、地域で回収検討可能な未利用資源の中から、事前加工が不要であり、回収量の細かい調整が可能な点から、コーヒー粕を選択した。

地域内資源循環システムの構築段階では、回収資源の回収量と活用量を合わせることも大切である。活用可能量以上に回収量を増やした場合、保管時における劣化や再廃棄を避ける必要がある。このため、本検討では、十分に研究コンセプトと研究の各段階における実施内容を理解し、小規模の回収から協力可能なパートナーと

して地域のカフェ1件と、企業オフィス1件と連携して取り組んだ。また、コーヒー粕は、コーヒーの淹れ方で異なる粒径によるコンパウンドへの影響を確認するため、カフェからはエスプレッソ挽きコーヒー粕(粒径:~0.2mm)、企業オフィスからはドリップ挽きコーヒー粕(粒径:~2mm)に限定して回収した。回収は1週間に一度、回収パートナーがリサイクリーション慶應鎌倉ラボに持ち込む形で行った。

また、コーヒー粕はドリップ後の状態において豊富な水分と栄養を含んでおり、回収後からコンパウンド工程に進むまでの期間において、カビの発生防止が可能な方法で保管する必要がある。回収パートナーにおいては、使用後のコーヒー粕を天日干し、冷蔵、冷凍などの方法で約一週間保管し、リサイクリーション慶應鎌倉ラボで受け取った後は、環境温度 80 度に設定した箱型乾燥機(松井製作所社製ハコカンPO)で、24H以上の乾燥後に、防湿性のあるアルミパウチに保管した。

4. フィラーの劣化温度と加工温度について

植物性フィラーとするコーヒー粕は一定温度以上に加熱するとコーヒー成分由来のガス、油分が溶出する。予備実験では 200-220°C:油分の溶出、230-250°C:揮発成分の発生が確認されている。特に揮発成分は、溶融した樹脂の内部で発生した場合、樹脂を発泡させ、表面品質の低下と、樹脂内部に空洞を作り出し、造形物の強度を低下させる要因となる。本来は、コンパウンド時、3D プリント時において、劣化温度以下の加工温度を保つことが望ましい。ただし、耐候性を持つ樹脂として選定したデュラビオ D5380-IUR は、3D プリント時の成形温度が 240°C 付近であり、コーヒー粕の劣化開始温度より高温であるため、ある程度の劣化による成分溶出は避けられないものとして、配合比率を検討した。

5. コンパウンド

コンパウンドには MF 式混合溶融機(放電精密加工株式会社製)[4]を用いた。熱源を使わないため素材の劣化を最小限に抑え、さらに最大 80%と高いフィラー配合比率で混合溶融ができることを特徴とする方式である。またバッチ式で最小 4kg からの試作が可能のため、初期の試作検討に適している。MF 式混合溶融機を用いたコンパウンド結果として、コンパウンドの段階では劣化による発泡などは見られず、エスプレッソ挽きコーヒー粕(粒



図 1, MF 式混合溶融機によって得られた混合材料

径:~0.2mm)、ドリップ挽きコーヒー粕(粒径:~2mm)どちらも、51wt%の配合比率にて樹脂とコーヒー粕の混合材料を得ることができた。

一般的な2軸押し出し方式などに比べて、ごく短時間でコンパウンド可能なため、コーヒー粕の劣化が抑えられている可能性があるが、本検討中では他工法との比較はできていない。

6. 3D プリント造形設定に合わせた配合比率検討

3D 造形には FGF 方式の 3D プリンター GEM シリーズ(エス.ラボ製)[5]を用いた。デュラビオ D5380-IUR の 3D プリント温度は 240°C 程度であるため、3D プリントノズルから吐出される混合材料中のコーヒー成分が過熱により劣化し、ガス発生、樹脂の発泡が確認された。コーヒー粕の配合量に比例してガスの発生量は変化するため、複数の配合比率で造形実験を行ったところ、コーヒー粕比率 6.25~12.5wt%の範囲にて、造形中のガス発生量を許容できる配合比率と判断した。ただし 12.5%では、稀に表面に気泡が現れるため、屋外使用をターゲットとしている本検討においては、6.25wt%配合を採用した。

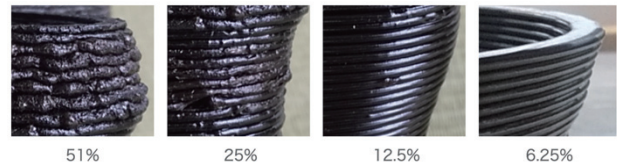


図 2, コーヒーカスの配合量によって変化する造形物の表面品質(造形温度 240°C)

7. 造形方法と 3D モデリング

3D 造形時においてもペレットをスクリー中で滞留させる時間が必要以上に長い場合、過加熱が起きコーヒー粕よりガスが発生する。過加熱を防止する方法として、ノズルから常に一定量に樹脂を吐出し続けることが可能な一筆書き造形ツールパスでのモデリングを行った。外形状はベンチ設置予定のデッキに隣接する地域の名物である「観音像」の纏う羽衣と親和性を持たせ、布が風でたなびいている形状とし、曲面は全て FGF 造形においてサポート材を生成せずとも造形可能な曲率とした。また、デッキに設置される 14 台全て異なる形状とした。内部構造は、ベンチ座面の撓み強度を向上させるためのリブと、コンクリート製の土台へ取り付けのための作業空間を設けた。

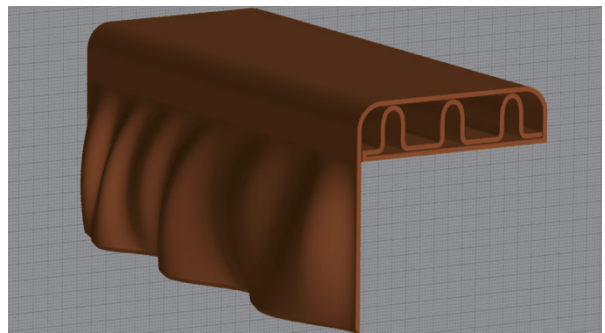


図 3, 一筆書きツールパスによる 3D 造形データ

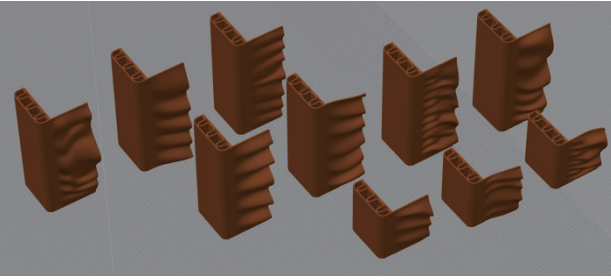
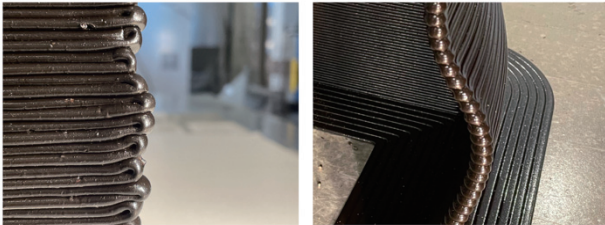


図 4, 14 台異なる形状の 3D データ群(一部)

また,3D 造形設定において,一筆書きツールパスで外周が閉じたスパイラル状以外の 3D 造形を行う場合は,ツールパスをノズルが往復する形となる。この際,高品質な造形物を得るためにはレイヤーチェンジ時の折り返し端部の材料吐出量と,ノズルの移動速度の適切な組み合わせが求められる。今回はコーヒー粕の過加熱防止のため,材料吐出量は固定とし,ノズル移動速度の詳細な設定のみによって滑らかに連続的な折り返し部の造形ができた。



左:不適切な設定時の端部 右:適切な設定時の端部

図 5, 端部の適切な押し出し設定

8. 設置と経過観察

3D 造形されたベンチ 14 台は,2023 年 5 月より,鎌倉市内の JR 大船駅前歩行者デッキに設置され,利用が始まっている。設置当日から多くの市民が座っている様子が観察され,現在も新しい街のアイテムとして,親しまれている。



図 6,公共空間に設置されたベンチ

設置から約 4 ヶ月後の 2023 年 9 月現在,ベンチ表面には全体的に白化が見られている。ベース樹脂として耐候性のあるデュラビオ D5380-IUR を選択したが,内部

のコーヒー粕フィラーが劣化しているものと推測される。

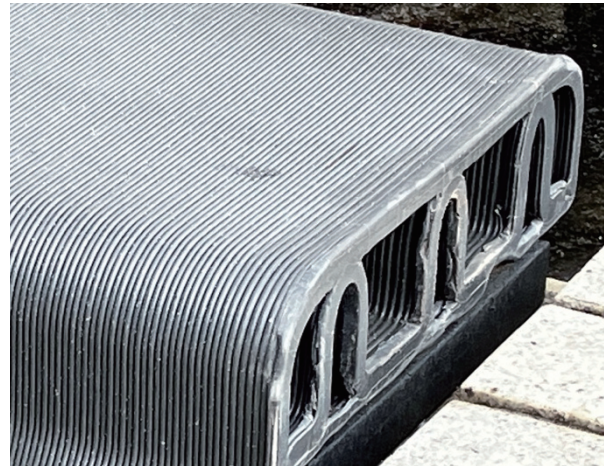


図 7, 白化したベンチ表面

フィラーの劣化による,物性の変化については今後の確認項目として継続的に観察していく必要がある。また,植物由来樹脂と植物由来フィラーを組み合わせた製品は,3D プリント造形物に限らず,今後も生まれてくることが予想される。耐候性のある樹脂によって被覆することによって,樹脂そのものだけではなく,フィラーの劣化も防ぐような配合や構成が求められるであろう。

9. まとめと今後の課題

地域内で回収された未利用資源と樹脂の混合材料を用いて 3D プリントにより公共物を製作・設置運用することができた。資源回収においては,回収資源の保管面でも,活用量に応じた回収システム構築の必要性が確認された。バイオマス資源をフィラーとした樹脂コンパウンドでは,ベースとなる樹脂ごとに異なる成形温度に合わせた配合比率の見極めが大切である。今回用いたデュラビオシリーズでも,より MFR の高いグレードを選択することで,低い温度で成形する可能性を検討すると共に,コーヒー以外の未利用資源との組み合わせも模索する。製造物のデザイン面では,3D プリントによる小規模生産で,地域の風景・特色に合わせた特徴のあるデザインを施すことが可能であることが示された一方,カスタマイズ設計のコスト低減が今後の課題である。また,このように地域資源を用いて製作された公共アイテムによって,地域に暮らす市民の幸福度向上などにつながる可能性があるか,引き続きモニタリングしていきたい。

謝辞

コーヒー粕の回収にご協力いただいた,calender 吉澤裕介氏, patagonia 松井直子氏,服部秀也氏,資源の活用先検討にご尽力いただいた鎌倉市都市整備課のみなさまに感謝申し上げます。

本研究は,JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2111 の支援を受けたものです。

参考文献

1. Print Your City (参照:2023-9-28)
<https://www.printyour.city/>
2. 鎌倉市令和元年度家庭系ごみ質(燃やすごみ)組成調査について(参照:2023.9.28)
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/gomi/documents/04soseichosa.pdf>
3. 三菱ケミカル株式会社(参照:2023-9-28)
https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/pc/product/1200363_9344.html
4. 放電精密加工株式会社(参照:2023-9-28)
https://www.jarec.or.jp/29th_jarec_symposium/pdf/hsk.pdf
5. エス.ラボ株式会社(参照:2023-9-28)
https://slab.jp/products/pellet_3dp/

熱を加えるだけで狙った立体に自動で変形する布 「Steam Stretch」の設計技術

Design technology for Steam Stretch, a fabric that automatically transforms into the desired three-dimensional shape simply by applying heat

大嶋 泰介, 須藤 海

Taisuke OHSHIMA, Kai SUTO

Nature Architects 株式会社

Nature Architects, Inc.

【要約】

Nature Architects 株式会社は A-POC ABLE ISSEY MIYAKE との共同開発により、「熱を加えるだけで狙った立体に自動で変形する布」の設計製造技術を開発し、最小限の縫製でジャケットや照明など、立体的な形状のプロダクトを生み出すことに成功しました。

本プロジェクトは ISSEY MIYAKE が持つファブリックの自己折技術「Steam Stretch」に、当社が持つ折紙のための Computational Design プラットフォーム「Crane」を適用することで実現されました。2023 年春に行われたミラノデザインウィークにてその成果の一部がプロトタイプとして展示され、現在製品化に向けて継続開発しています。「狙った立体に変形する」という機能を Computational Design を用いて「折り」のパターンという幾何学情報に埋め込み、それを縮む糸と縮まない糸を組み合わせた「織り」のパターンに変換し、ジャカード織機で製造して熱を加えて自己折するという、4DFE の要素が全て詰まったような内容となっています。

今回はこのような技術的な詳細から Nature Architects が普段行っている自動車や航空宇宙・建設業界における実務的な事例紹介まで領域横断的な講演を行います。

3D プリンター造形物の異方性解析と機械特性への影響検討

Additive Manufacturing Analysis of Anisotropic Moldings

駒場 澄香, 竹之内 崇

Sumika KOMABA, Takashi TAKENOUCI

三菱ケミカル株式会社

Mitsubishi Chemical Corporation

【要約】

本研究は、繊維などを含むことによって材料物性に異方性を有する3D プリンター成形体における積層造形解析手法に関する提案である。繊維強化材料における配向や繊維条件の物性への影響を考慮した Cox-Krenchel モデルを用いて解析的に物性値の算出を行い、併せて CAE による 3D プリンター造形物の異方性解析を実施した。その結果、異方性の有無による機械特性への影響を確認した。提案解析手法で得られたフィラー配向情報を用いて異方性を考慮した構造解析を行うことで、3D プリンター成形体のより正確な設計が期待できる。

キーワード: 3D, シミュレーション, モデリング, 異方性, 繊維

【Abstract】

This research proposes a method for analyzing the layered modeling of 3D printer parts that have anisotropic material properties due to the inclusion of fibers and other materials. We calculated the physical properties analytically using the Cox-Krenchel model, which takes into account the effects of fiber orientation and fiber conditions on the physical properties of fiber-reinforced materials, and analyzed the anisotropy of the 3D printer parts using CAE. As a result, the influence of anisotropy on mechanical properties was confirmed. By using the filler orientation information obtained by the proposed analysis method to perform structural analysis considering anisotropy, more accurate design of 3D printer parts can be expected.

Keywords: 3D, simulation, modeling, anisotropy, fiber

1. 序論

3D プリンターは、従来の方法では難しかった複雑な形状も金型なしで作成できるため、製造業など様々な分野で試作模型や玩具等に広く利用され、開発期間の短期化や製造コストの低価格化に貢献している。しかし、最も一般に利用される熱可塑性樹脂での積層造形では、樹脂自体の熱的、化学的、機械的安定性が低いため、航空宇宙・自動車用構造部材など特に強度が求められる部材には向かないという欠点がある[1]。そのため、近年では短繊維炭素繊維(以下短繊維 CF)や連続炭素繊維などを含む繊維複合材料を用いた造形が広まってきている。

しかし、積層造形における造形方向の異方性に加えて、繊維の配向によって物性の異方性が生じ、機械特性に影響するため、特に異方性の影響を考慮した設計が重要である。

本研究では、繊維複合材の物性パラメータを、サンプル測定および Cox-Krenchel モデルによる解析的な算出によって取得し、汎用ソフトウェア 3D TIMON-AMSolution で積層造形解析を実施した。

2. 実験

2-1 繊維配向の確認

まず、3D プリンター造形によって生じる繊維の配向

を確認するため、X 線 CT 測定を実施した。測定サンプルは、ポリカーボネート(以下 PC)と CF(径約 7 μ m:コンパウンドペレットの断面観察からの実測)のコンパウンドペレットから、3D プリンターにて吐出・成形して作製した。測定結果を図1に示す。白い筋が短繊維 CF であり、サンプルの位置に関わらず、多くが MD 方向に配向している様子が見られる。このことから、3D プリンターによって繊維配向が生じることを確認した。

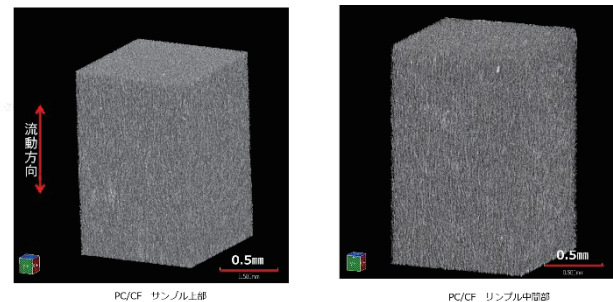


図1 X線 CT 画像

2-2 曲げ弾性率の評価

次に、繊維配向による機械特性への影響を確認するため、曲げ弾性率の違いを評価した。先ほどと同様に PC/短繊維 CF 系で造形し、MD 方向、TD 方向でそれぞれ、プラスチックの曲げ試験規格 JIS K7171 に準拠した試験片寸法 80×10×h4 mm の試験片を作成した。

評価結果を表 1 に示す。MD 方向と TD 方向で曲げ弾性率に違いが出ており、繊維配向が機械特性に影響することを確認した。

表 1 PC/CF サンプルの曲げ弾性率

	TD(Pa)	MD(Pa)
20°C	1.74E+09	1.67E+09
120°C	1.93E+09	1.19E+09

4. 数値解析

4-1 物性パラメータの算出

数値解析を行うにあたり、物性パラメータの算出を行った。等方性材料(異方性のない材料)では、剛性率 G (横弾性係数)は、ヤング率 E (縦弾性係数)およびポアソン比 γ との間に次の関係が成り立つ[2]。

$$G = \frac{E}{2(1 + \gamma)} \quad \text{式(1)}$$

しかし、異方性材料では式 1 が成り立たないため、剛性率とヤング率のそれぞれ設定が必要となる。また、短繊維 CF は MD 方向に配向する傾向があるものの、完全な一軸配向ではないため、配向に合わせた剛性率を算出しなくてはならない。そこで、複合材の弾性率と強度の複合測に従う Cox-Krenchel モデルを用いて算出した[3]。このモデルは繊維配向や繊維長の影響を与えた以下の式で表される。

$$E_c = \eta_0 \eta_l V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad \text{式(2)}$$

$$\eta_l = \left[1 - \frac{\tanh(\beta L/2)}{\beta L/2} \right],$$

$$\beta = \frac{2}{D} \left[\frac{2G_m}{E_f \ln(\sqrt{r/R})} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\ln(\sqrt{r/R}) = \ln(\sqrt{\pi/X_i V_f}) \quad \text{式(3)}$$

ここで、 E_c は複合材の弾性率、 V_f は繊維の体積含有率、 E_f は繊維の弾性率、 E_m はマトリックス樹脂の引張弾性率、 G_m は剛性率である。また、 η_l は補正係数であり、 L は繊維長、 D は繊維直径、 r は繊維半径、 R は平均繊維間距離である。そして、 η_0 は配向係数であり、一軸配向で 1、2D ランダム配向で 3/8、3D ランダム配向で 1/5 をとる。

この 2 式を用いることで、複合材の配向係数を計算で予測した。また、繊維配向を疑似的に再現する均質化法モデルを作成し、汎用ソフトウェアである Ansys 19.0 にてヤング率や剛性率などの物性パラメータを導出した。

4-2 造形後の反り量に関する解析

算出した物性パラメータを用いて、等方性条件と異方性条件における反り量の違いを数値解析した。その結果、異方性の有無による機械特性への影響を確認した。

5. 結論

繊維複合材料の積層造形では、特に繊維配向による異方性を考慮した設計が必要とされている。そこで実際に、造形時の繊維配向と機械特性への影響を評価し、異方性解析の必要性を確認した。また、繊維配向を考慮した物性パラメータの算出方法を提案した。この方法で求めたパラメータで数値解析することで、より正確に繊維複合材の機械特性を評価できると考えている。

参考文献

1. Tekinalp, H.L., Kunc, V., Velez-Garcia, G.M., Duty, C.E., Love, L.J., Naskar, A.K., Blue, C.A., Ozcan, S. "Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing", (2014), pp 144-150.
2. Lekhnitskii, S.G., Tsai, S. W. and Cheron T. "Anisotropic Plates.", (1968), pp. 157-212.
3. Thomason, J. L. and Vlugg, M. A., "Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus", (1996), pp. 477-484.

