

Conference on 4D and Functional Fabrication 2021

– New Paradigm over 3D Technology –

4DFF

2021年10月28日(木) 9:30 - 17:50

2021年10月29日(金) 9:30 - 17:35

オンライン開催

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

後援 画像関連学会連合会, やわらか3D共創コンソーシアム

Conference on 4D and Functional Fabrication 2021

~ New Paradigm over 3D Technology ~

Technical Program

10月28日(木)

09:30 - 09:40

Opening Remark

4DFF2021 大会実行委員長 渡邊 恵太 (明治大学)

09:40 - 11:20

Session 1

持続可能な社会の実現

座長: 山岡 潤一 (慶應義塾大学)

09:40 - 10:10

招待講演

- IN-01** 消費者回収材料からの 3D プリント量産プロセスの実現
~東京 2020 オリンピック・パラリンピックの 3D プリント表彰台製作を通して~
湯浅 亮平¹, 野老 朝雄², 平本 知樹³, 江口 壮哉¹, 田中 浩也¹
(¹慶應義塾大学, ²TOKOLOCOM, ³株式会社 wip) 3

10:10

- OP-01** リサイクル可能なフットウェアのための 3D プリント設計と組立方法の検討
増田 恒夫¹, 浅野 義弘¹, 宮田 知起², 奥野 雅大³, 益山 詠夢¹, 田中 浩也¹
(¹慶應義塾大学, ²株式会社 ORPHE, ³ラピセラ株式会社) 13

10:30

- OP-02** 再生プラスチック材料を用いた 3D プリント椅子・ベンチの設計と製造実証
益山 詠夢¹, 大木 智博², 田中 浩也¹
(¹慶應義塾大学, ²東京エコリサイクル株式会社) 17

10:50

- OP-03** 海洋生分解性プラスチックの特徴を活かした, 新たな 3D プリントプロダクトの可能性
安宅 純音¹, 滑川由記¹, 濱崎トキ², 山崎周一³, 田中浩也¹
(¹慶應義塾大学, ²株式会社 Boolean, ³株式会社ネクアス) 21

11:10

Session 1 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

11:20 - 11:50

Session 2

価値創造のためのツール製作と活用

座長: 木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

11:20

- OP-04** 誰でもできる「用途要件・塗布材料に合わせた, カスタマイズ IJ プリントヘッド」作り
平林 純 (山形大学) 25
- OP-05** **Withdraw** 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立体物表面への加飾印刷
戸野 愛深 (法政大学)

11:40

Session 2 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

13:05 - 14:45

Session 3

新規構造デザインと造形・建築

座長: 田中 浩也 (慶應義塾大学)

13:05 - 13:35

招待講演

IN-02 未来の窓を考える「未来をひらく窓—Gaudí Meets 3D Printing」

鈴木 啓太¹, 菊池 彩乃², 田中 浩也³

(¹PRODUCT DESIGN CENTER, ²YKK AP 株式会社, ³慶應義塾大学) 5

13:35

OP-06 3D プリンティング材料のための構成モデルの音響キャリブレーション法

钟 圣泽, プンボンサノン パリンヤ, 岩井 大輔, 佐藤 宏介

(大阪大学) 29

13:55

OP-07 苔を活かした日本型「土」3D プリンティングによる社会環境彫刻の試み

松木 南々花¹, 名倉 泰生², 知念 司泰¹, 大村 まゆ記¹, 田中 浩也¹, 青木 竜太³, 青山 新³, 伊藤 光平⁴

(¹慶應義塾大学, ²慶應義塾大学大学院, ³METACITY, ⁴株式会社 BIOTA) 33

14:15

OP-08 双安定なキリガミ構造による曲面設計手法

豊岡 龍弥, 舘 知宏

(東京大学) 37

14:35

Session 3 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

14:45 - 16:15

Session 4

使い易さのための I/F, 評価, モデル

座長: 藤井 雅彦 (inkcube.org)

14:45

OP-09 視線入力アプリで 3D プリンタを操作することで DTM 機器を演奏する研究

濱中 直樹¹, 大友 高行², 林 園子¹, 鈴木 ゆかり³, 梶山 紘平⁴

(¹慶應義塾大学 SFC 研究所, ²東海大学, ³ファブラボ宮崎 β, ⁴無所属) 41

15:05

OP-10 ゲルプリンティングにおける熟練者技能の継承に向けたアイトラッキング動画解析

落合 俊樹¹, 渡邊 洋輔², 小川 純², 川上 勝², エムディナヒン イスラム シブリ²,

アジット コースラ², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 43

15:25

OP-11 複数の高分子材料を組み合わせた触覚認知モデル

廣瀬 航佑¹, 渡邊 洋輔², 小川 純², エムディ ナヒン イスラム ジブリ², アジット コースラ²,

川上 勝², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 47

15:45

OP-12 3D スキャンを可能とするゲルの表面修飾法の検証

鈴木 康海¹, 渡邊 洋輔², 小川 純², エムディ ナヒン イスラム ジブリ², アジット コースラ²,

川上 勝², 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院) 51

16:05

Session 4 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

16:15 - 17:45

Session 5

価値創造のためのマテリアルデザイン

座長: 高橋 茂樹 (山形大学)

16:15

OP-13 3D Print 造形物と繊維構造体によるコンポジット複合材

沼田 みゆき¹, 増田恒夫², 児嶋大世¹, 山中克浩¹, 宮本正教¹, 青木まゆみ², 田中浩也²

(¹ 帝人株式会社, ² 慶應義塾大学) 55

16:35

OP-14 バイメタルを使用した熱誘起相転移を示す格子構造の創製

永山 隼, 鐘ヶ江 壮介, 奥川 将行, 小泉 雄一郎

(大阪大学大学院) 59

16:55

OP-15 菌糸と生分解性プラスチックを複合した多孔質構造体の可能性

知念 司泰¹, 鳥居巧¹, 名倉泰生², 田中浩也¹

(¹ 慶應義塾大学, ² 慶應義塾大学大学院) 61

17:15

OP-16 安全性向上に向けた高分子光開始剤の開発

竹田 賀美, 小林 大輔, 清貞 俊次

(KJ ケミカルズ株式会社) 65

17:35

Session 5 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

17:45 - 17:50

大会実行委員会からの連絡

10 月 29 日(金)

09:30 - 09:35

大会実行委員会からの連絡

09:35 - 11:15

Session 6

社会実装にむけた取り組み

座長: 常盤 拓司 (慶應義塾大学)

09:35 - 10:05

招待講演

- IN-03** 日本初 3DP を活用したフルカスタマイズ製造 - 3DP による大量生産がもたらす全く新しい製造-
古賀 洋一郎 (3D Printing Corporation) 11

10:05

- OP-17** 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
臼井 昭子¹, 登本 洋子², 櫻井 佑真³, 渡邊 洋輔⁴, 古川 英光⁴
(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 東京学芸大学大学院, ³ 山形大学, ⁴ 山形大学大学院) 67

10:25

- OP-18** 3D プリントソフトウェアを活用した市民参加型ワークショップの実践
鎌倉市における実証実験「データワーク@かまくら」を通じて
浅野 義弘¹, 中山 秀樹², 宮田 知起³, 奥野 雅大⁴, 増田 恒夫¹, 守矢 拓海¹, 田中 浩也¹
(¹ 慶應義塾大学大学院, ² 鎌倉市共生共創部, ³ 株式会社 ORPHE, ⁴ ラピセラ株式会社) 71

10:45

- OP-19** 都市における多様な居方・振る舞いに対応した大型メタマテリアル構造体の設計と製造
矢崎 友佳子, 有田 悠作, 加藤 陸, 田中 浩也 (慶應義塾大学) 75

11:05

Session 6 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

11:15 - 12:25

Session 7

価値創造のための FAB プロセス提案(1)

座長: 大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

11:15

- OP-20** **Withdraw** UV プリンタを用いた布の自己折りにおける折り目幅と折り角の関係性
小山 和紀 (東京大学大学院)

11:35

- OP-21** ダイヤモンド格子型のジョイントシステムの提案
木島 風沙, 舘 知宏 (東京大学) 79

11:55

- OP-22** 食品 3D プリンタの材料押し出しスクリューの形状最適化
一森 湧¹, 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム ジブリ², アジット コースラ², 小川 純²
川上 勝², 古川 英光² (¹ 山形大学, ² 山形大学大学院) 83

12:15

Session 7 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

13:20 - 14:10

基調講演

座長: 渡邊 恵太 (明治大学)

KN-01 「ロボット・イノベーションが導く変革」 - 不完全さの中にこそ、進化の種がある

竹中 司

(アンズスタジオ/アットロボティクス) 1

14:10 - 15:20

Session 8

価値創造のための FAB プロセス提案(2)

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

14:10

OP-23 造形可能な溶液粘度領域の拡張を目指した 3D ゲルプリンタの開発櫻井 佑真¹, 渡邊 洋輔², 川上 勝², エムディ ナビン イスラム ジブリ², 小川 純²,アジット コースラ², 古川 英光²

(1 山形大学, 2 山形大学大学院) 87

14:30

OP-24 イオン液体ゲルを用いたキャパシタの 3D プリンティング小林 竜也¹, 渡邊 洋輔², アジット コースラ², 川上 勝², エムディ ナビン イスラム ジブリ²小川 純², 古川 英光²

(1 山形大学, 2 山形大学大学院) 91

14:50

OP-25 ExpandFabric: 熱膨張素材の添付による布の形状加工の基礎検討

開元 宏樹, 寛 康明

(東京大学) 95

15:10

Session 8 オーサーズインタビュー(インタビュールームは zoom 画面下に表示)

15:20 - 15:35

4DFF 研究会協賛団体活動紹介

15:35 - 15:55

ショーケース: 動画による研究成果紹介

--- ここからのセッションは oVice 会場にて実施します ---

15:55 - 16:50

ショーケース: 研究成果発表と議論

<https://sig4dff2021.ovice.in/lobby/enter>**SC-01** 泡構造 3D プリンティングによる触感と光の同時制御

中村 亮太, 大平 麻以, 田中 浩也

(慶應義塾大学) 99

SC-02 Crystal Deposition Printing: 結晶析出を用いた 3D プリンタ造形物のポストプロセスの探求大村 まゆ記¹, 荒井 将来², 田中 浩也¹

(1 慶應義塾大学, 2 慶應義塾大学大学院) 103

SC-03 トレーシングペーパーの吸湿変形のための表現メディア装置の要件の検討

高橋 明日香, 渡邊 恵太

(明治大学) 107

SC-04 大型 3D プリンターでのワイヤープリントを用いた葉脈の表現と新しい傘の模索

坂田 拓人, 阿部辰海, 滑川由記, 松岡康友, 田中浩也

(慶應義塾大学) 111

SC-05 **Withdraw** ドローンの気圧を活かした布の空中展開の探求と、ファッションデザインへの応用

松本 夕祈

(慶應義塾大学)

SC-06 3D プリンタによるポリウレタンフォーム特性の再現と自動車用シートへの適用

板橋 大一¹, 高橋 佳之¹, 岡崎 太祐², 浅野 義弘²

(¹株式会社ブリヂストン, ²慶應義塾大学大学院) 115

16:50 - 17:20

Lightning Talk

司会: 青木 まゆみ (慶應義塾大学)

<https://sig4dff2021.ovice.in/lobby/enter>

17:20 - 17:35

各賞受賞者発表 & Closing Remark

4DFF2021 大会副実行委員長 藤井 雅彦 (inkcube.org)

<https://sig4dff2021.ovice.in/lobby/enter>

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** Yamagata University 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/>

講演者紹介

基調講演



竹中 司 (アンズスタジオ / アットロボティクス 代表取締役)

武蔵野美術大学修士課程修了後、同大学助手、講師を経て、2005-2008 年、ブリティッシュコロンビア大学大学院客員講師。現在、慶応義塾大学及び東京藝術大学 大学院講師(非常勤)。2009 年、世界に先駆けてコンピューショナル・デザインのスタジオ「アンズスタジオ」を岡部文と共同設立。2016 年、ロボットを活用した DX 技術を実践する「アットロボティクス」を設立、同代表取締役を務める。コンピュータとロボットを自由に且つ繊細に扱いながら、手の仕事を越えた新しい時代の「豊かさ」を創造する活動に取り組んでいる。

招待講演



湯浅 亮平 (慶應義塾大学 環境情報学部 特任助教)

『フィラメント工房 by KYORAKU Co., Ltd.』の 3D プリンタ用フィラメント開発プロジェクトで、自動車部品や食品・医療用材料のノウハウをフィラメント開発に活かし、3D プリンタの可能性を広げている。「SMP:形状記憶ポリマー」「PPCF:炭素繊維強化ポリプロピレン」「ノズル詰まり予防に効果的なパージフィラメント」等の開発に従事。4DFF(4D and Functional Fabrication)研究会メンバー



鈴木 啓太 (PRODUCT DESIGN CENTER 代表)

プロダクトデザイナー、クリエイティブディレクター。1982 年生まれ。多摩美術大学プロダクトデザイン専攻卒業。PRODUCT DESIGN CENTER 代表。古美術収集家の祖父の影響で、幼少より人が織りなす文化や歴史に興味を持つ。森林活用から都市環境、伝統工芸から 3D プリンティングなどのアディティブ・マニファクチャリングまで、幅広い分野に精通。美意識と機能性を融合させたデザインで、国内外でプランニングからエンジニアリングまでを手掛ける。2008 年「TOKYO MIDDTOWN AWARD」受賞、2016 年「HUBLOT DESIGN PRIZE」初のアジア人ファイナリスト、2018 年初個展「鈴木啓太の線:LINE by Keita Suzuki」を柳宗理記念デザイン研究所で開催、2019 年「相模鉄道 20000 系」が「ローレル賞 2019」受賞、2020 年「ELLE DECOR Young Japanese Design Talent」受賞等。2015-2017 年グッドデザイン賞 最年少審査委員。

菊池彩乃 (YKK AP 株式会社)

「未来をひらく窓—Gaudi Meets 3D Printing」 企画担当者)



古賀 洋一郎 (株式会社 3D Printing Corporation 最高技術責任者)

株式会社 3D Printing Corporation 最高技術責任者
東京工業大学で 3D プリントカーボン複合材に関する研究の博士号を取得。国内のカーボン複合材を使用する 3D プリントの設計標準化組織で中心的な存在となっている。4DFF(4D and Functional Fabrication)研究会メンバー。

「ロボット・イノベーションが導く変革」 – 不完全さの中にこそ、進化の種がある

竹中 司^{1,2}

Tsukasa TAKENAKA

¹株式会社アンズスタジオ, ²株式会社アットロボティクス

¹AnS Studio, ²aT ROBOTICS

消費者回収材料からの 3D プリント量産プロセスの実現 ～東京 2020 オリンピック・パラリンピックの 3D プリント表彰台製作を通して～

The process of 3D printing mass products from post consumer recycled materials.
Through the production of 3D printed podiums for the Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games

湯浅亮平¹, 野老朝雄², 平本知樹³, 江口壮哉¹, 田中浩也¹

Ryohei YUASA¹, Asao TOKOLO², Tomoki HIRAMOTO³, Soya EGUCHI¹, Hiroya TANAKA¹

¹慶應義塾大学, ²TOKOLOCOM, ³株式会社 wip

¹Keio University, ²TOKOLOCOM, ³wip inc.

【要約】

東京 2020 オリンピック・パラリンピックでは、世界で初めてリサイクル材料を活用した 3D プリントにより表彰台が製作された。本プロジェクトではコンセプト立案段階から製造に至るまで、さまざまな課題が有機的に関連するなか、各段階にて 3D プリント技術が大いに活用された。このセッションでは、主に慶應義塾大学 SFC 研究所による 3D プリントによる表彰台開発過程の以下の内容について技術的側面を解説する。

- ・材料回収改質: 消費者から集められたリサイクル材料から 3D プリント材料を制作する過程について
- ・デザインエンジニアリング: 野老朝雄氏が考案した幾何学的デザインの立体化および、FGF 方式の 3D プリントで実現するための製造データの製作過程について
- ・製造: 数千個にのぼる表彰台パーツの量産を行うために特別に開発された”3D Plant”について

最後に、このプロジェクトを通して浮かび上がった日本発の新しい資源循環コンセプト”リープサイクル”の展望について触れる。

キーワード: マテリアルリサイクル 3D プリント製造 デザインエンジニアリング G-code 資源循環

未来の窓を考える「未来をひらく窓—Gaudí Meets 3D Printing」

Thinking of Futuristic Windows “Window on the Future—Gaudí Meets 3D Printing”

鈴木 啓太¹, 菊池 彩乃², 田中 浩也³

Keita SUZUKI¹, Ayano KIKUCHI², Hiroya TANAKA³

¹PRODUCT DESIGN CENTER, ²YKK AP 株式会社, ³慶應義塾大学

¹PRODUCT DESIGN CENTER, ²YKK AP Inc., ³Keio University

【要約】

YKK AP 株式会社は、デザイナー鈴木啓太氏 (PRODUCT DESIGN CENTER) とともに、世界的に著名な建築家アントニ・ガウディの窓に着想を得て、自然環境と呼応する様々な機能や造形を持つ、3D プリンタでつくる新しい窓のプロトタイプデザインを2021年10月15日(金)から11月3日(水・祝)まで、東京ミッドタウンで開催する「未来をひらく窓—Gaudí Meets 3D Printing」にて展示します。今回は、この展示を出発点として、本展クリエイティブディレクター鈴木啓太氏と学術協力者・田中浩也氏(慶應義塾大学環境情報学部教授)とともに、未来の窓・開口部の可能性を議論します。

キーワード: 3D プリンティング, 窓, 開口部, 建築, 自然, ガウディ, 素材, 機能, デザイン

未来をひらく窓—Gaudí Meets 3D Printing

Window on the Future—Gaudí Meets 3D Printing

[会期 Dates] 2021年10月15日(金)～11月3日(水・祝)20日間

Friday, October 15 – Wednesday, November 3, 2021 (public holiday)

[会場 Venue] 東京ミッドタウン ガレリア B1 アトリウム(東京・六本木)

Galleria B1 Atrium, TOKYO MIDDTOWN (Roppongi, Tokyo)

[入場料 Admission] 無料(予約不要)Free (No reservation needed)

[主催・企画 Organizer] YKK AP 株式会社 (YKK AP Inc.)

[特設サイト Website] <https://www.ykkap.co.jp/consumer/satellite/sp/window-future/>

[特設 Instagram] @windowonthefuture

[同時出展 Parent event] Tokyo Midtown DESIGN TOUCH 2021 / DESIGNART TOKYO 2021

[特別協力 Special Collaboration] カサ・バトリヨ, カサ・ミラ, カサ・ビセンス, グエル邸, グエル公園—バルセロナ市・バルセロナ市歴史博物館 (Casa Batlló, Casa Milà, Casa Vicens, Palau Güell—Diputació de Barcelona, Park Güell—Ajuntament de Barcelona and Barcelona History Museum)

[後援 Support] スペイン大使館 (Embassy of Spain)

[協賛 Sponsors] 前田建設工業株式会社 ICI 総合センター, MOLp® by 三井化学, AGC セラミックス株式会社 (MAEDA CORPORATION ICI General Center, MOLp™ (Mitsui Chemicals Material Oriented Laboratory), AGC Ceramics Co., Ltd.)

【展示内容】

窓は、近代以降工業化によって規格化され、大量生産、高性能・高機能化が進み、私たちの快適な住職環境の向上に貢献してきました。一方で、生産効率のため直線形状の窓が多くを占め、職人の手仕事でつくられていた自由で複雑な造形をもつ窓は少なくなりました。YKK AP は「Architectural Products で社会を幸せにする会社。」というパーパスに基づき、窓が建築や人々の生活をより自由に、より幸せにすることを目指し、日々窓を考えています。本展「未来をひらく窓—Gaudí Meets 3D Printing」では、建築家アントニ・ガウディの自由な造形の窓や環境への配慮、共創の精神に着想を得て、世界遺産「カサ・バトリヨ」や「カサ・ミラ」などのガウディ建築の協力のもと、自然環境と呼応する様々な機能や造形を持つ、最新 3D プリンティング技術でつくる新しい窓のプロトタイプデザインを発表します。「ガウディが現代の最先端 3D プリンティング技術に出逢ったら」という視点で、過去の良質なデザインを生かし、未来の窓について考える取り組みです。

[Exhibition]

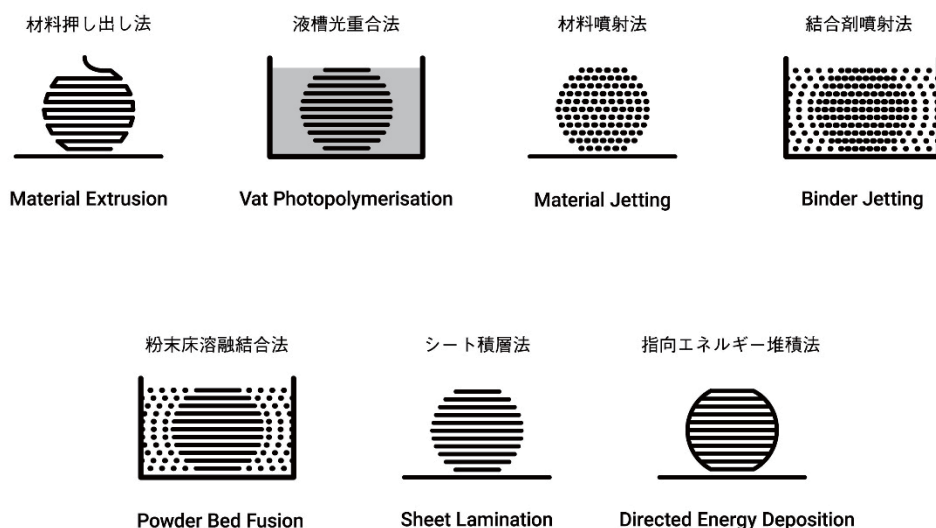
Since the advent of modern industrialization, windows have been standardized, mass-produced, and continually refined to provide higher performance and functionality. While these developments enabled the creation of airy openings freed from structural constraints, the universalization of glass curtain-wall skyscrapers, and the drastic improvement of residential and office environments, the free and complex forms of the handcrafted windows fashioned by premodern artisans have become ever rarer, replaced by the rectilinear injection- and extrusion-molded window systems that now define the boundaries of most architectural spaces. Keeping true to our purpose, “We build a better society through architectural products”, we at YKK AP are always thinking of ways to make new windows that can bring more freedom and happiness to architecture and to people’s everyday lives. Realized through a special collaboration with Gaudí-designed UNESCO World Heritage Sites such as Casa Batlló and Casa Milà, this exhibit, titled Window on the Future—Gaudí Meets 3D Printing, showcases prototypes of novel 3D-printed windows which have been designed with various forms and functions that resonate with the natural environment, taking inspiration from the free-form windows of architect Antoni Gaudí and his spirit of cocreation. Through asking ourselves, “What would Gaudí have done with the latest 3D printing technology?”, we have built on the inspired designs of the past to contemplate the future of windows.

学術協力・テキスト： 田中浩也 (慶應義塾大学環境情報学部教授)

Academic Support and Text: Hiroya Tanaka (Professor, Keio University)

3D プリンティングとは

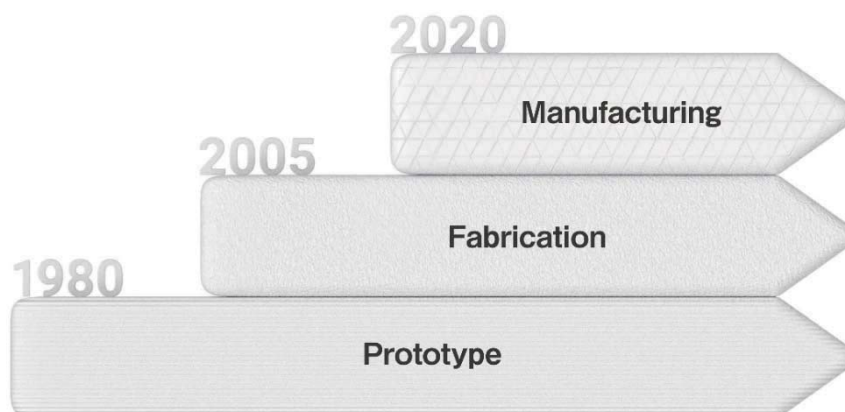
What is 3d Printing?