食感思考型 3D フードデザイン-咀嚼ロボは音をどう調理するか

"Texture-Thought-Based 3D Food Design - How Does the Chewing Robot cook Sound?"

鈴木 悠人¹, 小川 純², 渡邊 洋輔²,
 エムディナヒン イスラム シブリ², 古川 英光²

Yuto SUZUKI¹, Jun OGAWA², Yosuke WATANABE²,
 MD Nahin Islam SHIBLEE², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部

²山形大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

Implantable Gel Biter は、人間の口腔構造を模倣した圧電センシング装置であり、食べ物を咀嚼させることで波形を取得することが可能である。食感情報を波形として学習することで、咀嚼した食べ物の種類を識別することができる。3D フードプリンターは3DCAD でモデリングしたデータを基に食材を層状に造型するため、複雑な形状やデザインの食べ物を造型できる。本研究では、3D フードプリンターを用いて、さまざまな幾何学形状のクッキーを造型し、Implantable Gel Biter で 3D フードを咀嚼させて、学習モデルを構築する。食感情報とは無関係の音声データの波形をこの学習器に入力する。これにより音の波形から推測された形状のクッキーを造型することを目指す。

キーワード: 3D フードプリンター, モデリング, ソフトロボット, センシング, 機械学習

【Abstract】

Implantable Gel Biter is a piezoelectric sensing device that mimics the oral structure of humans, allowing it to capture waveforms by inducing the chewing of food. By learning texture information in the form of waveforms, it can identify the types of chewed food. On the other hand, a 3D food printer, based on data modeled in 3D CAD, layers food materials to create intricate shapes and designs. In this study, Implantable Gel Biter will then chew the 3D-printed food to construct a learning model by utilizing a 3D food printer to model cookies with various geometric shapes. Additionally, unrelated audio data waveforms, devoid of texture information, will be input into this learning system. The goal is to use these waveforms to model cookies with shapes inferred from the audio data, thereby exploring the creation of edible shapes based on sound information.

Keywords: 3D Food Printer, modeling, Soft robot, Sensing, machine learning

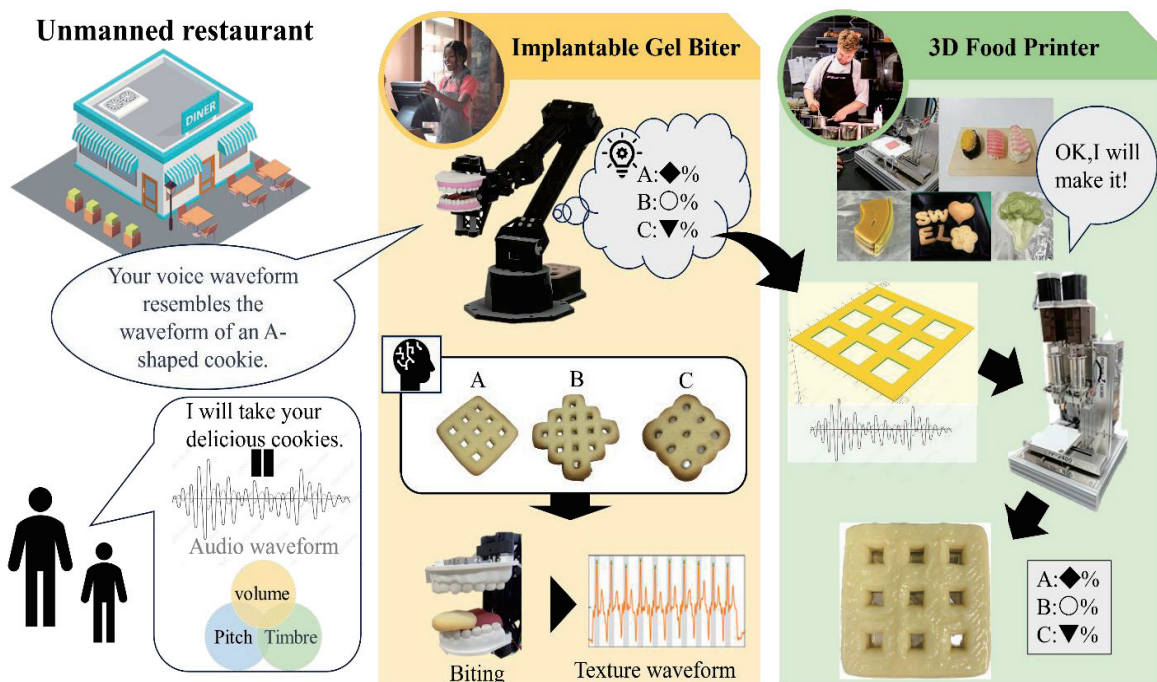


図 1 食感思考型 3D フードデザインの概念図

1. 序論

レストランの経営においてサービスの質や効率性は常に中心的な関心事となっている。最近ではロボットの導入により、料理の調理から配膳まで自動化され、レストランの業務形態に画期的な変革をもたらし、新たな飲食店のサービスの変容を目の当たりにする機会が多い[1]。そこで我々はロボットが本来与えられた機能をただ実行するだけに留めず、ロボットなりに状況を解釈し、新しい価値を生み出すことはできないのか？という疑問を提示する。その疑問に対し、本研究は咀嚼ロボ[2]に着目し、食品のテクスチャを分析する主機能とは別に、分析機能を食本の調理方法を考えるための解釈の手段(追機能)として成り立たせるアプローチを提案する。このような概念を創るためにはどうすればよいだろうか？我々は食べ物の食感を学習する口腔模倣型圧電咀嚼装置である Implantable Gel Biter[3]が有する圧電センサーによる咀嚼の信号と環境音の波形との間にある、両者とも高分解能の時系列離散データであるという類似性に着目する。図1にこの類似性に着目した提案システムの概念を示す。このシステムでは、お客さんが注文した声の波形を咀嚼装置が「音を咀嚼に当てはめて」解釈し、自らの解釈に合わせた形状の食品を提供する。そして調理は食品を造型できる3Dフードプリンターを用いることで、単なる機械を繋げるだけでなく、機械自身の造像的思考が介在した、いわばその機械だからこそ創り出せる食提供の新たな概念を打ち立てることを目指す。

2. 口腔模倣型圧電センシング装置

「Implantable Gel Biter」

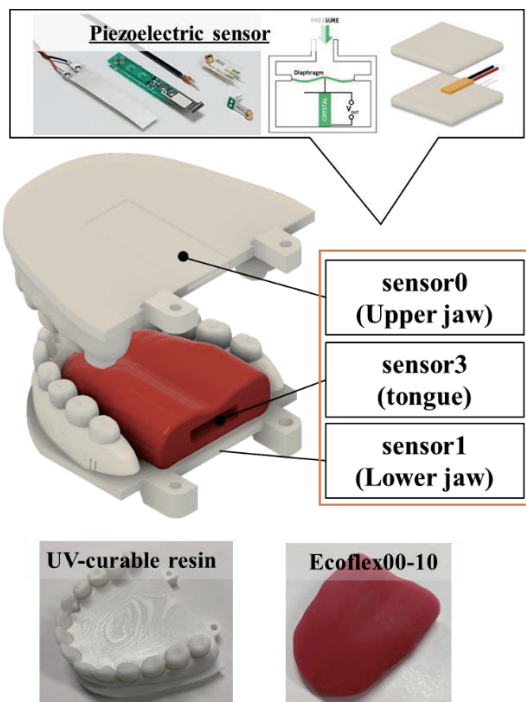


図2 圧電センサの媒体としての口腔模型

2.1 口腔構造の模倣

食品を定量的に評価する手法としてはクリープメータによる測定が挙げられるが実際の口腔状況と異なることやプランジャー形状や圧縮速度が測定結果に影響を与えてしまう[4]。しかし、Implantable Gel Biterでは人間の口腔状況に近似した状況で測定することが可能なことから、得られるデータも人間が感じる食感に近いものであると考える。口腔模型の設計では人間の口腔をできるだけ正確に再現するため部位ごとに適正な材料を選定した。具体的には、歯部にはUV硬化性樹脂(Formlabs社製)を使用している。UV硬化性樹脂は高い硬度と耐久性を有していることから人間の歯の特性を適切に模倣するのに適した材料である。舌部にはEcoflex00-10™(Smooth-On社製)が使用され、舌のような柔らかさを模倣するのに適した材料である。また、この口腔模型は歯を一本一本取り外すことのできるインプラント式であるため、歯の抜け具合やグラつき具合など異なる口腔状況に応じた測定が可能である。

2.2 センシング方式

Implantable Gel Biterの主な機能の一つは、上顎、舌、下顎に取り付けられた圧電センサによるセンシングである。圧電センサは圧電効果により、物理的な力や振動を電気信号に変換し、検知するセンサである。センシングのプロセスは以下のように行われる。まず、口腔模型にクッキーを噛ませることで、歯の表面や舌などの接触した部分から発生する振動が骨伝導のような形で口全体に伝わる。圧電フィルムセンサがこの振動を感知し、振動を電圧の波形に変換する。受信されたデータは、ノイズ除去を施して処理される。具体的には、線形傾向の除去と高速フーリエ変換を用いたローパスフィルタ(カットオフ周波数:300 Hz)が適用され、ノイズが除去される。このノイズ除去のプロセスは、ヒステリシスを軽減し、後のデータ解析の精度を向上させる。その後、ノイズ除去された波形データから、最も特徴的な部分であるピーク部を中心として前後100データ分が抽出される。この抽出プロセスは、データの解釈を簡素化するために重要である。そして、抽出されたピーク部分から、特徴量生成が行われる。特徴量生成は、時系列データから多次元の特徴量を自動生成するためのライブラリであるtsfleshを用いて行われる。このプロセスを経て、最終的に取得されるデータが機械学習の対象となる。取得された特徴量とそれに対応するラベルは、訓練データとテストデータ(比率は80%:20%)に分割され、機械学習モデルに渡される。ここで、機械学習モデルは学習データを用いて特徴量とラベルの関連性を学習し、その結果を基にテストデータを用いてその性能を評価する。このようにして、特徴量とラベルの間の関係性から新たなデータに対する予測性能を向上させることが可能となる。分類学習のアルゴリズムとしてはロジスティック回帰が採用されている。これにより、得られた特徴量を基に、それがどのラベルに対応するかを高い精度で予測することが可能となる。

3.スクリー方式 3D Food Printer (3DFP)

クッキーの造型にはスクリー方式の3Dフードプリンター装置(FP-2500:世紀(株))を用いた。図3に3DFPの模式図を示す。本装置は押出機モーター,原料供給ホッパー,スクリー,ノズル,造型テーブルから構成されており,造型最大サイズは90×90×60mm,ノズル内径は1.2mmである。造型には,スライサーソフトとして Simplyfy,制御ソフトとして Pronterface を使用した。

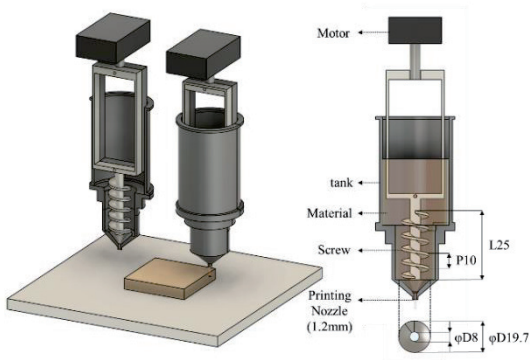


図3 FP-2500 模式図

4.実験及び結果

4.1 クッキー生地 の作成・造形・識別

クッキーの材料は「めっちゃラククッキーミックス」(ニッポン株式会社) 100 g,水 30 g を混合し,作製した。3DFPで形状の異なる3種の造形データ A,B,C を Openscad によって作成し,クッキーを造形した。造型条件を表1に造形結果を図4に示す。Implantable Gel Biter の測定では咀嚼動作を10回行い,3種類のクッキーをそれぞれ2セット実施する。得られたデータから学習モデルを構築するまた,学習性能を図るための識別精度のヒートマップを図5に示す。平行軸はロジスティクス回帰による予測ラベル,垂直軸は実際のラベルを示している。3種クッキーの平均識別精度は 94.4%であり,高い識別精度が得られた。

表1 3DFP によるクッキーの造形条件

Parameter	Condition
Layer height [mm]	0.6
Print speed [mm/min]	1000
Modeling Time [min]	15

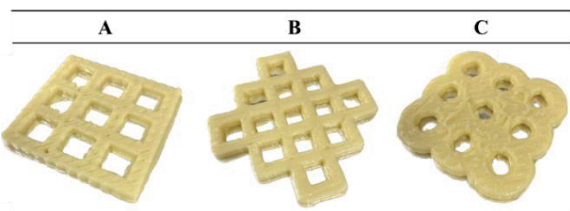


図4 学習させるクッキーの形状

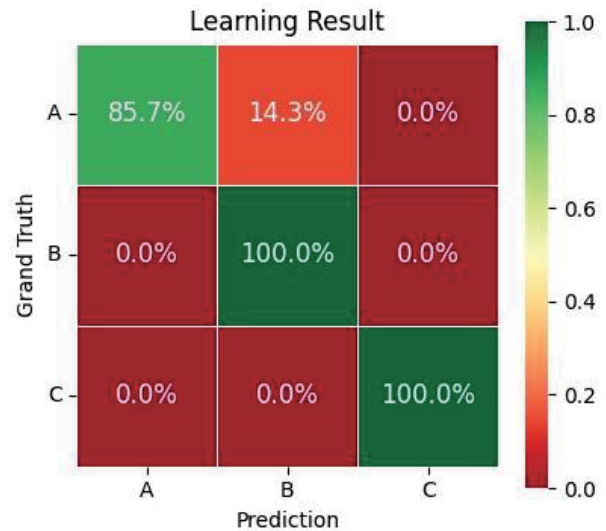


図5 3種クッキー(A,B,C)の識別結果

4.2 音声データから調理

4.2.1 音声データの推定

音とは振動や圧力の変化が空気,水,個体などの媒体を通じて感知される現象のことであり,音の大きさ,音程,音色の大きく三つの要素からなっており,その違いを識別することによって音を認識することができる。ここでは,4.1 節で構築した学習モデルに a, b, c の3種類のBGMの波形を入力し,入力した音の波形がどのクッキーに対応するか推定する。使用した音声データ a, b, c の特徴はそれぞれ(ポップで軽快なスウィングジャズ),(ミドルテンポで落ち着いた雰囲気),(軽やかで可愛い雰囲気)のBGMである。推定結果を図6に示す。



図6 音声データ(a,b,c)の推定結果

4.2.2 新規デザインの構築

図6の推定結果から Openscad を用いて,指定した割合で形状の合成を行い,作成したデータから 3D フードプリンターを用いてクッキーの造形を行う。図7に推定結果に基づいた合形状の3Dデータと造型後の結果を示す。また,造形後のクッキー(a,b,c)を Implantable Gel Biter で測定を行い,音声データを推定させた結果と類似するか検証を行う。図8にクッキー(a,b,c)を推定させた結果を示す。

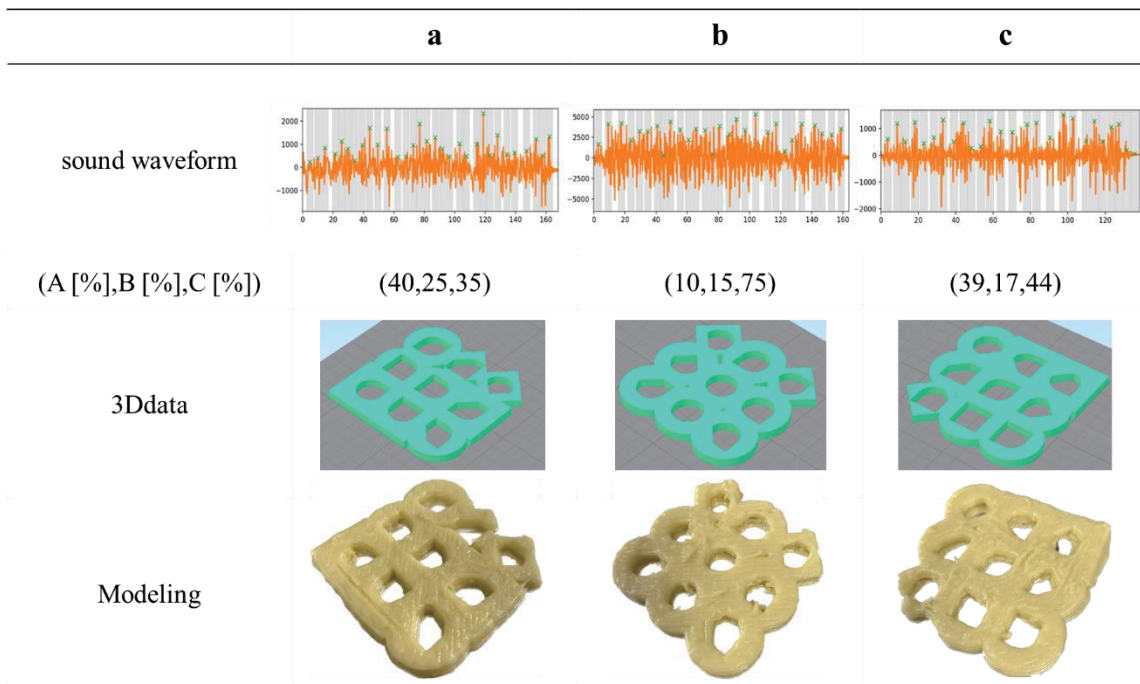


図 7 音声データ(a,b,c)からデザインされたクッキー

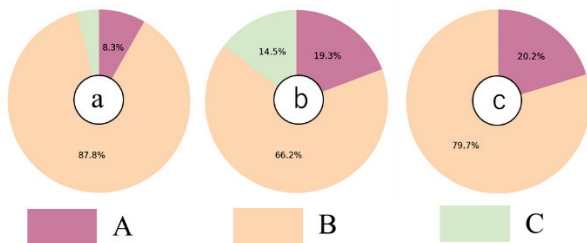


図 8 クッキー(a,b,c)の推定結果

5.考察

図 6,図 8 の結果より,音声データを推定させた結果と音声データから作られたクッキーを推定させた結果では大きな違いが見られることが示されている。これは,音声データが Implantable Gel Biter にとって本来求めているデータではないため音と食感の間にある明確な違いが出てしまったと考える。

図 6 の推定結果からは a と c は比較的似ているが b だけ明らかに違っている。図 7 の音の波形より,a と c は振幅が-2000 から 2000 の間であり,比較的近い波形を示している。b は-5000 から 5000 の間であり, a, c に比べ明らかに異なる波形である。よって,振幅と Implantable Gel Biter の推定結果には相関があることが確認され,振幅が大きいほど C の形状であると解釈する可能性が高い。

従って,音データは Implantable Gel Biter にとって異物なデータではあるが,与える音の波形によって推定結果が変わることや振幅との相関関係が見られることから食感思考に基づいて解釈することが可能であると示唆される。

5.結言

本研究で我々は,食感思考に基づいて音をデザインし,調理するシステムを構築した。これにより,新しい食体験の提供が可能となるだろう。今後は 3DFP との連携を深め自律的な食品ロボットシステムの構築を目指す。

謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP21H04936, JP22K17972, 管理法人 NEDO の委託業務 (JPNP14004 と JPNP20004) によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Kyung Hwa Seo, Jee Hye Lee., “The Emergence of Service Robots at Restaurants: Integrating Trust, Perceived Risk, and Satisfaction”
2. Weiliang, Xu., Bronlund, J., Potgieter, J., Foster, K., Rohrle, O., Pullan, A., Kieser, J.” Review of the human masticatory system and masticatory robotics.” International Journal of Energy Research, vol.55, no.2, 2008
3. Hirose, K., Sudo, I., Ogawa, J., Watanabe, Shiblee, MD. N. I., Khosla, A., Kawakami, M., Furukawa, H. “Gel Biter: Food Texture Discriminator based on Physical Reservoir Computing with Multiple Soft Materials. “AROB Journal, vol.27, no.4, 2022
4. Michiwaki, Y., Kinumatsu, Y., Yokoyama, M., Michi, K., Sumi, Y., Ogoshi, H., Takahashi, T. “Difference of conditions of measuring food texture from masticatory movement.” The Japanese Journal of Dysphagia Rehabilitation, vol.5, no.1, pp.20-24, 2001

DfAM を考慮した授業および研究事例報告

Report on Case Studies of Teaching and Research at DfAM

松本 宏行¹, 本多 洸世², CAO WENBO²

Hiroyuki MATSUMOTO¹, Kousei HONDA², CAO WENBO²

¹ものづくり大学, ²ものづくり大学大学院

¹Institute of technologists., ²Graduate School of Institute of technologists

【要約】

本報告は、DfAM(付加製造のための設計)を考慮した授業および研究の事例について報告を行うものである。トポロジー最適化に関連して軽量化および剛性向上を考慮した設計を行い、3D プリンターで造形を行う。授業や研究事例で得られた知見についてとりまとめて報告を行う。

キーワード: 3DCAD, DfAM, CAE

【Abstract】

This paper reports on a case study of teaching and research considering DfAM (Design for Additive Manufacturing). Design for Weight Reduction and Stiffness Improvement in relation to Topology Optimization is performed, and the design is fabricated by a 3D printer. The findings from the class and the research case study will be summarized and reported.

Keywords: 3DCAD, DfAM, CAE

1. 序論

DfAM(付加製造のための設計)を考慮した事例報告を行う。具体的な手法として、トポロジー最適化およびジェネレーティブデザインを用いている。剛性向上および軽量化を含めて設計要件としている。まず、授業事例として、学部授業および大学院授業において、トポロジー最適化とジェネレーティブデザインに関する解説と演習を行い、成果物については 3D プリンターを用いて成果物の造形を行っている。次に、研究製作事例として、感染防止対策の自助具を製作した。多くの方々が手に触れる「ドアノブ」を対象物とし、ドアノブの自助具について設計製作を行った。また、外骨格型の身体支持具として着座時の補助を目的とした設計製作も行った。ユーザの自重を荷重条件として、設計製作を行った。さらに、工場で利用する工具に着目し、工具の作業性能を改善するために軽量化および剛性向上をねらいとした設計製作事例について報告を行う。また、ジェネレーティブデザインでは、素材および加工方法を設計要件に含めて多数の設計解を生成しているが、設計解の中から合理的に設計解を抽出する方法論についても検討している。授業や研究事例で得られた知見についてとりまとめて報告を行う。

2. ものづくり大学における3D 教育概要

著者らが所属しているものづくり大学は2001年に開学した埼玉県行田市にキャンパスを有する4年制の私立大学である。技能工芸学部(情報メカトロニクス学科、建設学科の2学科)および大学院(ものづく

り学専攻)で構成される工科系大学である。

「技能のわかる技術者」を育成し、「テクノロジスト」教育を主眼とした実践的教育を展開している。

また、3DCAD教育については、「デジタルファブリケーションおよび実習」、3DCADの教育を導入しSolidWorks, Creo Parametric, Fusion360, CATIA, 3DEXPERIENCEなど複数の3DCADソフトウェアを用いた演習授業を実施している。さらに、有限要素法(FEM)を用いたCAEの演習、NC加工操作を想定したCAM演習などデジタルを活用したものづくり演習を多く盛り込んでいる。

3. 授業事例

3.1 学部授業

学科では、2021年度よりBYODを導入し、いつでもどこでもノートPCを用いて自学自習できるように教材配布を行うなど環境を整えている。

1年次「デジタルファブリケーションおよび実習」では、

3DCAD初心者の1年生にFusion360を用いた基本操作、自動モデリング、フォームモデリングなどの形状モデリングの演習を行っている。ので比較的学生の修得度は早いようである。さらに、3Dスキャナーを用いた計測体験および3Dプリンターを用いてグループごとに造形体験、さらにレーザ加工機を用いてアクセサリ製作などを体験させている。

本報告では、DfAMを中心とした教育事例を中心としているが、ものづくり教育の基礎としてドラ

フターを用いた手書き製図, 2DCAD, 3DCAD は全員に, そして専攻のコースでは, DTPD (デジタル製品技術文書情報) を考慮した幾何公差, 公差解析, コスト計算なども含めてカリキュラムを構成している. さらに, 「CAD設計製図」でユニバーサルデザインを考慮した新規製品開発, プレゼンテーションを行い, 「ものづくりCAE応用」ではトポロジー最適化の演習を行うことでAM (付加製造) を考慮した設計の重要性を学生に理解してもらうとともに, 基本操作を身につけさせている.

3.2 大学院授業

大学院「デジタルファブ리케이션特論」では両学科の教員が分担して, 製造系, 建設系のデザイン教育を講義解説し, 「ものづくりデザイン」では, ジェネレーティブデザインなどを講義解説し, 各自で実際に対象物をモデリングして3Dプリンターで造形した.

図1および図2はスマートフォンを腰に取り付けるホルスター (院生: 田中氏製作) の3DCAD, 造形物である.

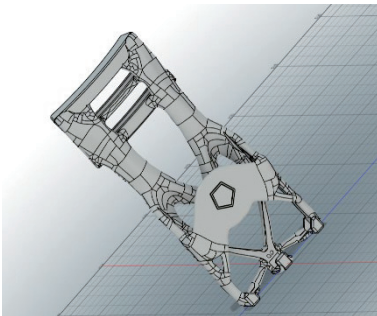


図1 3DCAD データ



図2 造形物

1年次から大学院授業において3DCAD, 3DCAE, CAM, AMなどを連携しながらDfAMについての教育を実践的に行っている.

4. 研究事例

松本研究室におけるDfAMに関連する研究事例の紹介を行う.

4.1 感染防止のための自助具

新型コロナウイルス感染者数が増大している頃, 手指を通じた接触による感染が問題であった. 対象物を「ドアノブ」として, 手指からの感染防止のための自助具の設計製作を行った[1]. 図3に自助具の造形物を示す.



図3 手指感染防止のための自助具

実際にドアノブに装着して操作している様子を

図4に示す.



図4 ドアノブに装着し操作している様子

4.2 外骨格構造を有した身体支持具

外骨格構造を有した自助具[2]の例を紹介する. ユーザの自重を考慮して, 軽量化および剛性向上を規範とした形状についてジェネレーティブデザインを用いて設計を行っている.

図5がFusion360を用いて設計を行った例である.



図5 外骨格構造を有する身体支持具

さらに, 3Dプリンターを用いて造形を行い実際に使用した例を図6に示す.



図6 身体支持具の装着している様子

図7のように腰に装着して利用する.



図7 身体支持具の取り付け

4.3 主観を考慮した設計解の検討

トポロジー最適化は、軽量化および剛性向上を考慮して設計解を探索していく手法である。

主観を考慮して設計解を選定していく研究も AM に取り入れている。例として、ペットボトルのふたをあけるペットボトルオープナー[3]の事例を紹介する。事前に粘土を利用しておおよその形状を造形しておきサイズの検討を行う。実際に手にとってそれらのサイズ感を獲得するには、プロトタイプ手法として有効である。つぎに、それらの設計候補から3Dプリンターを用いて造形を行い、ユーザ評価を行った。複数の設計解から選定する手法として、AHP(階層分析法)を用いている。

評価基準を「見た目」、「使いやすさ」、「安全性」、「分かりやすさ」の4つに設定して望ましい設計解を検討し、最終的に図9に示す設計解が決定した。



図8 ペットボトルオープナーの設計候補



図9 最終的な設計解(ペットボトルオープナー)

4.4 工具における設計

著者の一人(本多)が、改善提案などのテーマとして卒業研究時において工場の現地調査を行い、ボルト締結操作などの工具における操作の効率的な利用について調査をまとめた。そのときの体験をもとにして、新しい工具の検討を行っている。通常のレンチにこだわらず、対象物であるボルトを締結するための道具についてトポロジー最適化、ジェネレーティブデザインなどの手法を利用してどのような工具が有効であるか設計を行った。

軽量化、剛性向上、加工方法などの多くの組み合わせから望ましい設計解の選定を行った。図10は締結工具の設計解[4]である。

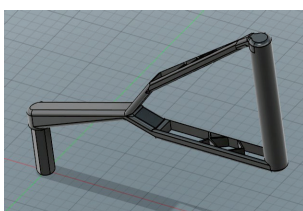


図10 ジェネレーティブデザインによる締結工具

現在は、工具を用いて締結操作についてモーションキャプチャを用いて測定を行い、望ましい設計解の選定検討を行っている。

4.5 搬送装置における設計

著者の一人(CAO)が、卒業研究において取り組んだ事例[5]を紹介する。

搬送装置に着目し、オムニホイールを用いた駆動機構および荷重支持部についてはジェネレーティブデザインを用いて設計したものである。

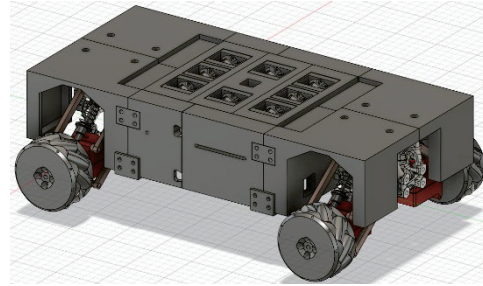


図11 搬送装置

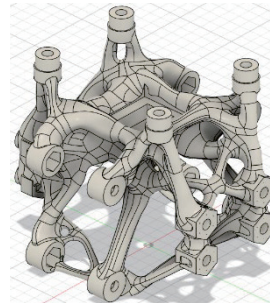


図12 荷重支持部

5. まとめ

DfAM を対象として、授業および研究の事例を紹介した。引き続き、授業改善、研究への展開に努めたい。皆様におかれましては、今回の報告が参考になれば幸いである。

参考文献

1. 黒須祐哉,松本宏行,手指からの感染防止をねらいとした自助具の設計製作,ものづくり大学紀要,第10号,2021,pp.25-28.
2. 勝田瑛也,松本宏行,外骨格構造を有する身体支持具におけるジェネレーティブデザインの検討 日本設計工学会・春季研究発表講演会,2021.
3. 長田 竜治,松本 宏行, ペットボトルオープナーの設計開発,日本機械学会卒業生研究発表講演会,2023.
4. 本多 洗世, 松本 宏行, ジェネレーティブデザインを用いた工具の設計, 2022 実践教育研究発表会(埼玉大会),2022.
5. CAO WENBO,3D プリンターを活用した搬送装置の模型製作,ものづくり大学卒業研究論文,2023.

G-coordinator : G-code 生成の新たな手法とその可能性

G-coordinator: A new way to generate G-code

谷口 朝洋

Tomohiro TANIGUCHI

大阪府立大学

Osaka Prefecture University

【要約】

本研究は、3D プリンタを用いて造形を行う際に、機械に読み込ませるプログラムである G-code の新たな生成方法に関するものである。Python と数学的な関数を用いて G-code そのものを直接作成し、3 次元形状を構築することできる G-coordinator (<https://github.com/tomohiron907/G-coordinator>) というオープンソースソフトウェアを開発した。従来の「スライス」とは異なる手法によるパス生成により、より精密な印刷条件の調整が可能になるとともに、いままでは難しかった形状や、数理的な形状の容易な実現が期待できる。

キーワード: 3D プリンタ, G-code, ソフトウェア, モデリング

【Abstract】

This study focuses on the development of a novel method for generating G-code, the program read by a 3D printer. We have developed an open-source software called G-coordinator, which utilizes Python and mathematical functions to create G-code directly and construct three-dimensional shapes. This alternative path generation technique, which is distinct from traditional slicing methods, offers the potential to tackle complex shapes that were previously challenging to produce and enables the formation of more precise printing conditions and paths. It also facilitates the straightforward realization of mathematical shapes.

Keywords: 3D printer, G-code, software, modeling

1. 序論

一般的な G-code 生成は、CAD(Computer-Aided-Design)を用いて 3D データを作成し、それを stl データとして保存、その後、別のスライスソフトで stl データをスライスすることにより、G-code データを生成する。この場合、ノズルパス(経路)の生成はすべて機械任せとなり、パスの調整、編集は困難であった。

G-code はその大部分が、ノズルの移動していく 3 次元の座標列である。G-coordinator は、大量の座標列をユーザが認識、編集しやすいよう、その枠組みを提供する。それにより、複雑なパスのモデリングと、その精密な調整の両立を実現している。

CAD を介さずに G-code を生成するソフトウェアとして、Rhinoceros¹ のプラグイン Grasshopper² や、Excel 上で動作する FullControl GCode Designer³ などがある。これら

のソフトウェアに比べ、G-coordinator が持つ代表的な訴求点として、以下のものが挙げられる。

- オープンソース(MIT ライセンス)
- Python を使用して造形を行うため、様々なライブラリを活用でき、拡張性が高い。
- 多軸(5 軸, 6 軸)の 3D プリンタにも対応している。
- パスに対して、個別に印刷設定を調整可能
- インフィルや、stl のスライスなど、従来のスライスソフトの持つ機能も完備

2. G-coordinator の概要

G-coordinator は現在、Mac, Windows に対応している。以下の URL から、最新版実行ファイル(.app, .exe)の圧縮ファイル(.dmg, .zip)をダウンロードできる。(<https://github.com/tomohiron907/G-coordinator/releases>)

Python の実行環境があれば、src/main.py を実行して起動することができる。その際には、requirements.txt にまとめられたライブラリのインストールが必要である。

G-coordinator でのモデリングのスクリーンショットを図 1 に示す。G-coordinator の作業画面は大きく3つに分けられる。左から順に、エディタ、グラフィックスビュー、パラメータツリーの三つである。エディタで編集した python ファイルは、左上の実行ボタンを押すと、計算結果が 3 次元のパスとしてビューに描画される。形状を確認したのち、温度や速度などの印刷条件を調整し、右下のボタンを押すと、G-code が出力される。なお、ハードウェアのキネマティクスや、サイズ、スタート G-code などの設定に関しては、Machine settings から行う。より詳細な個別の印刷設定は、エディタから条件を指定すれば、グローバルな設定をオーバーライドできる。

3. G-coordinator におけるモデリング

G-coordinator におけるモデリングの方法を以下の円柱壁の例を用いて簡単に述べる。なお、円柱造形のサンプルコードを補足資料に掲載している。いかに複雑な形状であっても、基本的な造形のプロセスは同じである。3D プリンタのノズルから樹脂が吐出してできる一連の曲線(図 1 における白い円)を Path と呼ぶ。G-coordinator

では、このパスの x 座標列、 y 座標列、 z 座標列を計算して、Path オブジェクトを作成する。

```
for height in range(LAYER):
```

指定のレイヤー数だけループし、

```
arg = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
```

0 から 2π までの項数 100 の角度についての等差数列を作成し、

```
x = 10 * np.cos(arg)
```

```
y = 10 * np.sin(arg)
```

```
z = np.full_like(arg, (height+1) * 0.2)
```

その角度の \cos , \sin がそれぞれ x , y 座標列になる。 z 座標列に関しては、 \arg と同じ項数で、値がレイヤーごとに 0.2 (レイヤー厚さ) 大きくなる数列を用意すればいい。

```
wall = Path(x, y, z)
```

```
full_object.append(wall)
```

その後、 x , y , z 座標列を引数として、Path オブジェクトのインスタンスを生成する。生成したオブジェクトを full_object というリストに追加する。

object_modeling() という関数の戻り値として、Path オブジェクトが要素であるリストが返されれば、G-coordinator は形状を認識し、計算可能である。

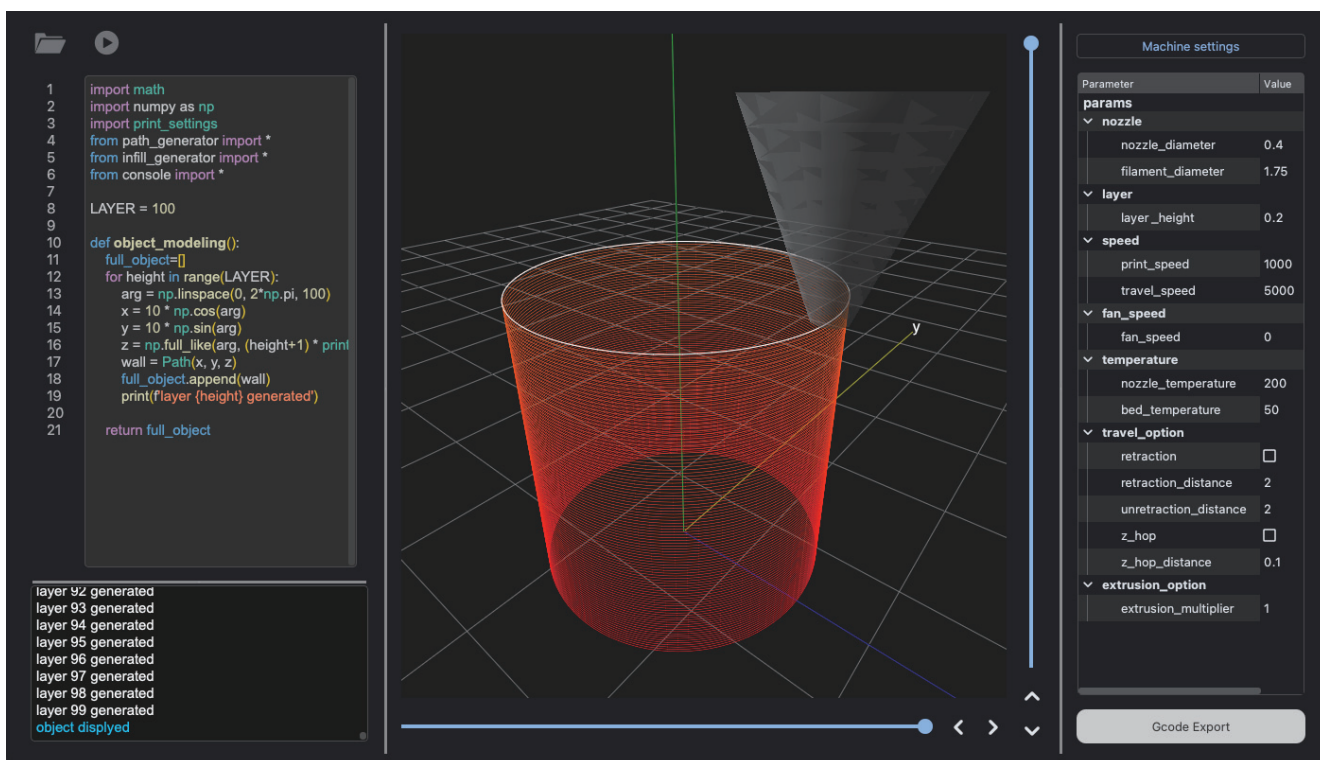


図 1 G-coordinator の操作画面

4. テストケース

以下に、G-coordinator を用いて、G-code を作成し、3D プリントしたテストケースを示す。いずれも、従来の CAD とスライス的手法では実現困難であった形状である。Github リポジトリの img フォルダにはその他の作例写真、example にはサンプルコードを 30 点近く公開している。
(<https://github.com/tomohiron907/G-coordinator/tree/main/example>)