「3D プリンティング」という用語は広く用いられているが、正式な名称は Additive Manufacturing (AM: 付加製造)である。その定義は「3D モデルデータを基に、材料を結合して造形物を実体化する加工法」であり、方式として、液槽光重合法(Vat Photopolymerisation), 材料噴射法(Material Jetting), 結合剤噴射法(Binder Jetting), 粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion), シート積層法(Sheet Lamination), 材料押し出し法(Material Extrusion), 指向エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition) の7つが存在している。それぞれが、プラスチック、金属、コンクリート、セメント、セラミック、ガラス、食品、細胞などの素材と結びついている。

The term “3D printing” has come to be widely used, but the technical name for the technology is “additive manufacturing” (AM). It is defined as “a manufacturing method for actualizing objects by combining materials based on 3D modeling data”, and there currently exist seven methods of AM: vat photopolymerisation, material jetting, binder jetting, powder bed fusion, sheet lamination, material extrusion, and directed energy deposition. Each is associated with specific materials, such as plastic, metal, concrete, cement, ceramic, glass, food, and cells.

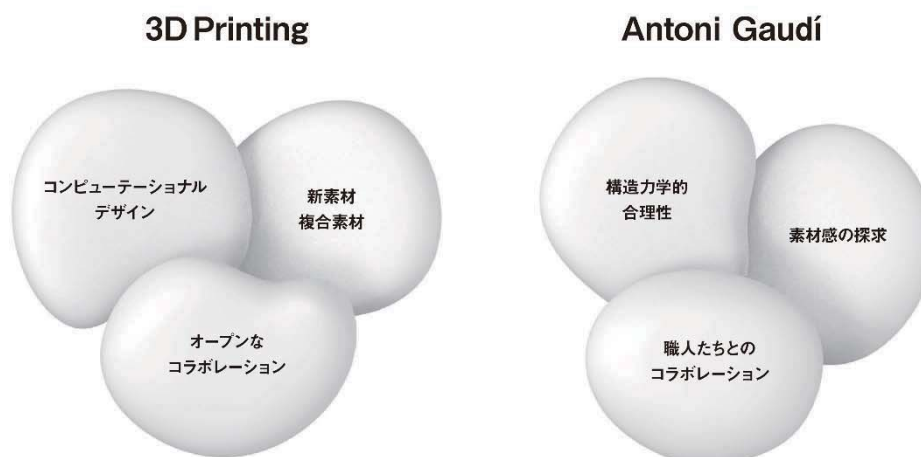
3D プリンティングの歴史 This History of 3d Printing



1980 年代から 1990 年代にかけ、企業によるものづくりの「高速な試作(ラピッド・プロトタイプング)」を目的として誕生したこの技術は、2005 年前後を境に、小型化された卓上機械として大きく社会に普及した。この結果、企業のみならず個人のものづくりにも広く活用されるようになった。「メイカームーブメント」が生まれ、市民工房「ファブラボ」等が各地に設立された。しかし依然として、速度・強度・品質等の課題があり、その用途の多くは特定個人かコミュニティに限定されたもの(ファブリケーション)でもあった。しかし 2010 年代の研究と技術進化により課題点が徐々に克服され、最終的な「製品」を直接製造する(マニファクチャリング)までに到達してきている。大量生産品と異なり、ひとつひとつがすべて異なる製品をつくることができるため、その特徴を活かすものとして、靴・乗り物・建築などの分野で製品販売されている例が存在する。

This technology, which emerged in the 1980s to 1990s for the purpose of enabling rapid prototyping in corporate manufacturing, began to spread extensively when compact desktop machines became available around 2005. As a result, it was adopted widely by not only companies but also individuals, and it became the driving force behind the “maker movement” and citizen workshops, or “fab labs”, that were established in a variety of places. Yet, issues remained with its printing speed, strength, and quality, and it was still mostly only used for fabrication by a particular demographic of individuals and communities. However, these issues were gradually resolved by research and advancements during the 2010s, and the technology has now reached the point where final products can be directly manufactured. Unlike with mass production, 3D printing allows products to be individually customized, and there exist examples of products being sold in the footwear, automobile, and architecture industries by capitalizing on this characteristic.

3D プリンティングに宿るガウディの精神 Carrying On Gaudí's Spirit Through 3d Printing



3D プリンタは過去 10 年、大きく3つの要素と結びつくことで可能性を広げてきた。一つ目は、コンピューテーショナルデザインである。計算による表現を物質に直接具現化できるようになった。二つ目は、新素材や複合素材である。扱うことのできる素材の種類が増え、表現を加えることができるようになった。三つ目は、オープンなコラボレーションである。異なる立場の人間が参加し、「もの」をつくりながら、共創のコミュニティを育てていくことが日常化した。実はこの3つはすべてガウディに繋がっている。コンピューテーショナルデザインのルーツのひとつは構造力学的合理性を探究したガウディの「逆さ吊り実験」である。ガウディが光の陰影や周辺環境との呼応を含め「素材感」を大切にしたこと、また職人はじめさまざまなコラボレーションを続けたことはとてもよく知られた事実である。3D プリンティングは、ガウディの精神を宿しながら、日々進化していると言えるのかもしれない。

Over the past decade, 3D printers have expanded their potential through being coupled with three major elements. The first is computational design. One can now directly give material form to computationally generated designs. The second is new and composite materials. The greater variety of materials that are now compatible with 3D printers allows for a wider range of expression. The third is open collaboration. It has become commonplace for people of different backgrounds to build co-creative communities through working together on making things. As it happens, all three of these elements can be connected to Gaudí. One of the roots of computational design lies in Gaudí's inverted hanging models, which he used for exploring the structural rationality of his designs. It is also a well-known fact that Gaudí gave careful consideration to the materiality of his work in relation to light, shadows, and the surrounding environment, and that he constantly collaborated with various people, such as artisans. One could thus say that Gaudí's spirit is being carried on through 3D printing as it continues to evolve day by day.

3D プリンティングと建築

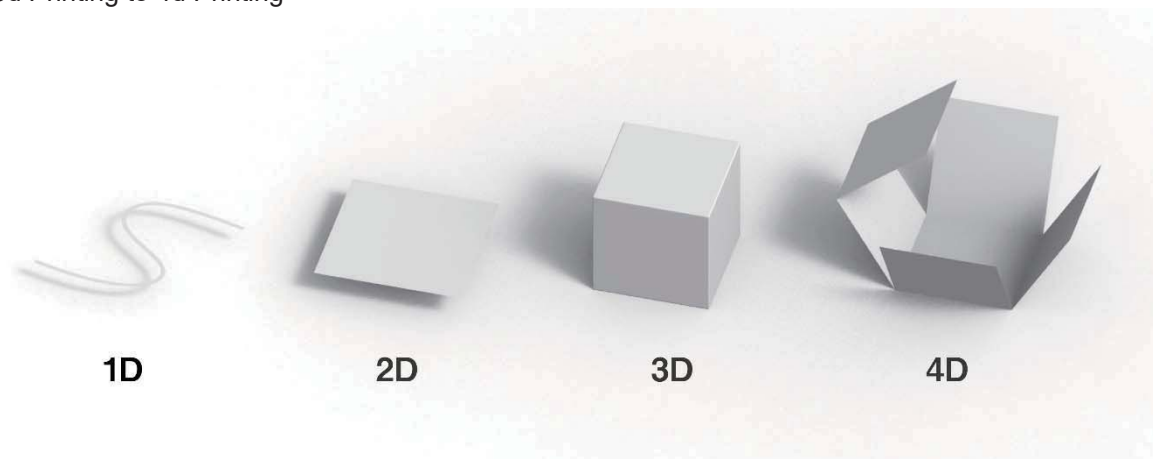
3d Printing and Architecture



3D プリンタと建築の関係は、建築全体を 3D プリントしようとするもの（材料はコンクリートや土、プラスチックなど）と、建築の一部（屋根、ファサード、パーティションなど）を 3D プリントでつくろうとするものに分かれる。前者の場合、デザイン的な特徴として、外形が丸みを帯びた曲面であるものが多く存在する。これは、大型 3D プリンタの造形方式上の制約で直角コーナーを出すのが困難であることから来ているが、逆に言えば、従来の型枠によるコンクリート表現とはまったく異なる形態言語が開拓される可能性がある。また、積層痕と呼ばれる造形過程の痕跡が見られるが、これを意匠としてそのまま活用しようとする工夫も近年多くみられる。後者の場合は、コンピューテーショナルデザインと新素材の力を結び付け、従来ではありえなかったような新機能（音響効果、通気性効果、調湿効果、光の拡散効果など）を生み出そうという例が多く、本展に通じている。

3D printers are used in architecture in two ways: to print entire buildings (using materials such as concrete, earth, and plastic) and to print parts of buildings (roofs, facades, partitions, etc.). Examples of printed buildings are often identifiable by their rounded forms and curved surfaces. While these features can be attributed to operational constraints of large-scale 3D printers that make right-angled corners difficult to form, one could alternatively consider this limitation as an opportunity for forging new formal languages that depart from that of conventional formwork-based concrete construction. Similarly, while 3D printed objects are marked with striations known as layer lines during the printing process, many ideas have been devised in recent years to incorporate these marks into designs. Examples of printed building parts often embody attempts to combine the power of computational design and new materials to produce new functions (e.g. acoustic effects, ventilation, humidity control, light diffusion, etc.) that were impossible using conventional means, as is the case with the windows of this exhibit.

3D プリンティングから 4D プリンティングへ From 3d Printing to 4d Printing



現在「4D プリンティング」という分野が立ち上がろうとしている。これは、3D プリントした物質が、なんらかの環境の変化やエネルギーを受けて、形状を変形させたり運動するものである。別の言い方をすれば「電気を使わないで、ものの形を静かに変えること」がこの分野では探求されており、これまでの自動車やロボットのような「モーター」で動く機械的な変形と比べて、パワーは小さくても、花が持つ繊細で有機的な美しい開花の変形や、寒暖差で自動開閉する窓の変形などが可能となる。この動作に電気は使用しない。省エネ化を進めながら、自然に調和的な未来に向かうための新しい道筋を探索しているのだ。もし、ガウディが現代に生きていたら、この技術をどのように創作に取り込んだだろうか？ 今回の展示から、新しい想像力を獲得することもできるだろう。

Currently, there is a new field emerging called “4D printing”. It deals with making 3D-printed materials that transform or move when subjected to environmental changes or energy input. Put differently, the field is exploring ways to make things that can quietly transform without using electricity. While not as powerful compared to the motorized operations of automobiles and robots, the technology enables things such as windows to transform delicately, organically, and beautifully like flower petals or open and close automatically based on the temperature, all without the aid of electric power. It looks to forge a new path for realizing a future that is harmonious with nature while reducing energy use. If Gaudí were alive today, how would he have incorporated this technology into his work? This exhibit offers ideas of what he may have created.