- 網目テクスチャ

ノズルをジグザグに蛇行させ、一層ごとに位相を反転させることで、積層痕を意匠化させる技術。スライスソフトでは、直接ノズルパスを指定できないため、テクスチャを付与することが困難であった。

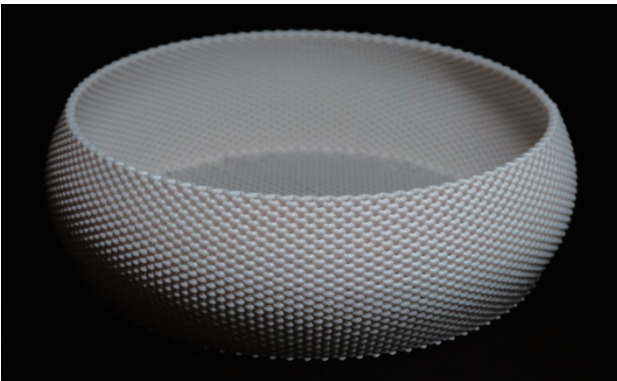


図 2 編み目テクスチャを持つトレー

- コッホ雪片

フラクタル形状を立体に押し出したもの。G-coordinator ではコードと関数を用いてモデリングを行うため、数理的な形状の実現が極めて容易にできる。他にも、一葉双曲面や、リサーチ曲線を造形するためのコードも公開している。



図 3 コッホ雪片の壺

- 振動による図柄表示

Python の持つ豊富なライブラリを用いれば、あらゆるものをモデリングのために活用できる。以下は、OpenCV⁴ のライブラリを用いて、モノクロ写真から、ある座標でのピクセルの濃さを抽出、その値を振動の振幅に重みとしてかけている。白のプレートを印刷後、黒の樹脂で振動パターンを印刷している。その結果、ミクロでは不規則な振動が、マクロでは写真に見える状況を実現している。



図 4 3D プリンタによる写真表現

- 多軸プリンタ

6 軸の 3D プリンタに対応した G-code も生成可能である。層を重ねるごとにノズルが傾いている。ハードウェアがまだ一般市場にないが、将来の 3D プリンタを見据えたソフトウェアとなっている。

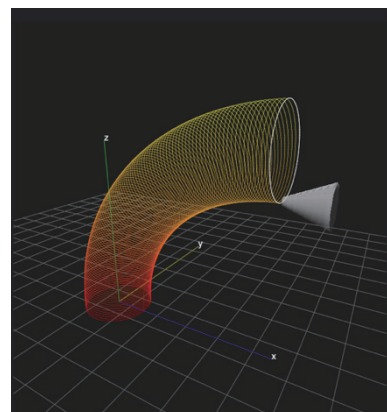


図 5 6 軸 3D プリンタの G-code 生成

5. 今後の展望

G-coordinator は、数学とコードにより、いままで出来なかつた形状を実現する一方で、同時に、ユーザには多少の数学的知識と、プログラムに関するスキルを要求するものであり、参入のための障壁は比較的高いと言わざるをえない。そこで、現在想定している G-coordinator の将来像は大きく分けて二つある。

一つは、Processing⁵などを代表とするジェネラティブアートを実物化させるためのソフトウェアとしての活用である。これにより、アーティストやデザイナーは数学的なアルゴリズムを用いて、従来不可能だった美しい形状を3D プリンティングで具現化することが可能になる。

もう一つは、G-coordinator が数理的な形状に得意な性質を生かし、物理シミュレーションや計算力学を応用して形状を実物化させるソフトウェアとしての利用である。これにより、エンジニアや科学者は複雑な物理的な現象をシミュレートし、それを具現化するのに G-coordinator を活用できる。プログラムを使った3D形状の生成と制御が主眼となる点で、どちらの展望も共通している。

6. 結論

FFF 式 3D プリントユーザにとって、CAD などの造形手段と、印刷のための調整を行うスライサを同時に置き換える新たな手段としての G-coordinator のポテンシャルについて述べた。

スライスソフトに比べて、全部を機械任せにできない欠点はあるものの、裏を返せば、3D プリントの挙動の細部まで、マニュアル操作可能になると言える。

G-coordinator は、数学とプログラムの力を駆使して新しい形状を実現するための強力なツールとして、今後の3Dプリント分野でさらなる進化が期待される。

7. 参考文献

1. Robert McNeel & Associates, Rhinoceros, <https://www.rhino3d.com/en/>.

2. David Rutten at Robert McNeel & Associates. Grasshopper3D. <https://www.grasshopper3d.com>
3. Gleadall, A. (2021). FullControl GCode Designer: Open-source software for unconstrained design in additive manufacturing. Additive Manufacturing, Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102109>
4. OpenCV org. OpenCV Python. <https://github.com/opencv/opencv-python>.
5. Processing Foundation. Processing. <https://processing.org/>

8. 補足資料

以下に円柱を造形するためのサンプルコードを示す。

```
import numpy as np
import print_settings
from path_generator import *
from infill_generator import *
from console import *

LAYER = 100

def object_modeling():
    full_object=[]
    for height in range(LAYER):
        arg = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
        x = 10 * np.cos(arg)
        y = 10 * np.sin(arg)
        z = np.full_like(arg, (height+1)*0.2)
        wall = Path(x, y, z)
        full_object.append(wall)
        print(f'layer at {height=}')

    return full_object
```


ヘッド固定ステージ可動形プリンティングシステムによる 凹面への付加造形と加飾の検討

Investigation of layered molding on a three-dimensional concave surface by a fixed head and movable stage type printing system

蘇 健恒¹, 田沼 千秋², 田中 豊¹

Kenko SO¹, Chiaki TANUMA², Yutaka TANAKA¹

¹法政大学, ²法政大学マイクロナノテクノロジー研究センター

¹Hosei University, ²Research Center for Micro-Nano Technology, Hosei University

【要約】

材料押出ノズル固定し造形ステージを可動式にしたプリンティングシステムを用いて、凹面形状の構造物の表面への付加造形に成功した。凹面への付加造形は、傾斜直動形平行メカニズムにより、造形ステージを6自由度の制御を行い、ノズルと構造物の表面との距離を一定に保った。凹面を持つ構造物の表面に試作した造形物は、直径68mm、半径が75mmの球欠表面に間隔が4mmで16本のメッシュ構造である。付加造形の結果について述べる。

【Abstract】

We successfully achieved additive manufacturing on the concave surface of a structural object using a printing system with a fixed material extrusion nozzle and a movable forming stage. Additive manufacturing on the concave surface was accomplished by controlling the forming stage in 6DOF using an inclined linear motion parallel mechanism, while maintaining a constant distance between the nozzle and the surface of the structure. The prototype structures created on the concave surface of the object consisted of 16 mesh structures with diameter of 68mm, radius of 75mm, and 4mm spacing between them. This report discusses the experimental results of constructing a mesh structure on concave surfaces using the prototype printing system.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, parallel kinematic mechanism, positioning accuracy, MEX

1. 序論

積層造形法 (Additive Manufacturing: AM) は、3次元のデジタル・モデルデータに基づいて、材料を繰り返し積み重ねて3次元の構造物を製作する付加加工プロセスである。積層造形法は、鋳造や切削加工などの製造工程と比べ、低コストでより複雑な形状を製作することが可能であり、今後の発展が期待される技術である[1]。

Chengkai らはシリアルメカニズムを用いて造形ステージを多自由度で可動させ、造形ステージ上に複雑な構造物を積層造形している[2]。回転方向の制御が加わることで、積層方向を変化させながら造形することが可能であり、複雑な形状の積層造形を実現出来る。

本研究では、傾斜直動案内形平行メカニズム[3]を用いて立体物を載せた造形ステージを多自由度で制御し、造形ステージ上部の空間固定された MEX (Material Extrusion) 方式の造形用ヘッドにより、立体表面に沿って積層造形を行うプリンティングシステムを用いた[4]。平行メカニズムは、シリアルメカニズムに比べて高剛性のため制御性に優れ、高精度に造形が出来ると考えられる。これまで可動機構に用いた傾斜直動形平行メカニズムによる造形ステージの可動範囲及び、位置決め精度を検証した[5]。本報告は、このプリンティングシステムを用いて凹面の表面に沿って付加造形を行った結果並びに加飾の可能性について報告する。

2. プリンティングシステム

図1に本研究で提案したプリンティングシステムの構成図を示す。造形ステージは平行メカニズムによって6自由度の制御ができる。造形用の MEX (Material Extrusion) 方式のヘッドは上部のフレームに固定され、直径1.75mmの樹脂フィラメントを230℃~240℃の温度で熔融して押し出した材料を積層し立体を造形する。ノズルから吐出したフィラメントの直径を0.3mm~0.35mmにするため、供給するフィラメントの押出速度は1.97mm/sとした。

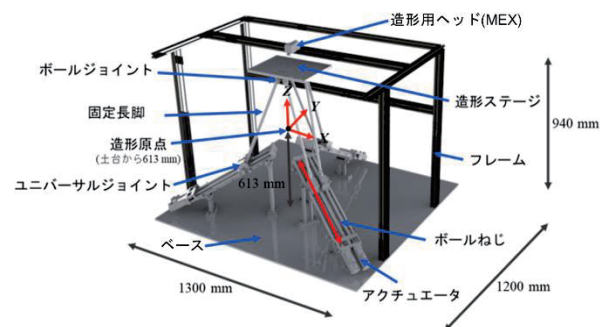


図1. プリンティングシステム構成図

造形ステージの座標系はステージ面を X-Y 平面とし、垂直高さ方向を Z とした。造形開始時には造形ステー

ジの水平を保つため、キャリブレーションを行い、キャリブレーション後のステージ中心位置をこの座標系の原点である造形原点とした。造形原点はベースから 613 mm の高さであり、すべての動作の開始位置とした。

3. パラレルメカニズム

3.1 パラレルメカニズムの構成

図 2 に傾斜直動形 6 脚パラレルメカニズムの構成模式図を示す。造形ステージはボールジョイントを介して 6 本の固定長の脚によって支持され、それぞれの固定長脚はユニバーサルジョイントによってアクチュエータに固定される。さらに、これら 6 つのアクチュエータは傾斜角度 30° の案内ガイド上を直線駆動する。これらの機構から、造形ステージは 6 自由度で可動する。造形ステージの大きさは、長辺が 350 mm、短辺が 260 mm の長方形で、固定長脚の長さは 500 mm である。

造形ステージ中心の X, Y, Z 座標とそれぞれの軸周りの回転角度によって表されるステージの姿勢情報を MATLAB/Simulink を用いて自作した動作シミュレータの逆運動学計算により 6 つのアクチュエータの駆動量に変換する。さらに、アクチュエータの駆動量を G-code の形式に変換し、これを指令として与えることでパラレルメカニズムを制御する。

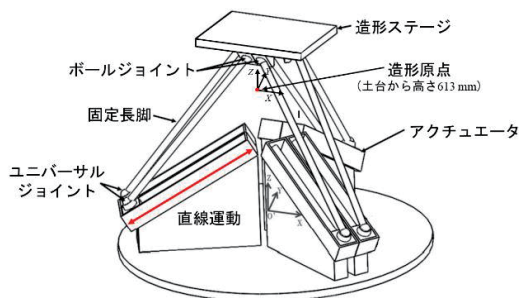


図 2. パラレルメカニズムの構成模式図

3.2 可動範囲

造形ステージの直線運動時のステージ中心の可動範囲を測定した。可動範囲は MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションを行った後、実機においても可動可能であることを確認した。測定は、実際に造形を行う高さである $Z = 30 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ の範囲で行った。ボールジョイントの可動制限は $\pm 30^\circ$ 、ユニバーサルジョイントの可動制限は $\pm 90^\circ$ であり、これらのジョイントの制限からステージの可動範囲が決定する。加えて、Z 軸方向の可動範囲は上部に固定した造形ヘッドの高さによっても制限される。可動範囲はステージ高さが高いほど広がった円錐台が積み重なったような領域となり、 $Z = 150 \text{ mm}$ の高さで最大半径 160 mm の円領域が得られた。

4. 造形実験

プリンティングシステムを用いて、立体曲面への付加造形実験を行った。凹面を含む土台上に凹面形状のメ

ッシュ構造物を造形した。土台は半径 37.4 mm、高さ 65 mm の円柱上部に、半径 75 mm の球体を下部から 10 mm の地点で切り取った球欠を乗せた形状である。造形したメッシュ構造は半径 34 mm のフレーム部分と、球面に沿った縦横 16 本ずつのワイヤによるメッシュ部分から構成されている。またメッシュの間隔は 4 mm とした。図 3 に造形物の写真と造形物の模式図を示す。

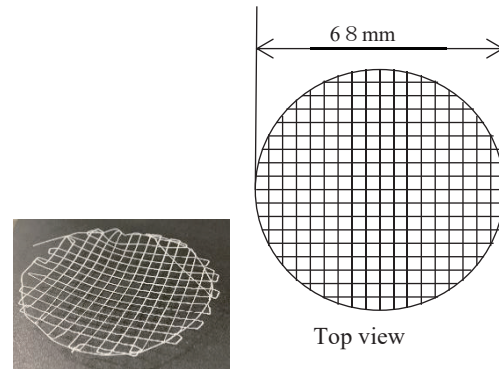


図 3 造形物の写真と造形物の模式図

5. 結言

傾斜直動案内形パラレルメカニズムを用いて積層造形を行うプリンティングシステムを用いて、凹面形状の付加造形に成功した。造形精度を高めるために、造形プログラムの調整が必要である。

本研究の一部は関東経済産業局の平成 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「工業製品製造に適した革新的な多次元制御方式による 3D プリンタの技術開発」による補助支援を受けて行われた。関係者に謝意を表す。

参考文献

1. T. Igarashi, "Additive Manufacturing," Seikei-Kakou, **28**(7), pp. 288-294, (2016).
2. Chengkai, D., Charlie, C.L., Wang, C., Wu, S.L., Guoxin, F., and Liu, Y., "Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion," ACM Transactions on Graphics, **37**(4), (2018).
3. J. Yamada, G. Minorikawa, Y. Tanaka, C. Tanuma, "Design and prototyping of parallel mechanism for fixed head type 3DPrinter," The Japan Society of Mechanical Engineers, (2017).
4. R. Tawara, Y. Inoue, H. Nakazima, C. Tanuma, Y. Tanaka, "Development of Additive Manufacturing Method by Slant Direct Drive Parallel Mechanism," JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-D07, pp.1-3, (2021).
5. R. Tawara, M. Tono, Y. Iguchi, C. Tanuma, Y. Tanaka, "Evaluation of Positioning Accuracy for Additive Printing System Using Parallel Mechanism," Proceedings of JSPE Semestrial Meeting, (2022).

磁石を用いた組み換え可能なモジュール型ソフトセンサの提案

Proposal for a Reconfigurable Modular Soft Sensor Using Magnets

佐倉 玲^{1*}, 香川 舞衣^{1*}, 韓 燦教¹, 笥 康明¹

Rei SAKURA¹, Mai KAGAWA¹, Changyo HAN¹, Yasuaki KAKEHI¹

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

【要約】

柔らかい素材で構成されるインタフェースにおいて、ユーザからの変形入力を検知するために、導電性の材料を用いた柔軟なセンサの開発が進められている。そうした柔らかいセンサの形状や柔らかさをユーザに合わせて自由度高く設計できるようになってきた中で、ユーザが求めるソフトインタフェースを、プロトタイピングしながら探れるようなツールが求められている。そこで本研究では、導電性材料を 3D プリントしたセンサモジュールを磁石で組み換え可能にすることで、即興的に形状や柔らかさを探索できるソフトセンサを提案する。本論文では提案するセンサの設計および実装方法をまとめ、応用事例を示す。

キーワード: 3D プリンティング, ラティス構造, ソフトセンサ, 磁石, プロトタイピング

【Abstract】

For interfaces made of flexible materials, there is ongoing development in the creation of deformable sensors employing conductive materials to detect deformation inputs from users. Given the increasing flexibility in the design of such soft sensors, allowing for customization of shape and flexibility to suit individual users, there is a need for tools that allow users to explore soft interfaces that meet their preferences through prototyping. Therefore, this research proposes an ad hoc soft sensor that users can design and explore. This is achieved by enabling the interchangeability of sensor modules that are 3D printed from conductive materials using magnets. This paper provides a detailed description of the design and implementation methodology of the proposed sensor and offers some applications as an illustration.

Keywords: 3D printing, lattice structure, soft sensor, magnet, prototyping

* These two authors contributed equally to this work.