日本初 3DP を活用したフルカスタマイズ製造
- 3DP による大量生産がもたらす全く新しい製造 -
Japan's first fully customized manufacturing by 3D Printing Technology
-A noble value by 3D Printing mass customization-

古賀 洋一郎

Yoichiro KOGA

株式会社 3D Printing Corporation

3D Printing Corporation Co., Ltd.,

【要約】

3D プリントが少数生産やカスタマイズに有効な製造法であることが言われる一方で、カスタマイズ量産いわゆるマスカスタマイゼーションは経済的に持続可能な手段ではなかった。マスカスタマイゼーションという新しい製造システムを受け入れるにはサプライチェーンが未成熟だったことが原因であった。3D Printing Corporation (3DPC)は 3D プリント技術の活用を前提とした抜本的な製造工程の再構築により、製品全体をカスタマイズ化するフルカスタマイズ品の量産化に成功した。フルカスタマイズ製品の量産は全ての顧客にリーズナブルな価格でカスタマイズ品を提供するという比類ない製品価値を提供するだけでなく、従来品より優れた経済性の獲得、短納期化、工程管理のデジタル化に成功している。本講では、日本初の 3D プリントマスカスタマイゼーションを達成した中で体験した課題と実際の効果について報告する。

キーワード: 3D, カスタマイズ製造, マスカスタマイゼーション, DX(デジタルトランスフォーメーション), 製造工程統合

【Abstract】

While it is said that 3D printing is an effective manufacturing method for small-lot production and customization, customized mass production, so-called mass customization, has not been an economically sustainable means. The cause was that the supply chain was immature to accept the new manufacturing system called mass customization. 3D Printing Corporation (3DPC) has succeeded in mass-producing fully customized products that customize the entire product by radically restructuring the manufacturing process on the premise of utilizing 3D printing technology. Mass production of fully customized products not only provides unparalleled product value of providing customized products to all customers at a reasonable price, but also provides better economic efficiency, shorter delivery time, and better process control with digital transformation. We report on the issues and actual effects experienced while achieving Japan's first 3D print mass customization.

Keywords: 3D, customized manufacturing, mass customization, DX (digital transformation), manufacturing process consolidation

リサイクル可能なフットウェアのための 3D プリント設計と組立方法の検討

Proporsal of design and assembly methods for recyclable 3D-printed footwear

増田 恒夫¹, 浅野 義弘¹, 宮田 知起², 奥野 雅大³, 益山 詠夢¹, 田中 浩也¹

Tsuneo Masuda¹, Yoshihiro Asano¹, Tomoki Miyata², Masahiro Okuno³, Emu Masuyama¹, Hiroya Tanaka¹

¹慶應義塾大学, ²株式会社 ORPHE, ³ラピセラ株式会社

¹Keio University, ²ORPHE Inc., ³Rapithela Corporation

【要約】

これまでのフットウェアプロダクトは、さまざまな素材で多種類のパーツ群を縫製、及び接着剤を使用して組立てられ、マテリアルリサイクルを顧慮した環境配慮設計がなされていなかった。今回制作した3D プリントフットウェアは、われわれが「プロダクトの再錬成」と呼ぶ、部品の構成を全体的に再検討する工程を通じて単一の材料化(モノマテリアル)を実現し、組立に超音波溶着を使用することにより、使われなくなったときにも粉碎してマテリアルリサイクルすることができるプロダクトとした。本研究では、その一連の工夫と過程を紹介し、実際にリサイクルして再プリントする実験の結果も報告する。これにより今後、3Dプリンタと環境配慮型設計が高次に結びつくことによって、資源循環型社会を実現する一助となる可能性を議論する。

キーワード: 3D, FGF, リサイクル, フットウェア, 超音波溶着, モノマテリアル

【Abstract】

Until now, footwear products have been assembled by sewing and gluing many different parts made of various materials, and have not been designed in an environmentally friendly way that takes material recycling into consideration. The 3D printed footwear we created this time is made of a single material (monomaterial) through a process we call "product refinement," in which the entire composition of the parts is reexamined, and by using ultrasonic welding for assembly, the product can be crushed and recycled when it is no longer used. The product can be crushed and recycled when it is no longer used. In this study, we will introduce the series of innovations and processes, and also report the results of the actual recycling and reprinting experiments. In this way, we discuss the possibility that the 3D printer and eco-friendly design will be linked in a higher order in the future, thereby helping to realize a resource-recycling society.

Keywords: 3D, FGF, recycle, footwear, ultrasonic welding, mono material

1. 序論

3D プリント技術の向上により、世界中のシューズメーカーによって3D プリントシューズ⁽¹⁾は開発・販売されているが、製造方法は光硬化型(SLA方式・DLS方式)、あるいは粉末造形(SLS方式)、組立方法は従来の接着・縫製プロセスが採用されており、マテリアルリサイクルは難しい。

筆者達は、2020年に発表したVCAM⁽²⁾と題したコンセプト映像で1部品・単一材料の環境配慮型設計採用のフットウェアを制作したが、フィット性が低く、長期の歩行に適していなかった。本研究では、モノ・データ・マテリアルの循環モデル実験を行いながら、より価値の高いプロダクトと資源循環型社会の実現性についての可能性を考察する。尚、熱可塑性樹脂ペレットを押し出して造形するペレット式3Dプリンタのことを本論文では、最近の海外での呼び名に揃えて、FGF(fused granular fabrication)と呼ぶ。

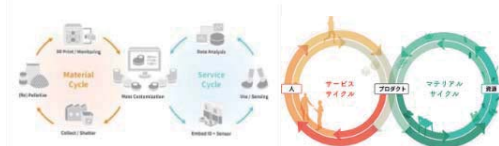


図 1. VCAM の循環モデル

2. コンセプト

本フットウェアの目的は、歩容センサモジュール(ORPHE CORE, ORPHE 社製)を内蔵し、日常と非日常(災害等)のシーンで歩行、かつ有用なデータを取得・解析することである。通常歩行時の快適性に加えて、非日常(災害等)時にも使用できるように、靴底の厚みや、しゃがんで紐を結ばなくてもすぐに履け、かつ長距離歩いても脱げないフィット性、マテリアルリサイクル等の環境配慮設計、個別化対応設計が要求されている。それらの要求を満足させるべく、フットウェア機能を分解し、再度機能別に組み立てる「プロダクト再錬成」を通じて、通常50から100点⁽³⁾で構成される部品を6点に削減し、モノマテリアルと接着剤・縫製を使用しない組立手順を構築し、3D スキャナーで足部データ取得し個人に合わせた設計を進め、ユーザー好みの色で製造する3Dプリンタを使用し、フェイズフリーフットウェアを制作する。

尚、本フットウェアは「データワーク@かまくら」⁽⁴⁾の10名の参加者を対象に設計・制作されたものである。

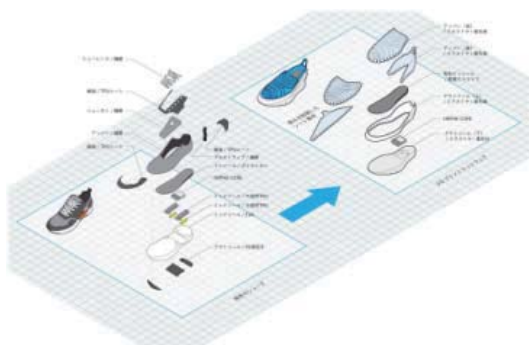


図 2. プロダクト再錬成による部品削減

3. 計測・設計工程

① 3D スキャンによる足部計測

3D スキャン装置は Raspberry pi 3b+:32set, USB Camera:124set, Projector:4set, Hub 3set で構成され, Metashape⁽⁵⁾ を使用して 124 枚の静止画像から足部の 3D モデルを制作し.stl ファイル出力した。

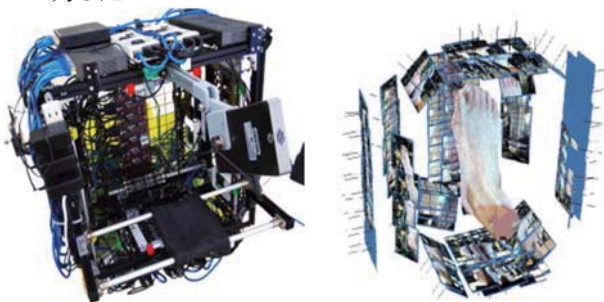


図 3. 3D スキャン装置とスキャンデータ

② フットウェアを部品分解

足部 stl ファイルから,3D モデラー(Rhinoceros)を使用してデジタル木型制作し,靴設計の専門家の知見をとりいれて最適なセンサ位置,アッパー形状,アウトソール形状を制作後に各部品に分解し,stl ファイルで出力した.インソールについては,4DFF2020 で発表⁽⁶⁾,その後上市されたラピセラ社製 eLabo インソール 101 を使用した。



図 4. フットウェア 3D モデルと部品分解

4. 製作工程

① 材料

複数のエラストマにて評価試験を実施し,屈曲疲労性と耐磨耗性に優れた XPA-9040X1⁽⁶⁾ を採用した。

② 3D プリント

熱可塑性樹脂ペレットを押し出して造形する FGF

式 3D プリンタ GEM5500D⁽⁷⁾ を使用した.(ノズル径 1 mm,スライスピッチ 0.5mm,スライサーCura4.6.1)

江口⁽⁸⁾らは,同じメーカー製 FGF 式大型 3D プリンタでエラストマペレットを平面上に 3D プリント,接着し,バルーン形状の造形物を制作している。

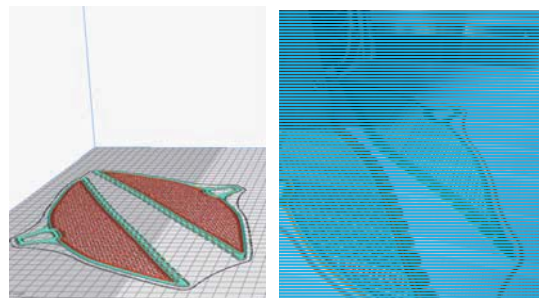


図 5. スライスデータと 3D プリント

③ 超音波溶着機⁽⁹⁾

超音波溶着の一般的な接合部の形状は,エネルギーダイレクトと呼ばれる突起部が熔融して溶着する.しかし,エラストマのように柔らかい材料の溶着には適していない.図 6.と 7. は,2mm の異なる色の板材(XPA-9040X1)を 2ヶ所超音波溶着し,引張試験を行った結果である.溶着断面を比較すると,スポット型ホーンを使用した溶着断面は,樹脂にホーン先端部が食い込んだ後に熔融樹脂が周囲まで広がり広範囲に溶着していることがわかる.試験結果より,本プロジェクトではスポット型⁽¹⁰⁾ホーンを使用する。



図 6. スポット型ホーンとフラット型ホーンと溶着断面

ホーン Type	最大引張荷重(N)
スポット	306.4
フラット	161.86

図 7. ホーン別の溶着部破断試験比較(単位 N)

④ 溶着部引張強度試験

予備試験として 150×25×2mm 板形状の方向を変えて 3 種類プリントし,引張強度試験を実施した.【積層方向に平行】と【直線クロス】は 400%以上伸びても破断しないが,【積層方向に垂直】は最大引張荷重 318N(120%伸長時)で破断した。

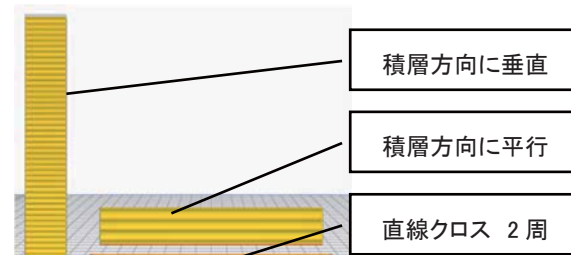


図 8. プリント方向を示す,引張試験は長手方向

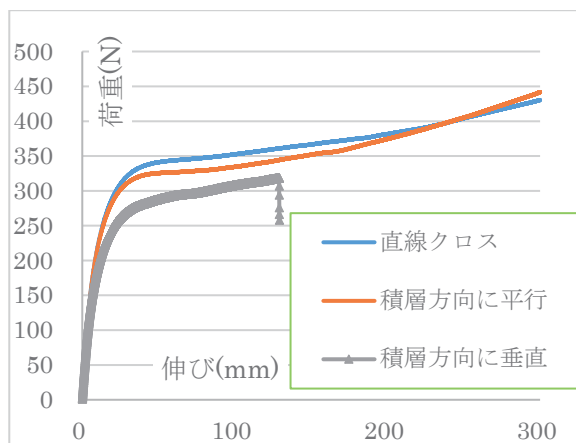


図 9. 引張強度試験(サンプル数 5)

溶着部破断強度試験はスポット型ホーン 2 ヶ所、出力 25W で実施、溶着部破断強度試験の最大引張荷重 346.2N(64%伸長時)が、【積層方向に垂直】の最大引張荷重 318N より大きい結果が得られた。超音波溶着機による XPA-9040X1 の溶着は使用可能である。

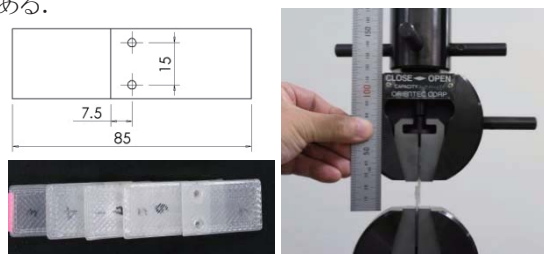
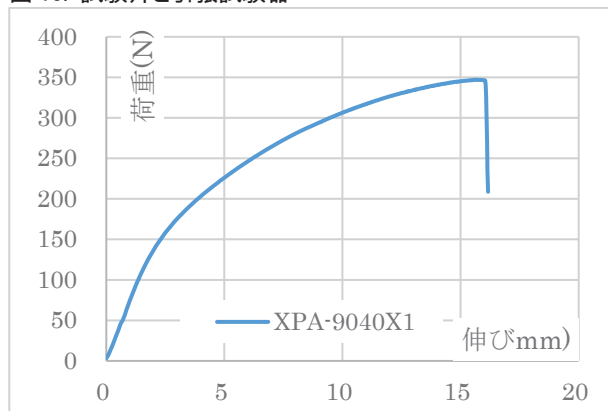
図 10. 試験片と引張試験器⁽¹¹⁾

図 11. 溶着部破断強度試験

溶着位置を明確化と溶融した樹脂の高さ方向へのはみ出しを減少させることを目的として、溶着部にスリットを設ける実験を行った。はみ出しは減少し、仕上げ加工も不要となった。

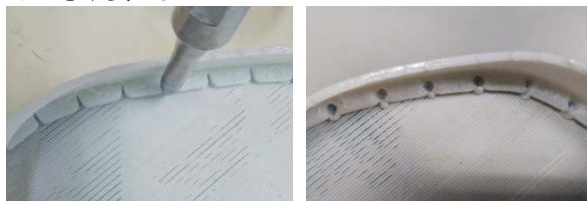


図 12. スリットの効果(溶着前と溶着後)

⑤ カラー化

XPA-9040X1 ペレットは透明、カラー化のために PP のマスターバッチを最大 5%(重量)加えてカラー化した。マスターバッチの重量はレイヤー毎の樹脂量

をスライサーで算出しきめた。手作業で 3D プリンタのホッパー部に投入したが、色の応答性は鈍いため、改良が必要である。



図 13. ペレットとカラー化したプリント品

⑥ 仕上げ工程

ショットブラスト処理を加えることで、サンダルのような安っぽさが消え、高級感を出すことができた。



図 14. ショットブラスト前とショットブラスト後比較



図 15. 完成したフットウェア

5. リサイクルペレットの製造

不要になった試作品、実際に 3 ヶ月使用したフットウェアを洗浄・分解・破砕して 5.8kg の樹脂ペレットを製造した。異なる色の破砕品を連続して押し出す際に色が多少混ざるが、リサイクルペレットの外観上は問題無い。洗浄工程でどこまで汚れと臭いを除去するかが、リサイクルペレットを使用する制作品の品質に影響することが課題となる。

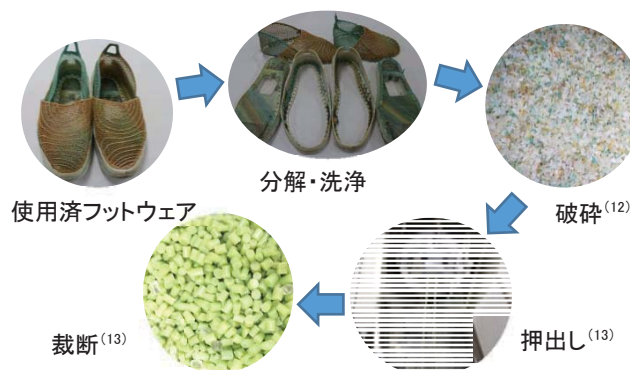


図 16. リサイクルペレット製造フロー

6. リサイクルペレットの品質評価

Helen⁽¹⁴⁾ が PET ボトル破砕、FGF 式 3D プリンタで試験片制作、引張強度試験により、リサイクルペレットの品質評価している。

品質評価試験項目として引張強度試験に加え MFR 測定、超音波溶着部破断試験を実施した。使用したフットウェアは、実使用期間が 3 ヶ月と短かったためか、大きな強度の劣化は見られなかった。

材料	MFR	測定温度
XPA-9040X1	22.073	190℃
XPA-9040X1+青顔料	13.999	170℃
+PP 青黄 リペレット	11.806	170℃
+PP 青黄使用後リペレット	11.346	170℃

図 17. MFR(g/10min)の変化

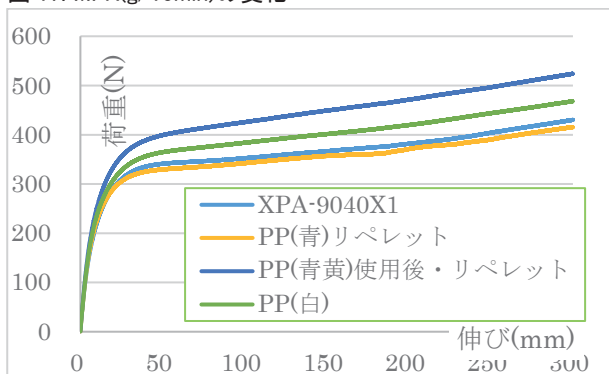


図 18. 引張強度試験比較

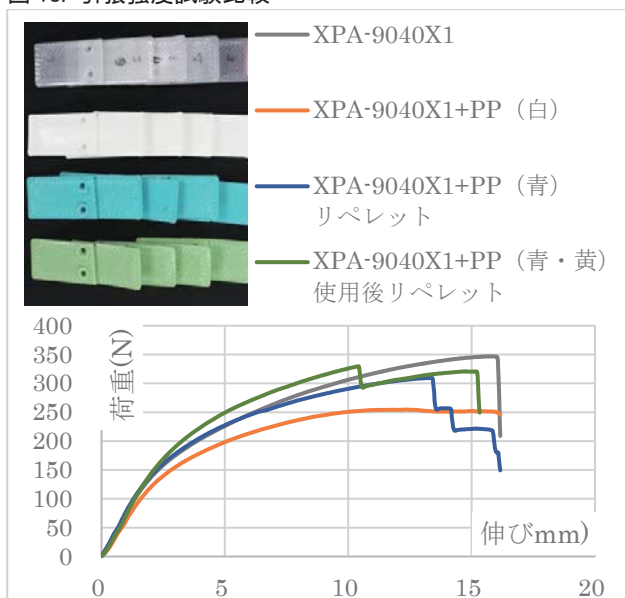


図 19. 超音波溶着部破断試験(25W)

9. リサイクルマテリアルを使用した制作品

リサイクルマテリアルを使用する制作品は、使用目的に合わせて新規材料の混合比率を決定し、その配合を記録する。センサーデータを活用し、より最適化を進めた同種のフットウェアを制作する場合は、新規材料のみで制作することが望ましいが、再生材のみで異種のフットウェアを制作する選択肢も考慮する必要がある。

10. 結論

フットウェアプロダクト再錬成を通じ、使用目的を決定し、身体計測から材料リペレットまでの工程を 1 サイクル回すことで、予想以上の効果と新たな課題を得ることができた。超音波溶着機は、3D プリンタの適用範囲を広げ、環境配慮設計を進めるための有用な機材である。

また、リサイクルペレットの品質評価方法として MFR 測定・引張強度・超音波溶着部破断試験を実施したが、データ不足で試験方法として適しているかの判断はで

きなかった。今後は事例を増やし、使用期間の長期化、サイクルを回し、促進耐候性試験を取り入れながら試験を続けていく必要がある。

課題は洗浄工程、今回はブラシで手洗いしたが、洗浄効果は低かった。大型の洗濯・乾燥機を用意し、自動化作業にすべきである。

本プロジェクトを通じて、3D プリンタと環境配慮型設計を結びつけ、1 サイクル回す実験より、その有効性は確認できたが、より高次の連携資源循環型社会を実現するには再制作品の適用範囲が圧倒的に不足している。リサイクル材料の最終使用品を想定し、新規材料の配合比率を決め、材料の履歴管理を進めながら再制作品を増やしていくため、さらなる実験が必要となる。

11. 謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献

- ADIDAS 4d-shoes
<https://www.adidas.com/us/4d-shoes>
- 2020 慶應義塾大学 COI ファブ地球社会創造拠点 Value—generating Circular Additive Manufacturing 「スマート都市のための 3D プリンティング」
- 西脇 剛史(アシックス)、2009、『線維と工業』65号, No.5「スポーツシューズの要求機能と使用素材」
- ～歩いて「私」と「まち」を知り、データで紡ぐみんなの鎌倉～
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/smartcity/event.html>
- Agisoft 社製 photogrammetry
- 上田雄一(JSR、ラピセラ)、4DFF2020, 3D デジタル装具の社会実装に向けて
- 赤川佳史(宇部興産)、2010、『プラスチックエージ』56号 7P, エラストマー, その最新技術と応用展開 ポリアミドエラストマー(UBESTA XPA)
- エス.ラボ社製 FGF 式 3D プリンタ GEM5500D
- Soya Eguchi, Morphing Design for Socially interactive Autonomous Car by Multi Material 3D-Printing, CHI 2019 Posters, Glasgow, UK
- 精電舎製超音波溶着機 Sonopet 446D/G(39MHz)
- 金子誠司, 「初歩から学ぶプラスチック接合技術」, 89P, 2005, 工業調査会
- ホーライ社製 破砕機 V-360
- 田辺プラスチック機械社製 V40-NS II 型リペレット装置
- Helen A. Little, MDPI materials, 2020, Towards Distributed Recycling with Additive manufacturing of PET Flake Feedstocks

再生プラスチック材料を用いた 3D プリント椅子・ベンチの設計と製造実証

Design and Manufacturing of Chairs and Benches Using Large-Scale 3D Printing Technology
with Recycled Plastic Materials

益山 詠夢¹, 大木 智博², 田中 浩也¹

Emu Masuyama¹, Tomohiro Oogi², Hiroya Tanaka¹

¹ 慶應義塾大学, ² 東京エコリサイクル株式会社

¹ Keio University, ² Tokyo Eco Recycle Co., Ltd.

【要約】

昨今、3D プリンタによってリサイクル材料に新たな価値を与えることが、資源循環を進めるための一技術になりえるのではないかという期待が高まっている。本研究では、再生プラスチックを材料とし、大型3D プリンタを使用して椅子やベンチを製造し、その可能性を実践的に探究する。回収された廃棄家電からリサイクルされたポリプロピレンを用いて3D プリンタで出力するための材料特性を考慮した出力試験、またその材料を出力するための3D プリンタでの出力設定、大型3D プリンタの機械特性を考慮したデザイン形状の守るべき制約と見えて来たもの、設計された椅子のデザインテーマと工夫、構造的な強度を担保するための試行錯誤などについて述べる。これらを総合して、今後のリサイクルと大型3D プリンタを結合する可能性を述べる。

キーワード: 大型 3D プリンタ, リサイクル, デザイン, 再生プラスチック

【Abstract】

Nowadays, there is a growing expectation that giving new value to recycled materials by 3D printing could be a technology to promote a circular economy. In this research, we focused on recycled plastic as a material to manufacture chairs and benches using a large -scale 3D printer, and practically explore its potential. Using polypropylene recycled from collected waste home appliances, we conducted print tests to make it possible to output with a 3D printer while considering the material properties, and calibration of the machine's setting for 3D print output. We explored finding design constraints using large-scale 3D printing technology, designing and making the concept of chairs and benches, and ensuring structural durability on the design through try and error. By synthesizing the above, the possibility of combining recycling and large 3D printers in the future is described.