1. 序論

柔らかい素材で構成されるインタフェースは、変形を用いてより自然なインタラクションを実現できる手段として注目を集めている[1]。こうしたインタフェースにおいてユーザからの変形入力をリアルタイムに検出しインタラクションに利用するために、柔らかく変形可能なセンサ(ソフトセンサ)の研究が進められている[2, 3, 4]。近年では、3D プリンティングなどのデジタルファブリケーション技術を活用することで、個人に合わせて形状や柔らかさなどを設計可能なソフトセンサも開発されている[5, 6, 7]。

柔らかいインタフェースの形状や柔らかさ、変形の仕方などを設計する際には、ユーザが実際に素材に触れながらプロトタイピングを行えることが望ましい[8]。しかしながら 3D プリンティングなどの造形手法でつくられるソフトセンサでは、造形に時間がかかるため、プロトタイピングを繰り返すことが難しい。littleBits[9]などのように手軽に形状や回路を組み替えられる即興的なプロトタイピングのためのインタフェースも存在するが、個々のモジュールは固く、柔らかく組み換え可能なインタフェース

は提案されていない。

そこで本研究では、柔軟な導電材料を 3D プリントしたソフトセンサを磁石で組み換えられるようにすることで、柔らかく、即興的なプロトタイピングが可能なモジュール型ソフトセンサを提案する。本センサを活用することで、ユーザはインタフェースの形状や柔らかさをモジュールを触って組み替えながら探索し、自分に合ったインタフェースを作成することができる。

2. 提案と設計

本研究で提案するソフトセンサは、筆者らが[6]で提案した手法 LattiSense を基盤とする。これは導電性の柔軟材料をラティス構造に出力することで、変形とセンシングを可能にしている。このラティス構造をもつ一辺 30 mm の立方体が 1 つの基本的なセンサモジュールとなっており、モジュール同士を磁石で連結し 3 次元的に組み合わせることで、さまざまな形状のソフトセンサを作成することができる。各モジュールは非導電性部位の配置やラティス構造のパラメータが異なっており、それによ

て作成するソフトセンサの配線箇所や柔らかさの設計が可能である。以下で、それぞれの特徴と設計について詳しく説明する。

2.1 センシング原理

本センサは、導電性の柔軟材料がラティス構造に出力されており、押しつぶすような変形が可能である(図 1 左)。この導電性のラティス構造が押しつぶされると、変形にもなって抵抗値が低下するため、抵抗値を読み取ることで変形を連続的に検知できる。

センサは、図 1 右に示すように導電性部位が折り返した構造が基本の構造になっている。この折り返し構造によって、抵抗値を読み取るための 2 本の配線が近い位置にまとまる。非導電性部位の配置はモジュールによって異なっており、センサ全体での折り返し構造をさまざまな形で作成できるようになっている。モジュールの組み合わせについては次章で詳しく述べる。

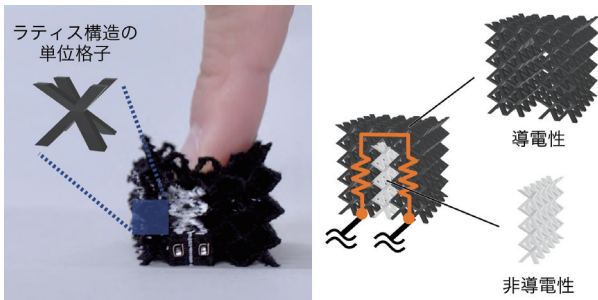


図 1 . (左) 本センサの変形の様子
(右) 導電性部位の折り返し構造と配線配置

2.2 モジュール

本ソフトセンサは図 2 に示すような、基本モジュール、4 種類のパスモジュール、2 種類のコネクタモジュール、拡張モジュールから構成される。

基本モジュール

上述したような折り返し構造をもつモジュールである。このモジュール単体でも、コネクタモジュールに連結

することでセンサとして使用できる。

パスモジュール

基本モジュールとコネクタモジュールの間をパスモジュールでつないで、変形を検知する部位を構成する。非導電性部位の配置が直線型、L 字型、T 字型、十字型になっているものの 4 種類がある。

コネクタモジュール

配線のためのモジュールであり、他のモジュールとは違ってセルが一段だけの直方体になっている。コンタクトピンの部分に配線を挿すことができる。磁石が配置されている面に対して、配線が裏面にくるものと側面にくるものの 2 種類がある。

拡張モジュール

基本モジュール、パスモジュール、コネクタモジュールで構成されるセンサに、拡張モジュールを連結して形状を変更できる。パスの形状は変わらないように連結する(図 3 下)。

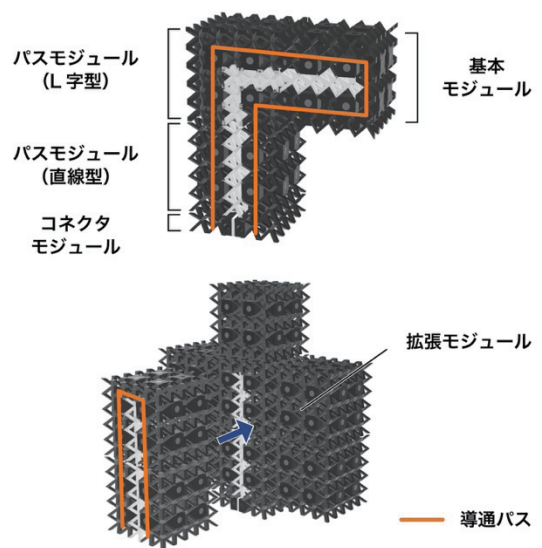


図 3 . センサの連結例

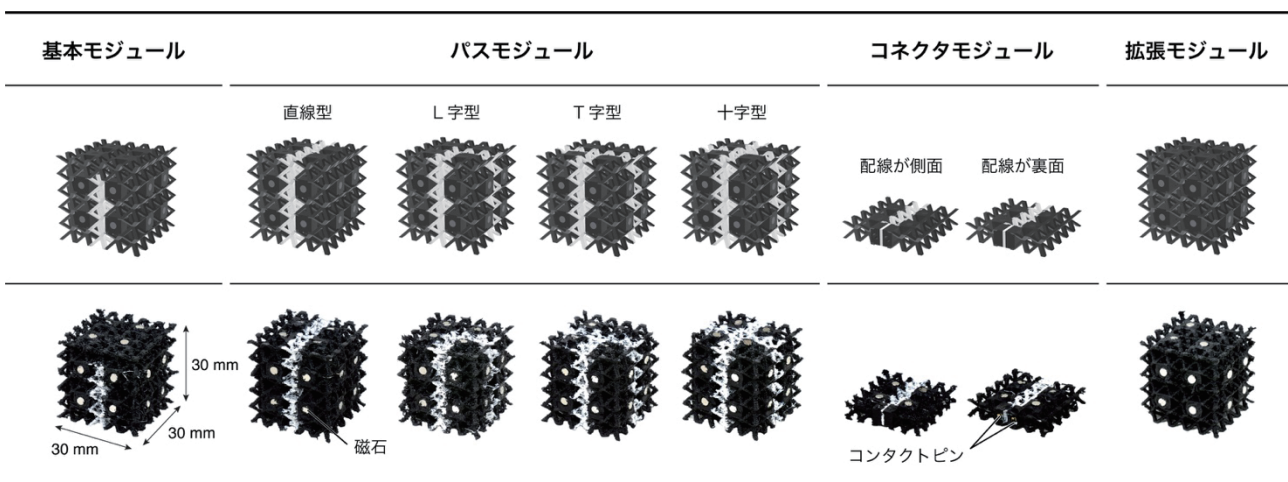


図 2. (上段)各モジュールの 3D モデル (下段)3D プリントされた各モジュール

また、それぞれのモジュールには 2 種類の支柱の太さをもったラティス構造のモジュールが存在している。支柱が細いものがより柔らかい構造であり、この 2 種類を組み合わせることで部位による柔らかさの設計ができる。

2.3 磁石による連結

各モジュールには、立方体の各面に 4 つずつの磁石が埋め込まれており、それによってモジュール同士を連結することができる。コネクタモジュールは一面のみに磁石が埋め込まれ、基本モジュールやパスモジュールの一面に連結することで回路との配線が可能である。

図 4(a)に示すように、全ての面において対角上に同じ極性の磁石が埋め込まれており、同一配置の面同士は連結が可能である。また、回転させると磁石配置が反転して反発する面ができるため、各モジュールの非導電性部位の位置を隣りあわせる配置を考慮し、図 4(b)のように磁石を配置した。

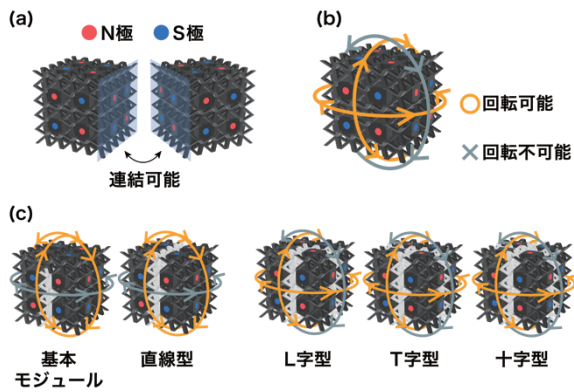


図 4 . 磁石の埋め込み位置と連結可能方向

3. 実装

本センサは FDM 式の 3D プリンタを用いて出力され、磁石と接触ピンを熱圧入して配線するという後加工を経て作成される。抵抗値変化は Arduino Uno を用いて分圧回路で読み取っている。3D プリントと熱圧入の詳細について以下に述べる。作成されたモジュールと連結の例は図 2 の下段と図 5 に示した。

3.1 3D プリント

本研究ではデュアルノズルのプリンタとして TENLOG TL-D3 Pro, スライサに Ultimaker Cura を用いた。導電性 TPU フィラメントとしては NinjaTek の Eel フィラメント、非導電性 TPU フィラメントとしては 3DXFLEX の Flexible TPU Filament を使用した。

3.2 熱圧入

磁石と接触ピンをはんだごてで熱しながらソフトセンサに圧入するという、熱圧入を行う。磁石は磁力が強く導電性があるネオジウム磁石を用いた。ネオジウム磁石は約 320°C を超えると磁性が失われてしまうため、320°C

以下で、かつプリントしたソフトセンサの TPU 素材が溶ける温度として、250°C で熱圧入した。接触ピンはコネクタパーツに 400°C で圧入した。

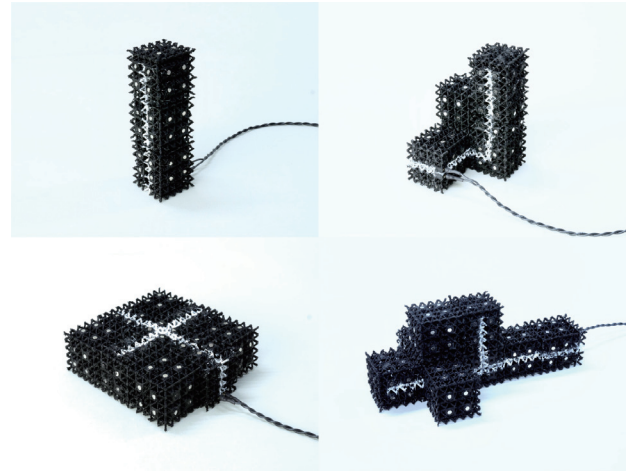


図 5 . 出力したモジュールの連結例

4. アプリケーション

本センサを用いて 2 種類のゲームコントローラのアプリケーションを作成した。

4.1 銃型コントローラ

1 つ目は銃型のコントローラである。基本モジュール 1 つと直線型モジュール 1 つ、拡張モジュール 5 つ、コネクタモジュール 1 つからなり、トリガー部分の変形をセンシングすることで動作する。

このコントローラを用い、風船を割るゲームを実装した。銃形状で打つ動作を行うことで、直感的な操作が可能である。トリガー部分の柔らかさや全体のサイズを変えることで、個人の好みに合わせて調整できる。

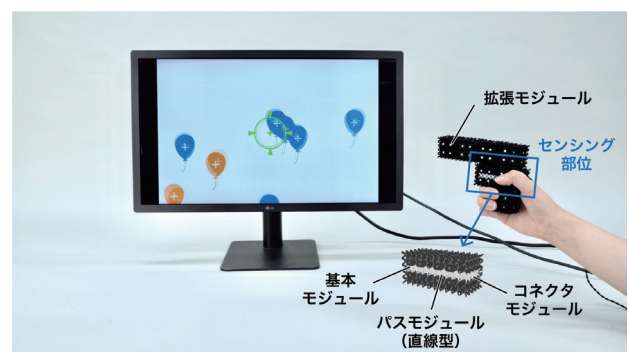


図 6 . 銃型コントローラの構成と風船割りゲーム

4.2 マルチボタンコントローラ

2 つ目は 2 つのボタンをもったコントローラである。基本モジュール 2 つ、直線型モジュール 2 つ、L 字型モジュール 2 つ、十字型モジュール 1 つ、コネクタモジュール 2 つからなる。コントローラの左右部分を押した際のそれぞれの変形量を検知できる。

このコントローラを用い、ブロック崩しゲームを実装した。コントローラの左右部分それぞれの変形量に応じて、バーを左右に移動させることができる。ボタン部分の柔らかさを変更し、個人の筋力に合わせて調整したり、ゲームの難易度を変えて遊んだりできる。

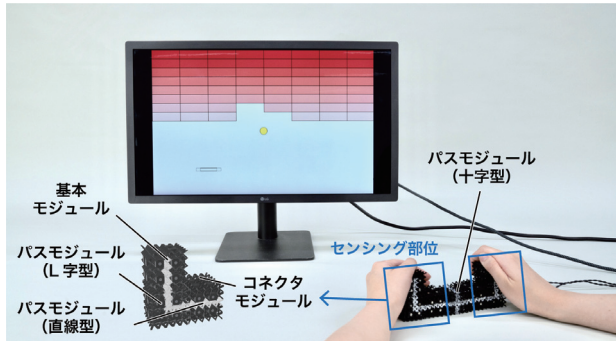


図 7. マルチボタンコントローラの構成とブロック崩しゲーム

5. まとめと今後の展望

本論文では、磁石での連結によって、形状や柔らかさを即興的に組み替えながらインタフェースをプロトタイプングできる、モジュール型のソフトセンサを提案した。センサの設計やファブリケーション手法について述べ、提案手法で作成したインタフェースの作例でその応用可能性を示した。

今後の展望として、まず抵抗値による連結状況の認識が挙げられる。本センサはモジュールを連結してパスが長くなると抵抗値が大きくなるという傾向があり、抵抗値の初期値と変化範囲を計測することで、モジュールの連結個数がある程度推定することができる。現状はインタフェースとして使用する際に、連結状況に応じたキャリブレーションが必要であるが、今後はモジュール間での抵抗値の違いや連結の仕方との関係性をさらに調査し、形状認識とキャリブレーションの自動化を行いたい。

また、今回はモジュールの形状を立方体で作成したが、提案手法では立方体以外の立体形状のモジュールも作成可能である。立方体以外の基本形状も導入してインタフェースの形状の設計自由度を高めたり、変形時にモジュール同士がずれにくいような形状の工夫にも取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の支援を受けた。

参考文献

- Alberto Boem and Giovanni Maria Troiano. Non-Rigid HCI: A review of deformable interfaces and input. In Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference, DIS '19, p. 885-906, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- Satoshi Nakamaru, Ryosuke Nakayama, Ryuma Niiyama, and Yasuaki Kakehi. FoamSense: Design of three dimensional soft sensors with porous materials. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, p. 437-447, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- Sang Ho Yoon, Luis Paredes, Ke Huo, and Karthik Ramani. Multisoft: Soft sensor enabling real-time multi-modal sensing with contact localization and deformation classification. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 3, sep 2018.
- Liang He, Gierad Laput, Eric Brockmeyer, and Jon E. Froehlich. Squeezapulse: Adding interactive input to fabricated objects using corrugated tubes and air pulses. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '17, p. 341-350, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- Martin Schmitz, Jürgen Steimle, Jochen Huber, Niloofar Dezfuli, and Max Mühlhölzer. Flexibles: Deformation-aware 3d-printed tangibles for capacitive touchscreens. CHI '17, p. 1001-1014, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- Rei Sakura, Changyo Han, Keisuke Watanabe, Ryosuke Yamamura, and Yasuaki Kakehi. Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness. In *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- Roland Aigner, Mira Alida Haberfellner, and Michael Haller. SpaceR: Knitting ready-made, tactile, and highly responsive spacer-fabric force sensors for continuous input. UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- 香川舞衣, 辻村和正, 佐倉玲, 山村亮介, 笈康明. 柔らかい操作インタフェースのアイデア創出を促すワークショップの実践. IPSJ Interaction 2023. 情報処理学会, 2023.
- Ayah Bdeir. Electronics as material: Littlebits. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '09, p. 397-400, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.

モアレ現象を応用した情報カモフラージュ技法と OOH メディアへの応用

Moiré Camouflaging Method to Blend Information into Background

木下 里奈¹, 大平 麻以², 田中 浩也²Rina KINOSHITA¹, Mai OHIRA², Hiroya TANAKA²¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学¹Keio University Graduate School, ²Keio University

【要約】

本研究では、立体構造と画像の2層の縞模様を重ね、モアレ現象を応用して特定の視点からは情報が見え、その視点以外からは情報が背景にカモフラージュする技法を開発した。また、OOHメディア(屋外広告)への応用を提案する。具体的な掲示内容として QR コードが考えられる。この技法の特徴は、特定の視点からのみ情報が見られること、背景に応じたテクスチャに情報がカモフラージュすること、ダイナミックな動きや奥行き感によって目を引くこと、制作後は機械を必要としないことである。この技法により、人々の目を引きながらも景観を損ねない OOH メディアが展望として挙げられる。

キーワード: モアレ、カモフラージュ、OOH メディア、テクスチャ、表現

【Abstract】

In this study, we propose a method in which information is visible from a certain viewpoint but blends in the background when viewed from other viewpoints, using the phenomenon of moiré fringe appearing by superimposing a 3D structure of line gratings and an image of line gratings. We propose its application to OOH (Out of home) media that shows a QR code as its content. The characteristics of this method are that the content can be seen only from a specific viewpoint, that the information camouflages into the texture of the background, that it catches the eye through dynamic movement and a sense of depth, and that no machinery is used after production. This gives the prospect of an OOH medium that catches people's eyes but does not spoil the landscape.

Keywords: Moiré, Camouflage, OOH Media, Texture, Expression

1. 序論

OOHメディア(屋外広告)は、快適な景観を構成する重要な要素で、大きな影響を与える。快適な景観は、自然、歴史、文化、経済活動など、その場を構成する様々な要素との調和によって形成される。情報を見せることが優先されない場所では、OOHメディアは目立たず存在感を消すことが望まれる。例えば、歴史的建造物が景観の重要な要素と指定される京都の一部の地域では、OOHメディアは景観と不調和な色は条例で規制され[1]、景観に溶け込むような色を用いたデザインが採用されている。一方で経済活動が重要とされる地域では、大型のデジタルサイネージに錯覚を利用した誘目性の高い屋外広告が活用されている[2]。そこで我々は、情報と景観の調和を図る新たな情報表示の方法の模索に可能性を感じた。具体的には、特定の視点から情報を見えるようにし、他の視点では背景にカモフラージュする技法を模索する。

2. 関連研究

必要な情報を表示したり隠したりする方法として、モアレ縞が研究されてきた。モアレ縞とは、周期の似た複数のパターンを重ね合わせた際に、周期のずれによって生じる干渉縞である。モアレ縞を指定の形状に近似させる研究がされてきた[3][4]。モアレ縞は複数パターン

が重なった際に現れる模様であるため、これらの技法では、レイヤーを取り除くことで情報を隠すことができる。しかし、これらの技法では視点を換えることで情報を隠すことはできない。mQRcode[5]では、QRコードはノイズのようなパターンの中に隠され、特定の視点で撮影すると、ノイズパターンとカメラの撮像素子のカラーフィルターアレイがモアレを起こし、QRコードを可視化させる。可視化された画像はカメラ越しにしか見られず、人間の目で直接見ることはできない。

3. 技法

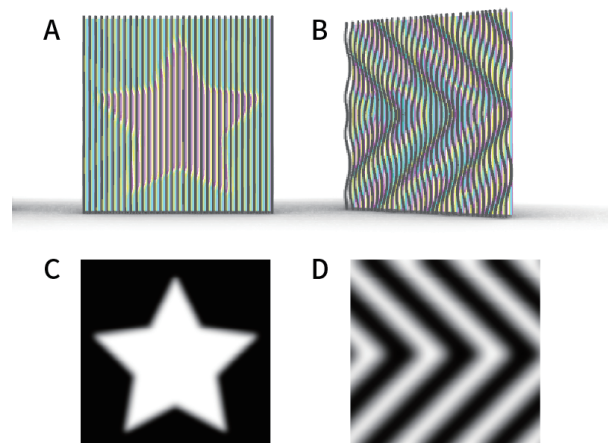


図 1. A) 可視点から見える情報 B)他の視点から見える縞

だ絵柄 C, D) 設計時に入力するグレースケール画像の一例

本技法ではモアレ現象を利用し、ある視点には情報を表示し、他の視点には表示情報を任意のテクスチャに歪ませた絵柄を表示する。本研究では表示情報が見える視点を可視点と呼ぶ。モアレを発生させるために、立体構造である機能層と、平面画像であるベース層を重ね合わせている。どちらの層も曲線が等間隔に並んでいる。

3-1. ベース層

ベース層は、表示させたい情報と色が潜在する縞模様である。特定の周期を持つ縞模様を重ね合わせた時に発生するモアレにより、表示情報が干渉縞として顕在化する。

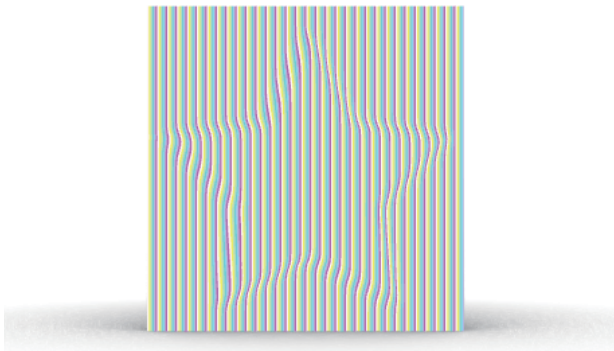


図 2. ベース層

3-2. 機能層

機能層は情報を表示させた状態と、歪ませた状態を見る視点によって変化させる機能を持つ縞模様である。具体的には、見る角度によって機能層の線の形状が変化して見える。可視点から構造を見ると、機能層は直線が一定間隔に並んで見え(図 3A)、可視点以外から見るとうねった曲線が並んで見える(図 3B)。可視点から見える直線は、ベース層に潜在する絵柄を顕在化する縞模様の周期を持っているため、情報が表示される。

可視点以外から見えるうねった曲線は、ベース層の縞模様を歪ませるものである。この曲線は、可視点から構造を見たときに、線が歪まず直線に見えるようにするために、可視点に向かって湾曲している。従って、上面から見た時に機能層の曲線は等間隔に並んでいるものの互いに平行に並ぶのではなく、可視点に向かって傾いている(図 3C)。

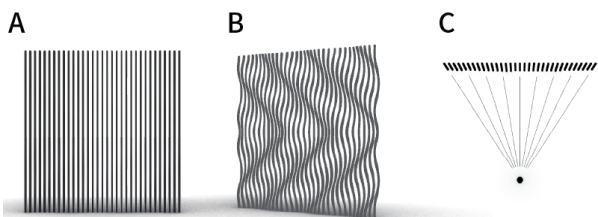


図 3. A) 可視点からの見た機能層 B) 可視点以外の点から見

た機能層 C)上面から見て曲線が可視点に向かって湾曲しているイメージ図

3-3. 表示情報とカモフラージュ模様の指定

本研究では機能層とベース層の設計の入力として、グレースケール画像を用いる。ピクセルの値(明るさ)を曲線の歪みの大きさに変換している。カラー画像を用いる場合は、画像をグレースケールに変換する。

4. アプリケーション

応用先として、表示情報が背景のテクスチャにカモフラージュする OOH メディアを提案する。

具体的な表示情報として、QR コードを用いることが考えられる。2030 年までに訪日外国人旅行者数を 6,000 万人まで増加させる目標を掲げられている現在、受け入れ環境整備の一環として OOH メディアの多言語化が急がれる。QR コードはスマートフォンの純正カメラアプリから誰でも読み取れるという利点があり、掲示できる情報量が限られる広告物の多言語化の策として挙げられる。しかし、直線的で異質な見た目により景観を損ねるという課題がある。そこで、見える必要のある視点以外では情報がカモフラージュする本技法の QR への応用を提案する。

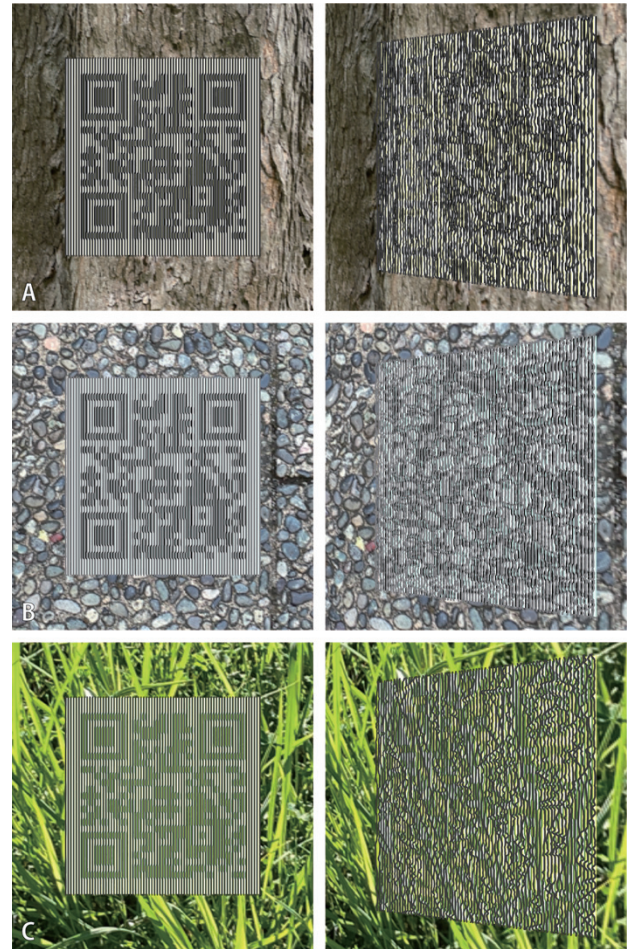


図 4. 本技法を応用した QR コードサインの CG 画像
A)木 B)石畳 C)草

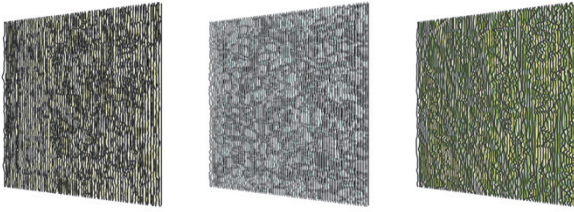


図 5. QRコードサイン単体のCG画像

図 4, 5 は木、石畳、草原に設置する OOH メディアを想定して制作したCGである。図 4 の左側の図は可視点から見たサインで、表示情報である QR コードが見え、右側は図は可視点以外からの見たサインで、それぞれの背景に応じたテクスチャに表示情報が歪む。

5. ファブリケーション

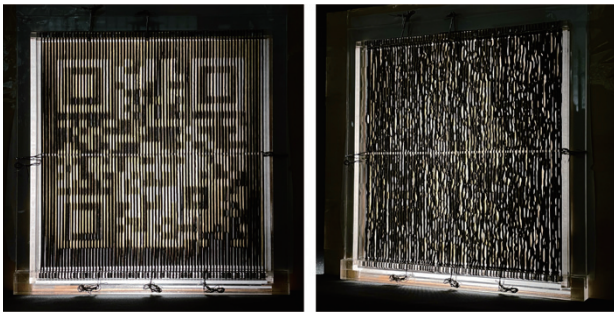


図 6. 第 4 章で提案した木の QR コードサインのプロトタイプ

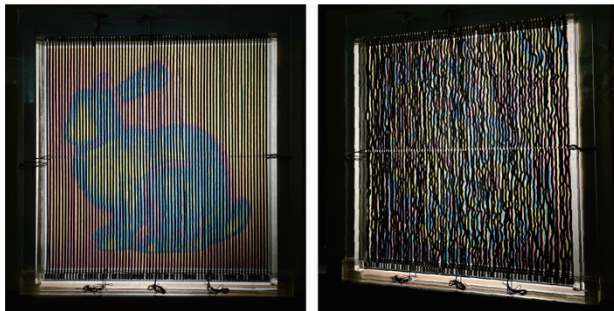


図 7. スタンフォードバニーのグレースケール画像から作成したプロトタイプ

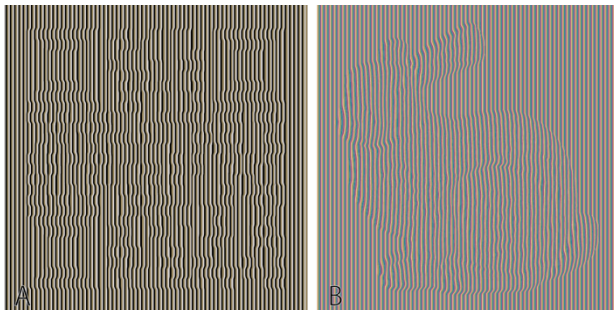


図 8. A) 図 6 のベース層 B) 図 7 のベース層

レーザーカッターを用いて機能層の制作を試みた。ベース層は紙に印刷し、バックライトを当てている。

サインの表示面の大きさは 230mm×230mm で、機能層の曲線の幅と間隔は共に 1.5mm である。曲線のパ

ーツは枠の溝に噛み合わせ、角度と位置を固定した。曲線のパーツの歪みを抑えるための工夫として、中央に柱を入れた。曲線のパーツは ABS 板を切り出し、枠にはアクリル板を使用した。

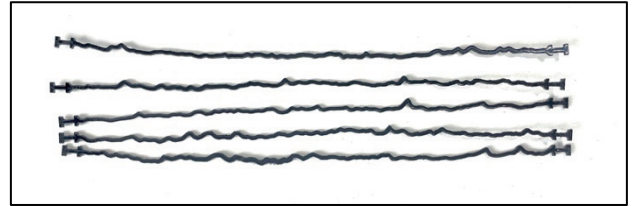


図 9. レーザーカットした機能層の 1.5mm の曲線パーツ

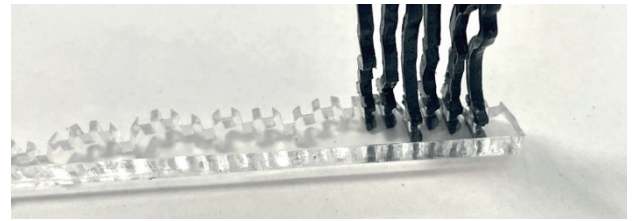


図 10. 曲線パーツを枠に位置と角度を固定する様子

第 4 章で提案する木に設置する QR コードのサイン(図 4)のプロトタイプを制作すると(図 6)、可視点からは QR コードのような絵柄が見えたが、機械で読み取れるほどの精度は得られなかった。機能層の曲線パーツの僅かな反りにより、可視点からは一定間隔に並んで見えるはずの直線の縞模様が、少し歪み不規則に並んでいる箇所がある(図 11)。

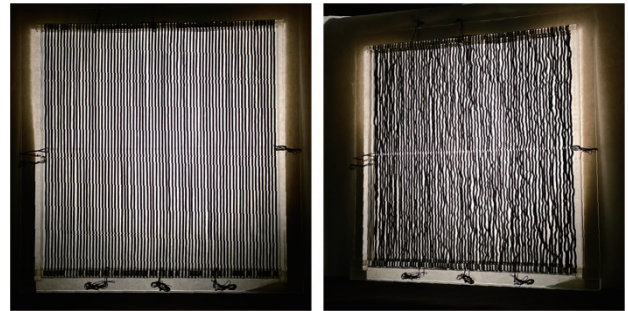


図 11. プロトタイプの機能層

次に CG 用の試験モデルとして使われるスタンフォードバニー[5]の画像を使用し、それを表示するサインのプロトタイプを制作した(図 7)。図 8 のベース層ではほとんど見えなかったウサギの絵柄が見えるようになった。白黒の QR コードと違いグレースケールの絵柄なため、凹凸が色として現れ立体的に見える。

6. 結論

6-1. 本技法の特徴

プロトタイプの制作を通して、本技法に 4 つの特徴があると考えた。

- ・ 特定の視点からのみ情報が見られる

可視点から見ると、ベース層と機能層の縞模様がモアレを起こし、表示情報がモアレ縞として見られるようになる。

- **背景に応じたテクスチャに情報がカモフラージュする**
可視点以外から見ると、機能層のうねった曲線によりとベース層との縞模様の周期が乱れ、表示情報が歪んで見られなくなる。
- **ダイナミックな動きや奥行き感によって目を引く**
見る角度によって見える色や形が変化する。また僅かな差でも変化するため、目の位置の左右差でも見た目が変わる。両眼に異なる像が映されるため、不思議な奥行き感が生まれ、目を惹く。
- **制作後からは機械を必要としない**
上記の特徴はモアレという単純な現象によって引き起こされる。そのため人感センサーなどの機械は使用せずに実現する。ただし、バックライトは必要とする。

6-2. 本技法の課題と展望

本技法で高い精度を要する情報を表示するには、製造手法の精度向上が課題となる。また、バックライトなしでは視認性が低く、設置時には電源の確保が課題となる。

本技法では背景に応じたテクスチャに情報が溶け込む情報表示方法を開発した。景観を損ねうる情報、例えば直線的で景観に異質な見た目をもつ QR コードを表示するメディアとしての展望が考えられる。また、ダイナミックな動きや奥行き感によって目を引くことも本技法の特徴にある。誘目性と景観との調和との両立を図る OOH メディアとしての展望が考えられる。

参考文献

1. 京都市都市計画局. 京の景観ガイドライン 広告物編.
<https://www.city.kyoto.lg.jp/tokei/cmsfiles/contents/0000056/56450/0407guidelinerink.pdf>. (参照 2023-09-30)
2. クロス新宿ビジョン. 新宿東口の猫【公式】.
<https://vision.xspace.tokyo/3dcat/>. (参照 2023-09-30)
2. Sylvain M. Chosson and Roger D. Hersch. 2015. Beating Shapes Relying on Moiré Level Lines. ACM Trans. Graph. 34, 1, Article 9 (dec 2015), 11 pages.
3. Pei-Hen Tsai and Yung-Yu Chuang. 2013. Target-Driven Moire Pattern Synthesis by Phase Modulation. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 1912-1919.
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.240>
4. Hao Pan, Yi-Chao Chen, Lanqing Yang, Guangtao Xue, Chuang-Wen You, and Xiaoyu Ji. 2019.

MQRCode: Secure QR Code Using Nonlinearity of Spatial Frequency in Light. In The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 27, 18 pages.
<https://doi.org/10.1145/3300061.3345428>

5. Stanford Computer Graphics Laboratory. The Stanford 3D Scanning Repository.
<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>
(参照 2023-09-30)

人の触り方を記録する「やわらかメモリー」の検討

Examination of "Yawaraka memory" that records the way people touch

田山 佳宗¹, 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム シブリー², 小川 純², 古川 英光²

Yoshimune TAYAMA¹, Yosuke WATANABE, MD Nahin Islam SHIBLEE², Jun OGAWA², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部,

²山形大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University,

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

ソフト材料の物理リザーバ計算を活用して、人の触り方を記録・保存するウェアラブルデバイスを提案する。このウェアラブルデバイスを「やわらかメモリー」と呼び、ソフト材料による人の肌への接触親和性とユーザーの体形や動きに対する密着性を実現し、快適な装着感を提供する。このデバイスを活用し、接触する動作を識別できる機械学習器を作成し、触覚から入手できる情報を別のユーザに伝達することでどのような意思疎通がなされるのかについて検証する。

キーワード: ウェアラブルデバイス, センシング, 機械学習

【Abstract】

We propose a wearable device that records and stores human touch utilizing the physical reservoir computing of soft materials. This wearable device, referred to as "Soft Memory," realizes a comfortable fit by offering skin affinity through soft materials and adhering well to the user's body shape and movements. By employing this device, we create a machine learning classifier capable of identifying touch actions and investigate the kind of communication that can be achieved by conveying information obtainable from the sense of touch to another user.

1. 諸言

人と人とのコミュニケーションにおいて、互いの認識を伝達する際に、ある事象について観測した結果を、言葉やジェスチャーによる対話を通じて共通の認識を形成しようとするものである。しかしながら、対話による伝達情報は主観的な経験によるバイアスを受け易く、多少なりとも認識の齟齬が発生する可能性がある。この認識の齟齬は、言語的、身体的なハンディキャップにも大きく依存し、実際のところ直接的な聴覚および視覚による対話でのコミュニケーションは高度なインタラクションを必要とする。

そこで、本研究は触覚による対話において、そのコミュニケーションがどのようなものとなり得るかを探るため、人と人との間に物体への接触を介在させた場合における共通認識を生み出すためのウェアラブルデバイスを開発し、その触覚コミュニケーションにおける認識の齟齬について検証することを目的とする。

本稿では、人と物理的な識別手段としてソフト材料を媒体とする物理リザーバ計算による触覚識別をウェアラブルデバイス化する。ソフト材料の物理リザーバ計算における関連研究としては、フレキシブルセンサーを用いた微細な生体情報の変化の定量的なデータの検出が挙げられる[1][2]。その中でも、廣瀬らは弾性の異なる構成要素から成る口腔内における触覚情報に着目し、微細な食感を歯および歯肉を通した微弱な圧力変化か

ら高精度に識別するための咀嚼ロボット「Gel Biter」を開発し、その有用性を示している[3]。

そして、開発するウェアラブルデバイスに基づいて、個人の触り方を識別し、その情報を保存し、対話相手にフィードバックを行うことができる圧電感知ウェアラブルデバイス「やわらかメモリー」について議論する。

2. やわらかメモリー

本章では、圧電感知ウェアラブルデバイス『やわらかメモリー』で対象とするコミュニケーションの概要と、その装置構成、センサー信号のデータ処理および識別学習法について述べる。

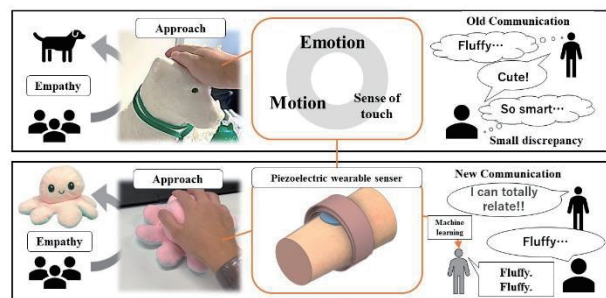


図 1. やわらかメモリーの概念図

2.1 やわらかメモリーの設計概要

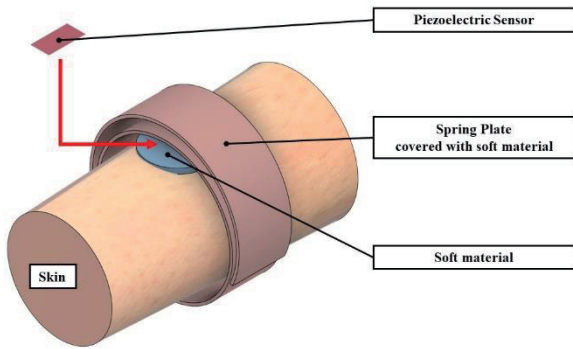


図 2. やわらかメモリーの装置構成

やわらかメモリーの概要を図 1 に示す。本稿で取り扱う状況とは、ある物体に接触した際に、接触者が感じる印象を脳内で言語化するものである。この際、接触者の経験に基づいて言語化がなされるが、例えば、柔らかい犬型のオブジェクトに触れた際には、「ふわふわ」、「かわいい」、「とても賢そう」などの言葉に触覚情報が変換される。この言語化プロセスは個人に強く依存するため、異なる接触者が同一の物体に触れた場合、図 1 上部に示すように、両者間での齟齬が発生する可能性がある。それゆえに、やわらかメモリーは、人間の触り方の情報、すなわち動作や触感をデータとして識別する機械学習器を介し、接触者同士で触覚情報を伝達し合う。これにより、対話から生じる感情の共有を目指すウェアラブルデバイスのシステムである。このデバイスでは、接触者の動作および触覚情報の読み取りに圧電フィルムセンサーが用いられる。また、データ処理には、前述の通り、物理リザーバー計算[4]が採用される。