Keywords: large-scale 3D printing, recycle, waste plastic,

1. 序論

本研究で使用した大型3Dプリンタはエス.ラボ株式会社により実験的に開発されたFGF (Fused Granular Fabrication) 方式のプリンタである。当プリンタは幅、奥行、高さ1mからなる1m²の出力範囲があり、出力ノズルは1～10mmまで使用可能である。材料面では、一般的なフィラメント式のものと異なりペレット式であることで、一般的に出回っていない材料でも容易に出力試験をすることが可能である。一般型3Dプリンタとは出力範囲もノズル径も異なるサイズを有する大型3Dプリンタでは、家具や建築建材スケールの製造物を実現可能とする。(図1)



プリンタ全体像

椅子のプリント風景

図1. Archi Fab II (エス.ラボ株式会社)

一般に樹脂を使った椅子の製造に使われる金型成形は、最初の金型作成時にかかる高額な初期投資を要する。それに比べこの新しい3D プリント製造技術では、3D CAD でデザインされたデジタルデータを読み込む事で直ちに製造する事ができ、多額の初期投資無しに多品種変量生産を可能にする。また、3D プリント技術は、昨今の技術進展により「ラピッドプロトタイピング」という試作作成の領域を超え、製品レベルの完成されたプロダクトを製造できるところまで来ている。本研究はこの技術特性を生かし、再生プラスチックを材料とした椅子、ベンチの製造実験を行い、材料、意匠の問題点について報告する。

2. 材料:再生プラスチックを3D プリンティングに使用する

ペレット式3Dプリンターは、製品として一般的に出回っている既存の材料だけではなく、ペレット状であれば実験的に新しい材料を3Dプリンタにより出力可能かどうかを見極める実験的な機械としての優位性がある。

本研究ではプロダクトとして既に使用され、使用済みになった製品を回収して作られた再生プラスチックに着

目し、その材料を3Dプリンタでプリント可能にする為に試行錯誤をおこなった。今回使用した樹脂は、家電リサイクル法で回収された廃家電をリサイクルプラントで破碎し、選別されたポリプロピレン（以降PPと呼ぶ）をペレット化し、再びメーカーの家電製品のパーツとしてリサイクルされる樹脂材料である。この再生PP樹脂は、冷蔵庫1台から約6kg、洗濯機1台から約6kg、エアコン1台から約3kg再生され、それがペレットとして配合された材料になる。3Dプリンタで椅子一脚を製造するのにリサイクルPPを6kg使うと想定すると、それに必要な廃棄家電は冷蔵庫1台か、洗濯機1台、またはエアコン2台、から一脚の椅子を造ることが出来る。（図2）

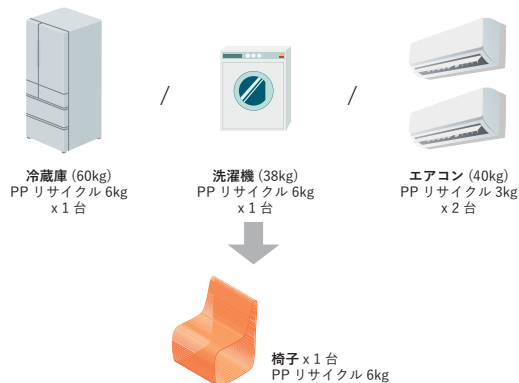


図2. 廃家電から再生されたPP材料で造る椅子

3Dプリンティング用に使用する樹脂材料の一つの課題として、出力成形後の材料の反り問題がある。これは溶融した樹脂が大気に触れ急激に冷却されることで起こる材料の収縮によるものである。本研究で使用したリサイクルPP材料は、何も混ぜない状態で3Dプリントすると激しく反る為、そのままでは使用不可能な材料である。その為、反りを抑制する効果を期待できる様々なフィラー材料を混練し小型サンプル出力を行い、反りの抑制効果と表面テクスチャーを検証した。（図3、表1）

試験結果から最も良い効果を得られたフィラー材料である、グラスウールとグラスファイバー入りリサイクルPPを椅子スケールの出力試験に使用することを決定した。



図3. 出力サンプル

フィラー タイプ	1. タルク	2. マイカ A	3. マイカ B	4. GF 粉末	5. GF 扁平	6. GF 繊維	7. GW
反り 抑制	×	△	△	○	◎	◎	◎
表面	○	×	×	○	×	○	○

フィラー各30%添加、GF:グラスファイバー、GW:グラスウール

表1. 出力テスト:リサイクルPP+フィラー

3. 意匠:大型3Dプリンタで製造する為の家具デザイン

1-10mmの太さまであるノズル径は樹脂を溶融する温度設定、スクリーンの吐出スピード、ヘッド動かすフィードレートなどこれらの微細な調節によりプリントする樹脂の太さ、高さを出力するプロダクトのデザインに合わせてコントロールする必要がある（最大、幅約16mm、高さ約5mm位までの出力が可能）。意匠面ではこの積層の幅と高さが、構造物の強度や意匠として層の見え方の印象を決定する要素となる。

プリント可能な積層面の角度は45度以上なければ、積層された材料が重力で垂れてしまい積層がうまくいなくなる。一般的な3Dプリンターでは、サポート機能を使い45度以下のサーフェスに対して対応するが、大型3Dプリンターでは1層1層のサイズが大きいため、サポート機能を使って接着した樹脂同士を後に剥がし、後処理で綺麗にするのが容易ではない。

ペレット式大型3Dプリンタを使用し製造するプロダクトの設計は、それ特有の機械的制約を理解した上で意匠設計を行わなければならない。ペレット式大型プリンタは、一般的なフィラメント式デスクトッププリンタとは異なり、フィラメントを物理的に引き込む機構を備えてなく、「リトラクション」が機能しない。故に、造形物の表面を綺麗に出力する為には、溶融した樹脂が一時とも途切れることの無いように一筆書きで出力パスを作成しなければならない。また出力パスを一筆書きにすることで、プリント時間の短縮効果も期待できる。

これらの要素を念頭において、椅子の設計を行なった。（図4）

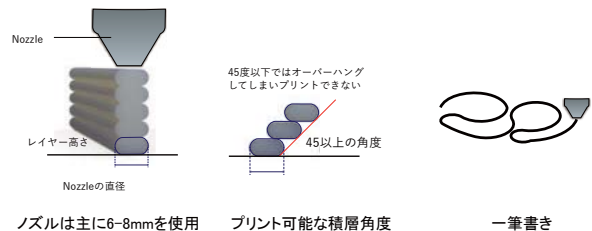


図4. 機械特性とデザインルール

まずは、3Dプリント技術を使った椅子の世界の事例を紹介する。

オランダの「The New Raw」というデザイナー集団は、ギリシャ・テッサロニキにて街で回収された廃プラスチックを材料（PPとHDPE）として大型のロボットアームを使いパブリックベンチを製造した。植物用プランターとベンチを混合させたプロダクトを海岸沿いのパブリックスペースに多数設置した。6軸のロボットアームの特性を活かし45度の角度で樹脂を積層することで、水平に積層した場合の上記に述べた角度45度以下のジオメトリでの成形不可能な形状に対して、より幅の広い角度を持つ形状に対して出力可能にする。各ベンチには、アルミプレートにそのベンチの総重量が記載されており、そのベンチを作ることでのどのくらい廃プラスチックが再利用さ

れたかが分かるようになっている。現在では海洋プラスチックゴミや、漁業で使われる不使用になった網などを集め、それを材料としてビーチに置かれる更衣室やビーチベットのデザインへと展開している。(図5)

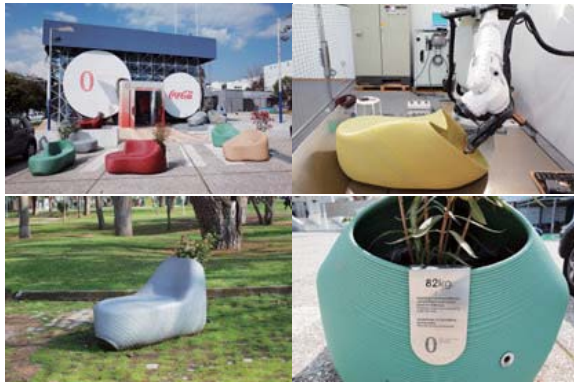


図5. The New Raw : ゼロウェイスト ラボ

ここで、本研究で意匠設計を展開した5種類の椅子、ベンチのデザインコンセプト、工夫などを説明する。(図6)

① Auxetic Chair

3D プリンティングの内部構造設計で採用される幾何学のひとつに「オーゼティック・パターン (Auxetic Pattern)」がある。この椅子は、その幾何学の周期構造の一つを取り出して拡大し、さらに「一筆書き」のパスへと統合することで、身体の動きに柔軟に呼応し、馴染む椅子のデザインへと応用した。リエントラント・ハニカム構造のフレキシブルさを利用して、身体の重さを支え、椅子自体のクッション性や、しなやかな背もたれの寄りかかりを実現できないかと考えた。空隙の幅や角度を細かく操作することで、座り心地をデザインすることが可能となった。

②+③ Recyclable Butterfly Chair & Bench

気軽に持ち運べる屋内でも野外でも使えるスツールとベンチのシリーズ。二つの断面形状からなるシンプルなプロファイルからつくられている。1人で座れる椅子の幅から、2人で腰かけられるベンチの幅まで、用途に応じて長さを自由に決めることができるデザインになっている。この椅子は不使用になった際、粉碎することによりまた他のプロダクトに生まれ変われるというコンセプトの椅子である。

④ Daruma Chair

オフィスや自宅のリモートワークなどで使える、良い姿勢を保ちながら長時間使える椅子。バランスボールなど自らのバランス感覚で身体の重心を移動させることが出来る健康椅子を参考にデザインした。椅子の前方の底面が20度ほど斜めに上がっており、ユーザーが座ることにより椅子が前方に傾く。それにより、ユーザーの背筋

が自然と伸びる姿勢になる。脚で身体の自重をサポートするように座り、自分の心地良い座り具合で椅子を使用することができる。

⑤ Owl Chair

ダルマチェアのデザインを展開して作られたオウルチェアは、お尻と背中を優しく包み込むようにデザインされた背もたれ付きの深く座れる椅子である。背もたれを付け加えることで、新たに加わる重量をどのように受け、1層レイヤーのシェル構造だけで、身体を支えることができるかが、デザインのポイントとなった。意図的に椅子後部に折り目やカーブを付けることで、応力に耐えうる強度を担保することを試みた。さまざまな曲面、角度、折りパターンを試験し、意匠と構造を同時に探索した。



左上: ① Auxetic Chair
右上: ② Recyclable Butterfly Chair
中左: ③ Recyclable Butterfly Bench
中右: ④ Daruma Chair
下左: ⑤ Owl Chair

図6. リサイクルPPを使った椅子デザインシリーズ

4. 3D プリント椅子の資源循環



図7. 「砕く」、「つくる」、「使う」、「戻す」の資源循環

上の図の様に(図7)、回収された再生プラスチックを材料にプリントした椅子を、再び粉砕してペレット化し、再び3Dプリンターで他のプロダクトとして100%リサイクル造形できるかを検証した。次の順で粉砕から再造形までのプロセスを行なった。(図8)

- ① 椅子を粉砕機に入れて加工できるように小さいパーツに切り分ける。
- ② 粉砕機にて(直径6ミリ穴のメッシュ使用)粉砕されたフレークを取り出す。
- ③ フレークをペレタイザーにてペレット化する。
- ④ リペレットしたものを再び3Dプリンターで再造形する。

上記のプロセスから、粉砕した椅子から材料をリペレットし再び造形する事が可能であることが実証された。



図8. 椅子の粉砕、リペレット、再プリントの工程

色の実験として単色の赤色のものから、茶系、それに水色、黄色を混ぜたものを段階的に混ぜていった。単色の場合は問題無く色が出るが、様々な色が混ざった場合はグレー調の色になっていくことが分かった。表面は1度目のプリントよりも少し粗くなっている様に見える。これが樹脂の劣化から出現するものなのかは現時点ではまだ判断できない。(図9)

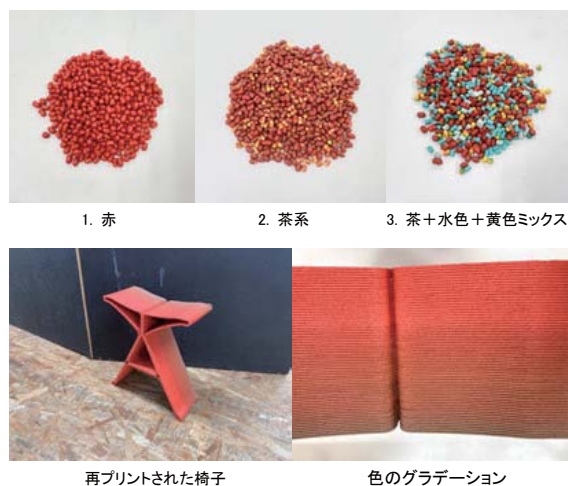


図9.異なる色のリペレット樹脂材料を使ったプリントテスト

5. 結論

本研究を通じて、回収された廃棄家電から選別されたPPを利用して大型3Dプリンタで出力し高品質な生活用品の実例を作った。椅子の強度に関しては人が座れる強度は十分担保でき、設計された中の一つの椅子に関しては家具メーカーの協力を経て強度テストを行い、破断せずに耐える事ができた。

大型 3D プリンタによって椅子、ベンチ等の大型家具全体を製造すると、リサイクルプラスチック活用の観点からは利用用が増え効率がよいと言える。

椅子を製造した後にもう一度ペレットに戻し再び3Dプリント技術でプロダクトにする「マテリアルリサイクル」を可能であることを実証した。単一素材を使った一体型整形は、パーツ部品のアッセンブル工程を省き、プロダクト消費後の廃棄問題として資源循環も容易にさせ、環境配慮型のサプライチェーンの構築に期待できる製造技術である。

謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Auxetics>
2. <https://thenewraw.org/Zero-Waste-Lab>

海洋生分解性プラスチックの特徴を活かした、 新たな 3D プリントプロダクトの可能性

New Potential of 3D Printed Products : Making Use of the Marine-biodegradable Plastic

安宅絢音¹, 滑川由記¹, 濱崎トキ², 山崎周一³, 田中浩也¹

Ayane ATAKA¹, Yuki NAMERIKAWA¹, Toki HAMASAKI², Shuichi YAMAZAKI³, Hiroya TANAKA¹

¹慶應義塾大学環境情報学部, ²株式会社 Boolean, ³株式会社ネクアス

¹Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

²Boolean Co., Ltd., ³NEQAS Co., Ltd.

【要約】

生分解性プラスチックとは、コンポスト中や土中、海中の微生物の働きによって化学反応を起こし、最終的に二酸化炭素と水に分解されて自然界に還る性質を持つプラスチックのことである。本研究では、生分解性プラスチックの中でも海中での分解にも適応した海洋生分解性プラスチックを利用し、3D プリンティング技術と素材の特性を掛け合わせることで、新たな価値創造につながるプロダクトのあり方を提案する。従来からあったプロダクトを海洋生分解性素材で置き換えるという既存の発想を超えて、資源循環への貢献以上の、さらなる価値を付加したプロダクトの可能性を探索した。そしてまた本稿では、生分解性素材を含むバイオプラスチックを利用したプロダクトの現状を広範なサーベイのもとで分類・体系化し、海洋環境の現状を調査した上で、新たな視点を持って制作したプロトタイプの方角性を提示し、今後の展望について述べる。

キーワード: 3D プリンタ, バイオプラスチック, 生分解性, 海洋生分解性, SDGs

【Abstract】

Biodegradable plastics are plastics which can be decomposed by the action of micro-organisms into water and carbon dioxide under specified conditions such as compost, soil and the ocean. This research proposes the new valuable ways of Marine-biodegradable plastic products through making maximum use of both 3D printing technology and the characteristics of the material. We explore the Marine-biodegradable plastic's potential of providing us with additional valued products which is beyond the existing idea using these as just an alternative to fossil-based plastic. In addition to the systematic classification of bioplastic products, researches of present situation of the ocean, directions of prototypes and prospects of the future are also shown.

Keywords: 3Dprinter, Bioplastic, Biodegradable, Marine-biodegradable, SDGs

1. はじめに

近年、気候変動や海洋プラスチックゴミ問題が顕在化し、特に緊急性のある環境問題として議論されることが増えている。そこで、気候変動を引き起こす温室効果ガスの大部分を占める二酸化炭素の発生源の1つが化石資源由来かつ非分解性プラスチック（以下プラスチックと呼ぶ。）の製造・転換・廃棄物の燃焼処理によるものであること、また海洋に放出されるプラスチック廃棄物が劣化・風化して発生するマイクロプラスチックを海洋生物が捕食することによって表面に付着した有害物質の生物濃縮が起り、取り込んだ人体に害を及ぼす可能性があることの主に2つの観点から、脱プラスチック※化が叫ばれている。

我々は、従来のプラスチックの代替素材の研究の広がりを俯瞰して、中でも特に海洋生分解性プラスチックの可能性に着目した。本研究の目的は、現在想定されている活用方法と海洋環境の現状を精密に把握した上で、既存用途代替以上の新たな価値を見出し、海洋生分解性プラスチックの発展可能性を広げることである。

2. プラスチック代替素材の研究の広がり

2-1. 代替素材の分類

脱プラスチック化が急がれる中、従来のプラスチックの代用品として代替素材が次々に登場している。大きく分けると、プラスチック以外の素材とバイオプラスチックの2つがある。前者には菌糸や紙、パルプ等が含まれる。後者は、バイオマスプラスチックと生分解性プラスチ

ックの2つを含む。この2つの性質は同時に成立し得るため、図1の左上の領域をバイオマス由来非分解性プラスチック(Bio-based non-biodegradable plastic)、右上をバイオマス由来生分解性プラスチック(Bio-based biodegradable plastic)、右下を化石資源由来生分解性プラスチック(Fossil-based biodegradable plastic)として定義されている。

われわれは、バイオプラスチックをこれら3つの独立項目に分類することとし、それぞれどのような製品に应用されているかを整理した(図2)。バイオプラスチックは、地球環境に優しく、原料ならではの風味や分解する機能を持っている反面、化石資源由来非分解性プラスチックと比較すると、強度、耐熱性、難燃性、製品寿命、材料コストや加工性において、劣る部分が残る。使用目的・場面に求められる物性を満足しつつ、環境負荷を減らす選択が求められている。

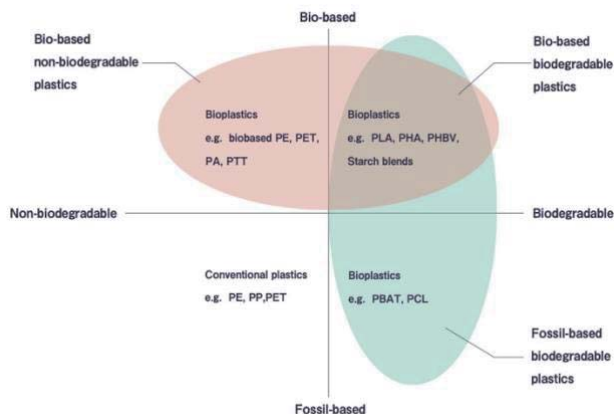


図1. バイオプラスチックの分布
(IFBB による図表を参考に作成)



図2. 代替プラスチックの全体観とその製品の例

2-2. 生分解性プラスチック

バイオマスプラスチックは、再生可能な植物や動物抽出液等の資源を原料とするプラスチックを指す一方、生分解性プラスチックは、主に微生物の活動によって分子レベルで化学変化を起こし、最終的に水と二酸化炭素に分解されるプラスチックのことを指す。この分解機構には加水分解や微生物の放出する酵素、微生物

の代謝による分解が含まれるため、分解速度は微生物の数量、温度、水分量の3つの条件に依存する。

また、生分解性プラスチックの中でも、バイオマス由来の原料でできているもののみがカーボンニュートラルであるとされている。

2-3. 海洋生分解性プラスチック

海洋生分解性プラスチックとは、生分解性プラスチックの中でも海中での生分解性を持つプラスチックのことである。具体的には、ISO規格に則って、海中(30℃)で生分解度が6ヶ月以内に90%以上になること等の条件を満たしたものが、海洋生分解性プラスチックとして認められている。一般的に、海中は土中に比べて微生物の量が少なく、水温も気温より低いため、生分解に長い時間を必要とする。しかし、非分解性プラスチックはマイクロプラスチックになった後、完全に分解されことなく数百年も浮遊するのに対し、海洋生分解性プラスチックはマイクロプラスチックの形態を通過はするものの、完全に水と二酸化炭素に分解されるという点では決定的に異なる。

海洋生分解性プラスチックが現在直面している課題は、2つの視点で捉えることができる。1つ目は素材の特性の視点である。上記で示したマイクロプラスチックが海洋で完全に分解されるには一定の時間(一般的には半年以上)が必要であり、その間はマイクロプラスチック問題に寄与してしまう。また一部の酢酸セルロースを主成分とする海洋生分解性プラスチックは酸性を示し、海のpHや成分バランスに影響を与える可能性もある。2つ目は利用先の視点である。海洋生分解性プラスチックを含む生分解性プラスチックは原料に由来した色、香り、質感等の様々な特性があるにも関わらず、図2の通り従来のプラスチック製品の置き換えが主な利用先となってしまう。

しかし、海洋生分解性プラスチックの「半年から1年かけて分解される」性質をもとに、課題に応え、更に3Dプリンティング技術によって新たな価値を乗せたプロダクトを生み出せる可能性はある。

3. 海洋環境の現状

3-1. 温暖化対策としての海

2009年にUNEPらが出した『Blue Carbon』という報告書は、海洋植生が陸上植生に劣らない二酸化炭素の吸収源であることを示し、海洋での温暖化対策を促進させる方向性を示した。一方、世界で温室効果ガス削減に向けて削減努力は年々増加しているのに対し、二酸化炭素の吸収源となる自然生態系は人間の活動によって減少が止まらず、特に海洋植生は熱帯雨林の5-10倍の速さで消失しており、数十年後にその殆どが消失するとされている。これは、いくら排出規制を行っても吸収源の消失によって相殺され、温室効果ガス削減が進まないという状況を招く深刻な事態である。

こういった状況を改善するために、海洋環境を保全し、ブルーカーボン(地球温暖化に関わる温室効果ガスのうち、海洋生物の作用によって大気中から海中に吸収された二酸化炭素由来の炭素のこと)を増やすための取り組みが行われている。

3-2. 海洋酸性化

大気と海洋の間での二酸化炭素(CO_2)の吸収・放出は、大気中の CO_2 の分圧と海中に溶けている CO_2 の分圧の関係で成り立っている。よって海中の溶存 CO_2 の分圧が大気中の CO_2 の分圧より小さくなったとき、大気中の CO_2 が海中に吸収される。また海中の溶存 CO_2 の分圧を減らす要因は、海洋植物の光合成に加えて水温低下で CO_2 の溶解度が大きくなることなどがある。

しかし近年、海洋による CO_2 吸収量が年々増えていることに伴い、海面に過剰の CO_2 が溶解し、海洋の酸性化(図3,図4)が進むことによる生物への影響が危険視されている。これはブルーカーボン推進とはトレードオフの関係にある。海洋酸性化の結果として炭酸カルシウム(CaCO_3)の生成を困難にすることで、 CaCO_3 を外骨格や殻の主成分として持つ生物(プランクトンや貝類、甲殻類や棘皮動物等)の奇形や成長への影響、生きている生物の殻や骨格が溶け出ししてしまうなどの被害が予想されている。