2.1 やわらかメモリーの装置構成

やわらかメモリーの装置構成を図 2 に示す。本装置は、肌に接触する側から柔軟材料、圧電フィルムセンサー、ステンレススチール製ばね板で構成されている。この構成において、柔軟材料は重要な役割を果たしている。柔軟材料は、圧電フィルムセンサーが取得するデータを、弾性変形を通じて増幅する効果を提供する。したがって、感度の高い圧電フィルムセンサーは、より細かい刺激を検知することが可能である。本研究では、柔軟材料として軟性シリコンの Ecoflex™00-30 (Smooth-On, Inc. 社) が採用されている。ばね板により、装置は簡単に肌に押し付け固定することができ、これにより、装着時の取得情報の個人差を軽減することが可能である。

2.2 やわらかメモリーによる識別学習法

本研究では、やわらかメモリーを用いて繊細な感知データを収集し、高度な触覚識別を実現するための新しい識別学習法を開発している。具体的な手順としては、まず、装置を身に着けた状態で、対象物体への接触動作を行う。このプロセスを通じて、バンド内部の圧電セン

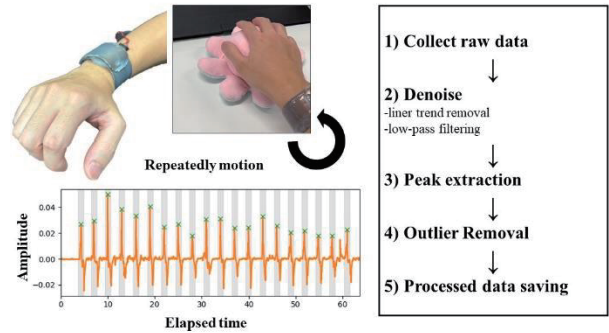


図 3. 圧電センサーのデータ処理手順

サーに伝達された圧力がアナログ電圧値として取得される。このアナログ電圧値は、その後、Arduino Uno と Adafruit ADS1115 というマイクロコンピュータを用いて 16 bit のデジタル値(データ範囲: -32768 ~ +32768)に変換される。さらに、USB シリアル通信を介して、取得データは Python スクリプト上で csv ファイル形式として保存される。この取得データは、ノイズ除去や特徴量抽出などの一連のデータ処理を経た後、識別学習に適用される。図 3 にデータ処理のフローチャートを示す。取得データの前処理としては、ノイズ除去と線形傾向の除去が行われる。これは、取得データがノイズやヒステリシスの影響を受けやすいためである。しかし、一般的にノイズと判断される高周波成分にも識別精度に寄与する重要な特徴量が含まれていることが、既存の研究[5]により明らかにされている。したがって、本研究では、ヒステリシスの除去と併せて、適切なノイズ処理法を選定することが求められる。このため、前述の線形傾向の除去や、ウィンドウ処理によるデータセグメンテーションなど、一連のデータ処理手順が重要である。また、取得した識別データは、物理リザーバー計算[4]を用いて処理される。この手法は、動的なデータ系列から特徴量を効果的に抽出することができるため、やわらかメモリーにおいて高い識別性能を発揮する。

その後、抽出されたピーク部分から各データの特徴量作成を行う。この特徴量作成には、時系列データから多次元の特徴量を自動生成するためのライブラリである tsfresh[6]を用いる。tsfresh は、大量の時系列データから効率よく有用な特徴量を抽出するための高度なツールであり、その応用は広範にわたる。最終的に取得されたデータは、ロジスティクス回帰[7]を用いた機械学習モデルの教師あり分類学習に使用される。この学習プロセスでは、生成された特徴量と対応するラベルが 80% : 訓練データ, 20% : テストデータとして分割される。本研究では、材料特性を含んだ非線形応答を最大限に活用した物性識別精度を検証するために、学習アルゴリズムのパラメータチューニングは実施していない。これは、本研究の主要な目的が、圧電センシングデータの識別精度がどの程度ソフト材料の物性に依存するのかを明らかにすることであるためである。

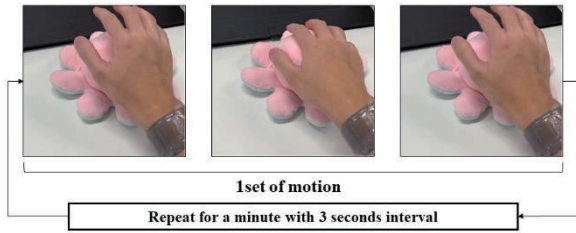


図 4. やわらかメモリーのデータ測定手順

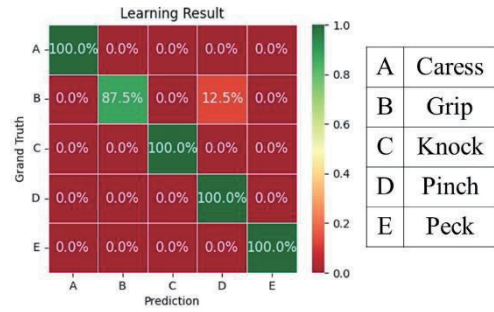


図 5. 動作による判別結果

表 1. 異なる弾性率(柔らかさ)をもつ物体への接触動作の識別結果

I	II	III
Eco-flex 00-10	Eco-flex 00-30	Gypsum
110[kPa]	460[kPa]	6.87[MPa]

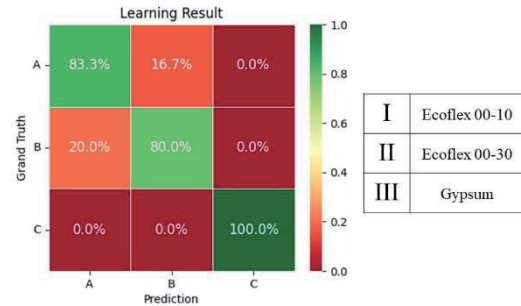


図 6. 異なる物性に対する識別結果

3. 共感モデルにおける判別実験

本研究は前章で述べた『やわらかメモリー』で、異なる4者間の物体の接触に対する接触方法の識別学習機を作成し、4者間で各々の触り方を伝達した場合、どのような感情を想起するか検証する。そのためまずやわらかメモリーで動作の識別がそもそも可能であるかを検証するため、(A)なでる、(B)つかむ、(C)たたく、(D)つまむ、(E)突くの5つの動作の識別を実施する。次に異なる柔らかさの物体に対する識別ができるか調べる。その後、各個人の触り方の識別と感情の模索を実施する。これらの検証は図4に示すように手首の位置にやわらかメモリーを装着し、触ることを指示された物体に触れることで接触データを被験者から収集する。接触は1分間に20回実行され、接触対象物への反応を記録する。この操作から得られたデータ群を2.2で述べた方法で識別学習を適用する。識別学習の結果から、やわらかメモリーがまず接触者の触る動作、すなわち触覚情報をどの程度識別できるのかを明らかにする。そして、その識別能力が接触者同士の意思疎通をどれだけ可能にするのかを評価する。

本実験では、やわらかメモリーが触覚情報を取得および識別できるかどうかを検証する。今回の実験では表1に記す接触対象(I)~(III)に対して一定の接触動作を行った場合における、接触動作の識別を行う。接触対象は(I) Ecoflex™ 00-10(弾性率 110[kPa])、(II) Ecoflex™ 00-30(弾性率 460[kPa])、(III) 石こう(弾性率 6.87[MPa])であり、同形状で弾性率とタック性が異なる材料で作成されている。

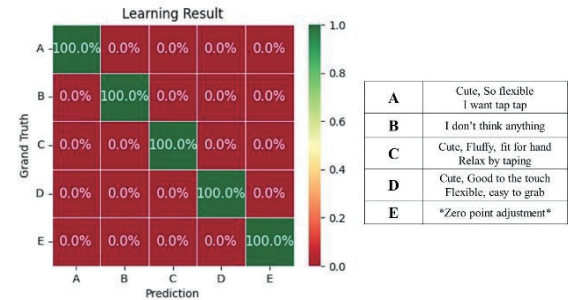


図 7. 被験者 X ごとの触り方の識別結果とアンケート結果

ここでは本研究の本題である個人の触り方の判別とそれを用いた意思疎通が可能かを実験する。今回被験者4名(以下被験者 X)に対して同一の対象を用意し、触り方を学習する。学習の際には動的識別を行うことを考慮し、ゼロ点調整として接触動作を行わないデータを学習させる。その際に、同一対象について持っている勘定についてアンケートを行った。意思疎通実験では学習により生成される学習モデルを用いた動的識別を行い、目標ラベルを学習モデルの作成に関与していない被験者2名(以下被験者 Y)に提示する。被験者は提示されたラベルの触り方を模索し、被験者が終了を申し出るまで動的識別を続ける。終了を申し出た際に、指示されたラベルの触り方と一致しているか、また、測定対象に対してラベルの被験者 X が持っていると思った感情についてアンケートを行い、これらの一致が起こるかどうかを検証する。

表 2. 被験者 Y ごとの触り方の一致度とアンケート結果

Ravel	Motion consistency	Emotion estimation
A	△	Spare time, relax
B	○	Angry
C	△	Admiring, to treat gently
D	×	Admiring, cute

4. 実験結果の分析と考察

図 5 には、動作による実験のロジスティック回帰に基づく識別結果が示されている。水平軸は予測ラベルを、垂直軸は実際のラベルを示している。これにより、対角成分に表記される値が予測と実際のラベルの一致（識別精度）を示している。平均識別率は 97.5%と、高い識別率を有している。これは、やわらかメモリーによって動作が認識可能であることを示し、やわらかメモリーの本題である触り方の記憶と合致している。

図 6 には、異なる物性の識別実験の結果が示されている。平均識別率は 87.8%である。この結果は、やわらかメモリーが装着者から受け取る触覚情報を適切に取得可能であることを示している。これは、やわらかメモリーが触覚を他者と共有するために必要な性能を有しているといえる。

図 7 には、被験者 X ごとの触り方の識別とその際のアンケート結果を示している。識別率は非常に高く、動的識別の学習モデルとして利用することが可能である。表 2 には、意思疎通実験の結果が示されている。ラベルを支持された際の動作の一致率を三段階別に示している。この一致率は目測であり、数値的裏付けはないことを明記しておく。この一致率は B では一致していたが、A, C においてはある程度の要素が一致している程度にとどまった。D においては要素の認識においても一致しなかった。やわらかメモリーを用いた意思疎通実験では、感情の系統が独立していた B においては被験者群 X と被験者群 Y とともに、「かわいい」や「癒し」とは異なり、「無関心」、「怒り」であった。これは、やわらかメモリーによる大まかな感情の共有であると考えられる。A, B, C においては大まかな感情では一致するものの、細かいニュアンスの一致には至らなかった。しかし、A においては被験者 X, Y とともに自身がどのように感じているのかという認識の一致が見られた。C, D においては、測定物の形に注目した感情は共有できなかった。これは、実際の形に基づいた接触を行い、触覚を介した感情ではなかったためである。これにより、やわらかメモリーでは触覚を介した感情は記録できるが、視覚情報による先入観は伝達できないという性質を持つことが示されている。

5. 結言

本研究では、圧電感知型ウェアラブルバンド「やわら

かメモリー」の開発及び、その感情共有の性質についての検討を行った。やわらかメモリーは、物体に触れた際にピエゾフィルムセンサで情報を波形として取得し、機械学習による識別を通じて、接触動作、触感、個人の触り方において高い識別率が得られた。また、一部の感情の共有が可能となり、触感を介した新たなコミュニケーションの足がかりとなることが実験から示唆された。しかし、今回の実験では接触動作と感情のあいまいさや、動的識別の精度に関するいくつかの課題が浮き彫りとなった。今後は、装置の設計の最適化を図るとともに、接触動作の数値化や感情の測定にチェックマーク方式を導入することで、より詳細な調査を行う予定である。また、異文化コミュニケーションにおいて、異なる文化圏同士での感情の共有が可能であるのか、あるいはこれが同一文化圏内での現象に限定されるのかについても、引き続き調査を進めていく計画である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H04936, JP22K17972, 管理法人 NEDO の委託業務 (JPNP14004 と JPNP20004) によって支援を受けたものである。

参考文献

1. K. Matthias: "Innovation potentials and pathways merging AI, CPS, and IoT," Appl Syst Innov, vol.1, no.1, 2018.
2. L. K. Ramasamy, F.Khan, M. Shah, B. V. V. S. Prasad, C. Iwendi and C. Biamba: "Secure smart wearable computing through artificial intelligence-enabled internet of things and cyber-physical systems for health monitoring," Sensors, vol.22, no.3, 2022.
3. Hirose, K., Sudo, I., Ogawa, J., Watanabe, Shiblee, MD. N. I., Khosla, A., Kawakami, M., Furukawa, H.: Gel Biter: Food Texture Discriminator based on Physical Reservoir Computing with Multiple Soft Materials. AROB Journal, vol.27, no.4, 2022.
4. 田中, 中根, 廣瀬: リザバーコンピューティング—時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア—. 森北出版株式会社, 2021
5. Maria. V, O., Marit, O., Thomas, L., Oyvind, S., Yunus, Y., Tor. A, J., Ronald, M.: The role of tactile feedback in laparoscopic surgery, Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques, vol.16, no.6, pp.390-400, 2006.
6. M. Christ, N. Braun, J. Neuffer, and A. W. Kempa-Liehr, Time series feature extraction on basis of scalable hypothesis tests (tsfresh - a python package), Neurocomputing, vol.307, pp. 72-77, 2018.
7. F. Pedregosa et al, Scikit-learn: Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research, vol.12, pp. 2825-2830, 2011.

クラゲと水草の共生を表現するアクアリウムセラピー型浮遊培養地

Aquarium therapy-type floating culture that expresses the symbiosis of jellyfish and aquatic plants

茅原 琢斗¹, 小林 竜也², 小川 純², 渡邊 洋輔²,
エムディ ナヒン イスラム シブリ², 古川 英光²

Takuto CHIHARA¹, Tatsuya KOBAYASHI², Jun OGAWA², Yosuke WATANABE²,
MD Nahin Islam SHIBLEE², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部, ²山形大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University, ²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

我々はアニマルセラピーを目的とした本物に近い人工クラゲをゲルで作製することに成功している。このクラゲは本物に近い柔軟性と透明性をもつゲル材料を選定しており、形状も本物に近づけることによって模倣することができる。この動作は一方向の水 flow で制御しており、循環的に行われている。本研究ではこのクラゲを浮遊培養地として活用し植物が成長するのか？、またクラゲにゲル製の構造体を搭載することによって動作を変えるとどのように植物の成長に影響を与えるのか？を検証する。セラピーと培養を融合した新たなアニマルセラピーとしてのゲルクラゲが誕生するのかどうかを議論する。

キーワード: ゲルクラゲ, 浮遊培養, 水草, セラピー効果, 概念融合

【Abstract】

We have successfully created an artificial jellyfish using gel, closely resembling the real appearance, intended for animal therapy. The jellyfish is made with a selected gel material possessing flexibility and transparency akin to the real one, and its shape is mimicked by closely resembling the authentic form. Its movement is controlled by unidirectional water flow and occurs cyclically. In this study, we explore whether plants can grow by utilizing this jellyfish as a floating cultivation medium, and how altering the movement of the jellyfish by incorporating gel structures influences plant growth. We discuss the potential emergence of this gel jellyfish as a novel form of animal therapy integrating therapy and cultivation.

1. 緒言

1-1. 研究背景

令和を生きる現代人はペットを家族として迎える人口が年々増加し、家のインテリアとして観葉植物を置いたりなど、セラピー効果をもたらす環境物を自らの QoL を向上させるために邁進している。これは SNS を筆頭に新たなメディアによる超情報化社会ならではの心的ストレスに晒されて生きる人間が無意識的に癒しを求めていることに他ならない。この社会的背景の中で、環境物にセラピー効果を見出すべく、多くのアプローチが生まれている。その中でもアクアリウムセラピーというものがある。アクアリウムセラピーでは非日常的な水空間を切り取り、その空間にエビや金魚、水草などの配置をデザインし、育て、眺めることで癒しを得る。活発に動く生物はアニマルセラピーとして能動的な動作による癒しを提供するが、アクアリウムの中には水草のみを育てる水槽もあり、水草自体の受動的な動作の鑑賞によるセラピー効果を提供することができる。そこで我々はこのように生物が生み出すセラピー効果と植物が生み出すセラピー効果、これらの組み合わせが相乗効果をもたらしてアクアリウムセラピーはさらに効果を増していくのではと着想する。

我々は前述のアニマルセラピーを目的とした観賞用クラゲを、クラゲの組織構成と類似するゲルで作製することに成功している。このゲルクラゲは本物にそっくりな

姿だけでなく柔らかさや含水率、透明度など機械的性質までもが再現されている。このゲルクラゲの演出力向上を促すため、ゲルクラゲ専用の照明効果を引き出す水槽も設計している。これらの技術により通常のアクアリウムで起こさないような強い水流を静音にて発生させ、ゲルクラゲを動かし本物のクラゲのように泳がせることでさらなる需要を生み出すことに成功した。実際にこのゲルクラゲは全国各地に設置されており、幅広い層から支持を受けている。そこで我々はゲルクラゲと水草を融合できれば、受動的なセラピー効果による相乗効果を生み出せるのではないかと考える。ゲルクラゲは限りなく生物に近いが人工物である。すなわち、水草の培養地としての役割を付与しうる可能性はあり、ゲルクラゲの遊泳とともに水草が揺らぎ成長してゆく。そのような概念を打ち出せるはずである。

1-2. 研究目的

本研究は図 1 に示す通り、2 つのセラピー効果の融合と水草の培養という全く異なる概念を組み合わせ、水草とゲルクラゲをひとつのオブジェクトとしてデザインし、浮遊培養地としても成立させる環境システムを提案する。そこで水草はクラゲの触手と見立てて培養し、それぞれ種から育てる場合と水草を直接取り付けの場合の 2 通りの方法で、クラゲを培養基盤としつつも、その中でどの

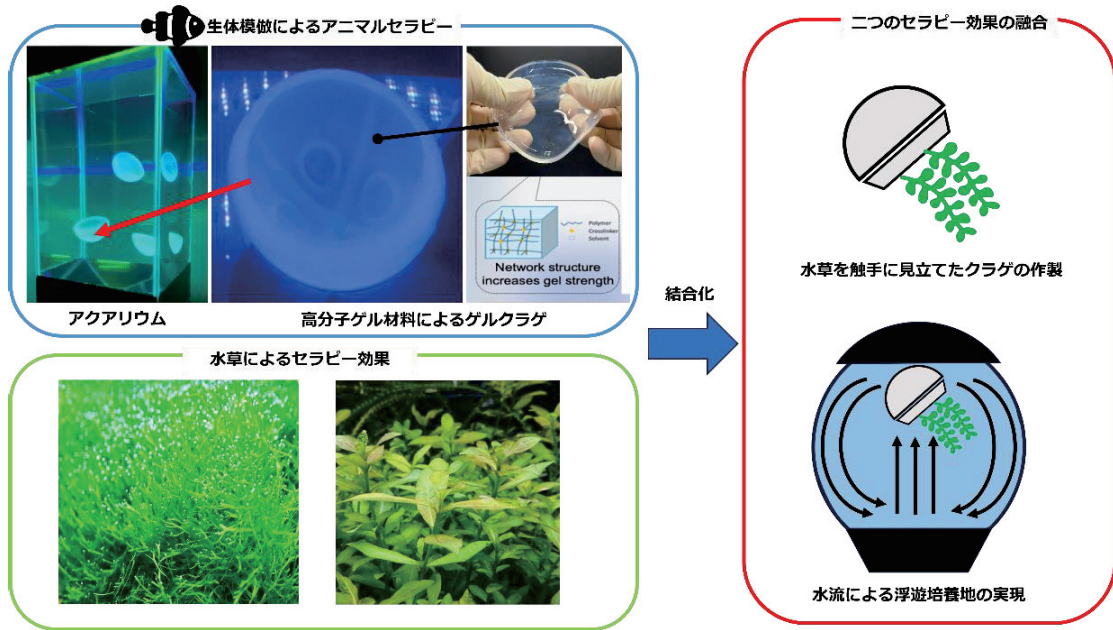


図 1. 本研究の概念図

ように生育されるかを検証する。ゲルクラゲ自体は実際のクラゲに似せており、かなり薄く造形してあるため、水草を意図した位置に取り付けることは困難である。しかし、ゲル製の部品を触手に見立ててゲルクラゲに取り付けることで、種と水草を取り付けやすくするとともに、触手をデザインすることで意図的なクラゲの遊泳誘導を引き起こす狙いをもつ。そのように作製したゲルクラゲを水槽内で膨潤させることで水草を発芽、または成長させることを目指す。

2. ゲルクラゲを利用した浮遊培養地の作製

2-1. 使用する水槽の概要

培養に使用する水槽の概要を示す。本研究ではクラゲを浮遊させるために強い水流を発生させることができる水槽を採用した。

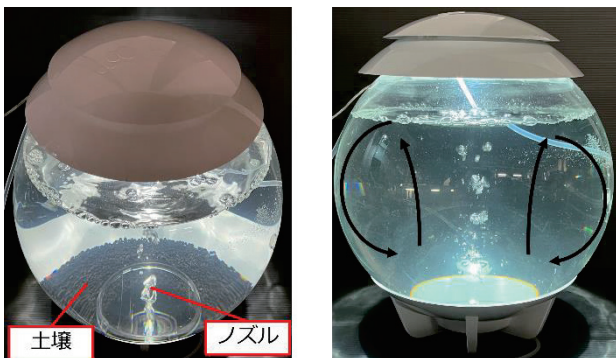


図 2. 本研究で使用する水槽

水槽の底には通常のアクリウムで扱うような土壌を敷いており、中央のノズルから空気が排出されるようになっている。図 2 に示すように、これにより水流が発生し円を描くように水は循環する。また、約 10 時間照明をつけ光合成を促すように設定した。そして作製したクラゲの培養地は膨潤させるとき、この水槽内で膨潤させるとす

る。このようにして水草を育てるのに適した環境の水分をゲルに吸収させることで水草により成長を促す。

2-2. 水草を直接植える形式の培養地作製

前述の通りクラゲに直接水草を植え付けることは困難であるため、その課題を解決に向けたゲルクラゲ改良および培地化の手順を本節で示す。

今回考案したのはゲルを硬化させて水草を取り付けやすくするために、穴の開いたゲルの造形物をクラゲ自体に取り付ける方法である。まず、ゲルを形作るためのシリコンを用意する。このシリコンを作製するためには型が必要であり、この型は FDM 方式の 3D プリンタ (X-Pro, QIDI Tech 社) を使用して PLA (ポリ乳酸) で造形した。この型にシリコン (Ecoflex™ 00-30) を流し入れ、シリコン型を作製する。図 3 に示す通りシリコン型にゲルクラゲと同じ組成のゲル溶液を流し込み、これを UV ライトと呼ばれる紫外線に当てることによって硬化させる。このようにして造形したゲルをクラゲに設置し、透明なゲル溶液を添加する。再び UV ライトで硬化させることによってクラゲに接着することができるようになる。4 つ接着し水草を穴に差し込む。今回使用した水草はウィローモスと呼ばれており、穴に設置したときに 15 mm になるようにあらかじめトリミングしたものである。これらを設置し終わら透明なゲル溶液を穴に添加する。このゲル溶液はほとんどクラゲの組成と同じだが硬化したときに白色にならないよう組成をわずかに調整したものである。UV ライトで硬化させ水草を固定することにより、培養地を完成させることができる。

2-3. 種を植える形式の培養地作製

種を植える実験では本来、図 3 で示したようなゲルと一緒に種を植えこむ方法もあるが、種は必ずすべてが発芽するとも限らないため、より多くの種を使用する必要が

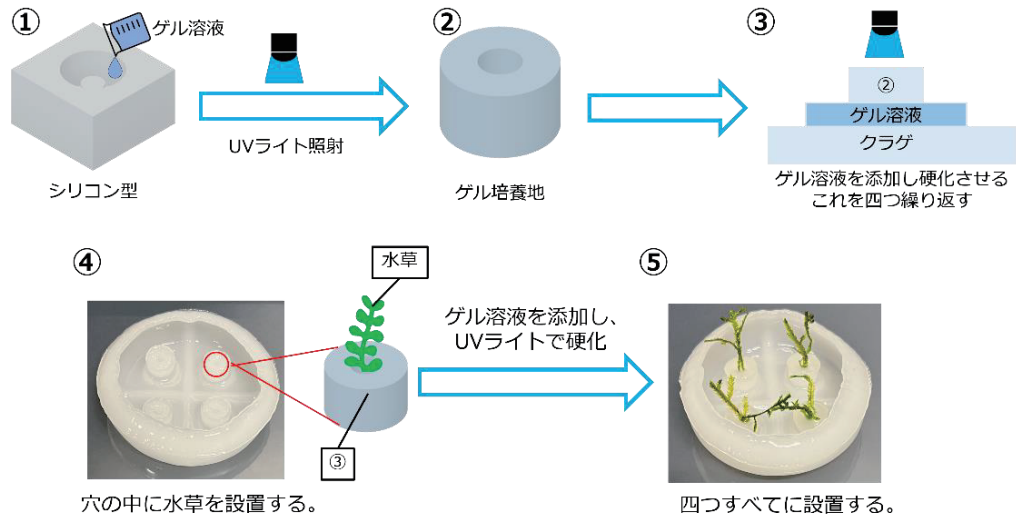


図 3. 水草を植えつける培養地の作製手順

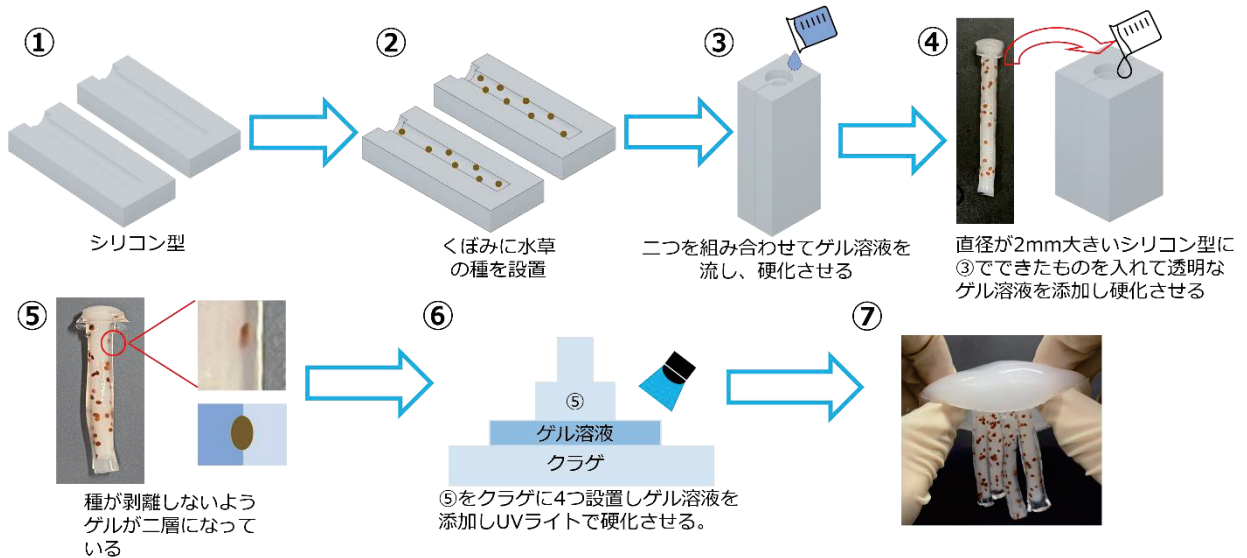


図 4. 種を植えつける培養地の作製手順

ある。そこで触手と見立てた長いゲルをクラゲに接着させ種をそこに植えつける方法を考案した。このようにすることで種を植える表面積を増加させることができ、より多くの種を使用し観察することが可能である。

今回作製するゲルは曲面が多く、長細いものを作製するためシリコンの型を作製する時点で高精度な造形をする必要がある。したがって、シリコンの型の造形にはより造形精度の高い SLA 方式の 3D プリンタ (Form3B+, Formlabs 株式会社) を使用して、材料は UV 硬化性樹脂 (Clear レジン, Formlabs 株式会社) を使用した。作製した型にシリコン (Ecoflex™ 00-30) を流し入れ、シリコン型を 2 個用意する。図 4 に示すように、用意したシリコン型のくぼみに種を設置する。種はハイグロフィラと呼ばれる水草を使用している。次にこれら 2 つを組み合わせ離れないよう固定し、そこにゲルクラゲと同じゲル溶液を流し込み UV ライトで硬化させる。このときシリコンの粘着力により種は下に落ちたり、剥離することはない。このようにして一点に種が集中するといったことを防ぐことができる。硬化させたゲルには種が表

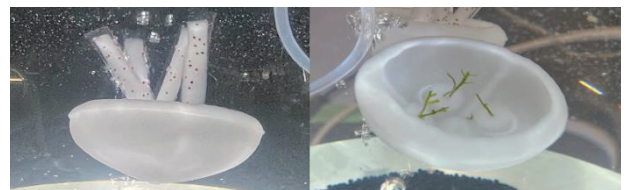


図 5. クラゲが水槽内で泳いでいる様子

面に付着した形となっており、そのまま水槽に入れると種が剥離してしまう。それを防ぐため 2mm ほど直径が大きいシリコン型を同様の方法で用意し、同じように組み合わせた穴の中に作製したゲルを入れる。そこに透明なゲル溶液を添加し、UV ライトで硬化させることでゲルの層を増やすことができ、種が剥離することを防ぐことが可能となる。透明なゲルを使用したのは水槽の照明をより照射させやすくするためのものである。これらを 4 つ作製し図 3 と同様にゲル溶液を添加して UV ライトで硬化させる。このようにしてクラゲと種が含まれる触手に見立てたゲルを接着させ、完成させることができる。

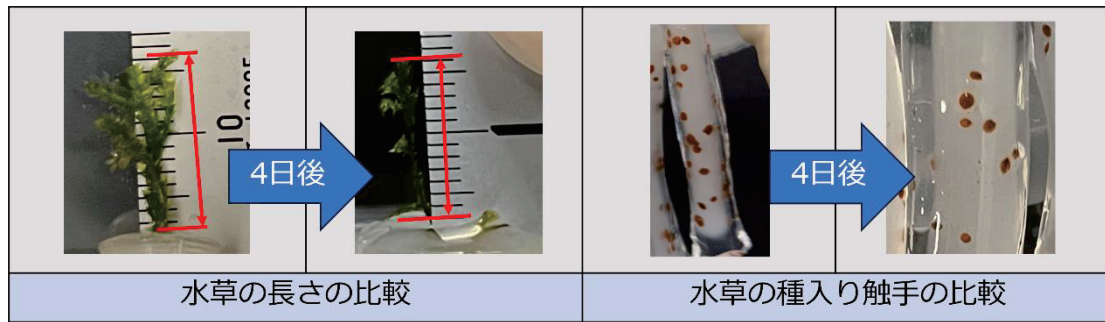


図 6. 膨潤前と膨潤から 4 日目の比較

3. 実験結果

水槽で十分に膨潤させた後、水槽の中で泳がせたまま水草と種に成長を促した。図 5 に示すようにクラゲは通常のクラゲと同じように泳ぐ姿を示した。軸に重さに耐えられず落下したままになるのではないかと懸念点もあったが、そのようなことにはならぬ見事な泳ぎを見せた。また、図 6 に示すように膨潤させてから 4 日目の時点では種のほうには大きな変化はなかった。ただ、触手の外側のゲルの透明度がかなり増していることからかなりの光の透過度を期待することができた。

次に水草を取り付けたクラゲだが、図 6 に示すように長さにはほとんど変化はなかった。中にはわずかに短くなっているものもあったが、この原因と考えられるのが今までゲルで埋め込まれていなかったところが膨潤させたことによって埋め込まれてしまったということである。このことから全体的に水草の成長はあまり観測されていない。

4. 考察

今回の研究では目立った変化を見ることができなかった。現時点では膨潤から 4 日目までしか観察することができなかったが、通常の方法で種が発芽するまでには通常 7 日から 14 日ほどかかることとされているため、ここからの観察も期待できる。また、さらに成長に適した環境にするためにはゲルの水分に関係があると思われる。今回使用しているクラゲの含水率は膨潤前が約 65%であり、膨潤後が約 95%である。現在はゲルの作製には純水を使用しているが、この代わりに水槽にも使用している土壌の栄養分が含まれている水をゲルの作製に使用することで、ゲルの水分の大部分を水草の成長を促すものに変更することができると思われる。

また、水草が十分に成長した際にはクラゲのビジュアルだけでなく動きの変化も期待できる。本研究では水草を触手に見立ててゲルクラゲを作製したので水中での挙動はさらに興味深いものになると思われる。具体的には、ゲルクラゲ自体は大きな動きは見せなくても一定の高さで漂っている状態で水草の触手部分が水流に対してなびくような挙動を示し、本物のクラゲの触手に近いような動きであれば、本物を再現すると同時に水草というイレギュラーな存在によって新たなセラピー効果の創造を期待できる。このためには水草がゲル上で成長する最適な環境を模索していくことが必要であり、これらを繰り返し改善していくことで実現可能となっていくだろう。

5. 結言

本研究ではゲルクラゲを使用した浮遊培養地の水草の成長の有無を検討した。従来のセラピーロボットでは本物に近い動きをすることによってアニマルセラピーを生み出すという手法だったが、この研究では本物を再現しつつアニマルセラピーの要素と植物のセラピー効果を培養という形で物理的に融合することを目的とした。

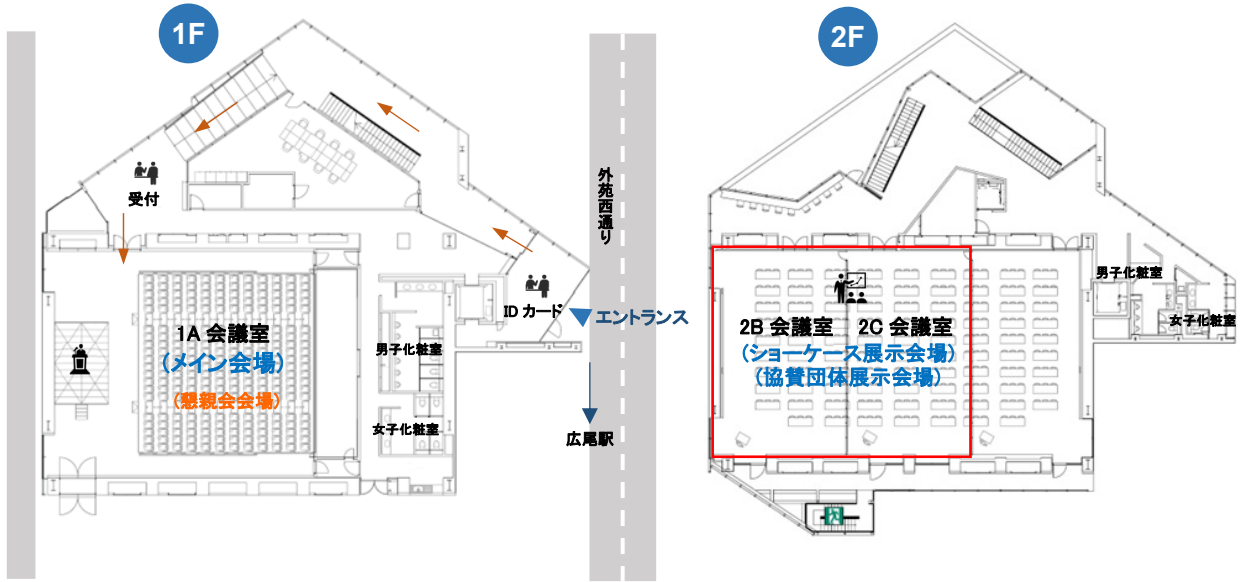
今回の研究の特徴はその融合を実現させるために水草をクラゲの触手と見立てて、種から育てる場合と水草をそのまま植える場合の 2 通りの方法で実験を行ったことである。ゲルによる造形物で本来組み合わせにくいクラゲと水草、種を組み合わせることに成功した。種の発芽や水草の長さの変化というものはあまり見ることができなかったが、光を透過しやすい透明なゲルの強い接着や水草自体が枯れることなく保持できたことなど今後につながる様々な成果が上げられた。

しかし、改善の余地は十分にあり水草とゲルの間の環境を試行錯誤して作り出すことで成長させることができるであろう。また、うまく成長につながれば新たな価値観の創造にも繋がると期待できる。本研究がそのような、セラピーという分野に新しい風を吹き込む第一歩となることを大いに期待している。

6. 参考文献

1. Saito, K., Ogawa, J., Watanabe, Y. M.D.Nahin Islam Shiblee, Furukawa H., "Mushroom cultivation and harvesting in media supported by 3D-printed anisotropic elastic structures. *Artif Life Robotics*, 2023.
2. Li Deng, Xi Li, Hao Luo, Er-Kang Fu, Jun Ma, Ling-Xia Sun, Zhuo Huang, Shi-Zhen Cai, Yin Jia, "Empirical study of landscape types, landscape elements and landscape components of the urban park promoting physiological and psychological restoration", *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 48, 2020,
3. Cracknell, D., White, M. P., Pahl, S., Nichols, W. J., & Depledge, M. H. "Marine Biota and Psychological Well-Being: A Preliminary Examination of Dose-Response Effects in an Aquarium Setting". *Environment and Behavior*, 48(10), 1242-1269. 2016.

現地会場案内
(ブリヂストングローバル研修センター)



4DFF2023大会実行委員会

実行委員長

湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

副実行委員長

藤井 雅彦 (慶應義塾大学SFC研究所/inkcube.org)

木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

実行委員 (五十音順)

青木 まゆみ (慶應義塾大学)

市原 政喜 (市原国際特許事務所)

上田 雄一 (JSR株式会社)

大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

古賀 洋一郎 (株式会社3D Printing Corporation)

高橋 茂樹 (山形大学)

竹内 達夫 (日本画像学会)

竹之内 崇 (三菱ケミカル)

常盤 拓司 (慶應義塾大学)

山岡 潤一 (慶應義塾大学)

予稿集発行日(予稿公開日)

2023年10月23日

(OP-13のみ10月30日公開)

4DFF2023公式サイト

<https://sig4dff.org/conference/2023/>



4DFF研究会



(一社)日本画像学会