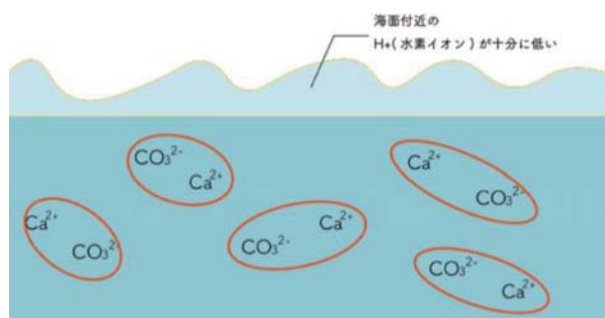


図3. 海洋の通常状態

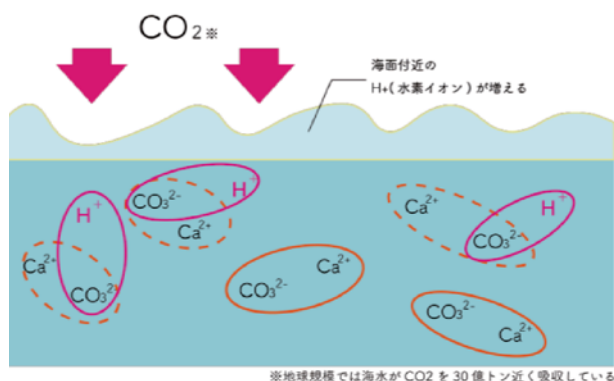


図4. 海洋酸性化が起きている状態

3-3. バランシングのための新たな道筋

つまり、ブルーカーボンを推進することは地球環境に貢献するが、過剰な推進は海洋酸性化という問題を起こしてしまう。しかし、過度な海洋酸性化を引き起こさ

ないよう対策をとることが可能であれば、ブルーカーボンを推進して地球温暖化を緩和する活動に貢献できるのではないかと考えられる。

そこで「バランシング」のための2つの提案を行う。1つ目は、酸性化が進んだ海域をセンシングし、アルカリ性の物質を海中に投入することでpHを調整することである。しかしこの方法は、海により多くのものを溶かすことによって強引にpHを調整する手法ともいえ、長期的に続けることは除去不可能な物質を蓄積することに繋がり、持続可能な解決方法とは言い難い側面もある。2つ目は、不足する物質(炭酸カルシウム等)を投入することである。この場合、減っている物質と同じ物質を投入するため、自然環境への負担は少なくて済む。以上から、現状我々の出来ることは、その時にとって海洋環境に正の働きをする物質(海由来であるとなお良い)を適量投入してバランスを取ることであり、3Dプリンターで制作した海洋生分解性プラスチックを材料としたケースに、中和又は別の効果を持つ改質剤を内包させることで、海洋環境を改善しつつ新たな価値を生み出せると考える。

4. 海洋生分解性プラスチックの場面別用途の提案

地域や環境の特徴を考えた時の、それぞれに対応する海洋生分解性プラスチックの可能性を提示する。

4-1. ブルーカーボンよりも酸性化対策を急ぐ地域(例:漁業が盛んで海洋酸性化が与える生物への影響が著しい地域)

質量を調整したハコ型メッセージを提案する。海水の密度から浮力を計算することが可能かつ、3Dプリンター特有の出力後の質量を予め把握可能な性質を利用して、出力した入れ物に入れることのできる改質剤の重さを計算することが可能となる。またハコの形を蟹などの甲殻類の形等として工夫したり、地域の方々を巻き込んだイベントの形にしたりすることで、海洋酸性化という環境問題についての学びの機会としても期待できる。



図5. 蟹型メッセージのイメージ

4-2. 温暖化等人間の活動で消えてしまったものがある地域(例:流水、地域の文化や儀式等)

自然物を模倣した形のプロダクトを提案する。これらを用いて、環境変化によって見られなくなってしまった自然現象や地域独自の文化や儀式のリバイバルを狙う。海洋生分解性プラスチックが半年から1年間かけて溶

ける時間的制約を逆手に取って、長時間景観として残る新しい流水表現や、過去に祭事で使用していた環境負担によってなくなった文化(灯籠流しや藁人形流し等)のリバイバルなどが可能になる。



図 6. 流水プロダクトのイメージ

4-3.pH を一定にする必要のある場面 (例:水槽(水族館)、排水の影響を受けた池)

改質剤を入れ替え可能な疑似景観型のプロダクトを提案する。水域の pH と水量、理想的な pH が明らかであることが多いため、必要な pH 調整剤の量を計算することが可能となる。具体的には、理想の pH に近づけるため、サンゴや岩等の形を模したプロダクトにアルカリ性のものと酸性のものをその都度の適切な割合で内包する。また、足し算式で投入する物質を調整しても、海洋とは異なり人間が処理できる環境であるため、回収が可能であることもこの環境ならではの特徴である。改質剤を内包して実用的でありつつ、造形によっては景観・働きともに長期間持続するという価値を付加することが可能となる。



図 7. サンゴ礁型 pH 調整プロダクトのイメージ

5. おわりに

1950 年から 2015 年にかけて生産量が 190 倍になった「軽い・強い・曲がる・安価」という好条件を持ち合わせるプラスチックは、2015 年末までにその 3 分の 2 が廃棄され、多くが陸と海に放たれた。現在社会でプラスチックと認識されるものの 99.9%は化石資源由来の非分解性のものであり、それらのオルタナティブを開拓し、刻一刻と進む環境破壊に歯止めをかけ、如何にして自然に更なる正の影響を与え得るかを模索・検証することは、今後の社会にとって最も期待されることの一つである。

化石資源由来で非分解性のプラスチックは温暖化の宿敵である一方、バイオ由来の生分解性のプラスチック、その中でも特に海洋生分解性プラスチックは、温

暖化によって深刻化する海洋酸性化を緩和することだけでなく、文化・生き物の絶滅や、pH 調整を景観保持の上で行う等の場面では付加価値の高いプロダクトとして利用することが可能である。つまり、代替プラスチックとしての役割以上に、環境破壊に歯止めをかけ、更に自然に貢献するという価値を見出すことができる。

本論文では、海洋生分解性プラスチックの現状と可能性を整理し、新たな価値創造の道筋、プロトタイプの方角性を提案した。海洋生分解性プラスチックは、すでに 3D プリント用のフィラメント材およびペレット材として使用できるものがあり、今後は、具体的に試作を積み重ねながら、実際に使われるプロダクトの開発を進める。



図 8. 株式会社 NEQAS 製 海洋生分解性プラスチックフィラメント(左), 同材料のペレット(中), 同材料を用いたプロトタイプ(右)

ただし、今後生分解性プラスチックを含むバイオプラスチックが広まっていく中で、分解に関する知識を十分に広める必要がある。例えば今回我々が提案したようなプロダクトは、「自然に捨てても良いから『捨てる』」という文脈とは区別して、「自然により良い影響を与えるから、そこに『付与』する」という文脈で受け取ってもらえるよう、しっかりとした文脈や行動をデザインする必要がある。

謝辞

本研究の一部は、Nature3D(<https://nature3d.net>) によって、高生分解性酢酸セルロースフィラメント C38TS の提供、支援を受けて進めた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. 小松道男(2021)『バイオプラの教科書』, 日経 BP
2. NATIONAL GEOGRAPHIC(2021)『脱プラスチック〜データで見る課題と解決策〜』, 日経 BP
3. UNEP(2009).Blue Carbon: The Role of Healthy oceans in binding carbon
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/777>
(参照 2021-09-24)
4. 堀正和・桑江朝比呂(2017)『ブルーカーボン』
5. NEQAS の技術力
<https://neqas.co.jp/technology/>
(参照 2021-09-24)
6. bina background IfBB 図表
<http://www.biokunststoffe-nachhaltig.de/index.php/background.html>
(参照 2021-09-24)

誰でもできる 用途要件・塗布材料に合わせた「カスタマイズ IJ プリントヘッド」作り

Making Customized Your Own Inkjet Print-heads in the Maker Age of Plastic

平林 純

Jun HIRABAYASHI

山形大学

Yamagata University

【要約】

液体材料の塗布・印刷を必要とするアプリケーション実現のため、インクジェット(IJ)技術が使われることは多い。従来、ニッチなアプリケーション向けに専用 IJ プリントヘッドが作られることはなく、既存品の流用が前提とされた。その結果、既存品での液滴飛翔が可能なように、アプリケーションの主役たる液体材料側に特性調整が求められることが多く、アプリケーション価値を損なうこともあった。本研究は、「IJ プリントヘッドに液体材料の特性を合わせる」のではなく、「アプリケーション要件にカスタマイズした IJ プリントヘッドの設計と製作を行うアプローチ」を提案し、安価な電気部品・3D プリンタ・デジタルツールを使い、カスタマイズした IJ プリントヘッドを自作するアプローチの実現性を実証する。

キーワード: インクジェット, プリントヘッド, 3D プリンタ, 立体表面, 加飾印刷

【Abstract】

This research proposes a new design and fabrication approach for ink jet (IJ) printing applications. This report proposes and demonstrates how we can optimize general designs of customized IJ print heads for each own application (and each own ink material characteristic) and how easily we can digital-fabricate IJ print heads by using common 3D printers and digital software tools. For niche applications, the approach is suitable than the ordinary process, in which mass-produced IJ print heads are supposed to be used and adjustments of ink properties will be needed.

Keywords: 3D, inkjet, print-head, 3D printer, 3D-surface, decorative print

1. 大量生産 IJ プリントヘッドはニッチ用途に優しくない

オンデマンドのデジタル・ファブリケーションにおける代表技術のひとつがインクジェット・プリント技術(IJ 技術)である。従来、IJ 技術の核とされる IJ プリントヘッドは、大量生産により提供される既存品が前提とされてきた。そのため、アプリケーション(用途)実現の主役である液体材料に対して特性調整が求められることも多く、実現されるアプリケーション性能が低下することがあった。

本研究は、既成 IJ プリントヘッドに頼るのではなく、「アプリケーション要件に対して最適化した IJ プリントヘッド仕様の導出」を行い、安価・簡易なハードウェアやオープンソフトウェアを用いて「自分たちが欲しいカスタマイズ IJ プリントヘッドを、自ら製作する」アプローチを提案・実証する。

2. 「自分が欲しい IJ プリントヘッド」は「自分が作る」

以下、実現するアプリケーション題材を設定し、その題材をユースケース例として、アプリケーション要件に最適化したカスタマイズ IJ プリントヘッドの設計・作成を行う。アプリケーション題材として設定するのは、立体物表面に対する非接触加飾である。

まず、最も重要な主要件として、塗布・印刷する液体材料の特性(粘性や表面張力)を踏まえた「IJ 成立性の保証」がある。これは、どんなアプリ題材

でも、IJ 技術を使う場合、大きな基本要件となる。

それに加えて、今回の題材、立体物表面への非接触加飾が目的であれば、対象物とプリントヘッド間の接触を防ぐために、対象物とプリントヘッドの形状・大きさ等に応じた「対象物・プリントヘッド間の距離(液滴飛翔距離)」も、衝突回避などのために重要な要件である。以上、「IJ 成立性の保証」「液滴飛翔距離の保証」を 2 大基本要件として、IJ プリントヘッドの設計と製作を行う。

なお、一般的な既存 IJ プリントヘッドが備えるが、本題材では不要な機能もある。たとえば、1 次元に多数のノズルが並べられた複数ノズル機能は、曲率を持つ 3 次元曲面への印刷ではメリットが少ない。さらに、複数多ノズルのプリントヘッドは、対象物に近づく際の衝突を生じやすく、むしろデメリットである。そこで、本題材では、単ノズルのカスタマイズ IJ プリントヘッドを設計・製作していく。

3. 粘性材料を数十 mm 離れて印刷する IJ ヘッドを作る

ヘッド仕様を見積もるための材料・アプリ要件は、

- ・(液体材料特性に応じた) IJ 成立性の保証
- ・液滴飛翔距離の保証

である。本題材では、液体材料として食用油(オリーブ油)を設定し、

- ・粘性係数: $0.06 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$
- ・表面張力: 0.03 (N/m)
- ・比重: $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

という液体材料特性のもと、IJ プリントヘッドの基本仕様(ノズル径と液滴吐出速度)範囲を決定する。また、保証する液滴飛翔距離は、20~40mm 程度を目安とする。

3.1. 液滴飛翔を実現するための「ノズル径」上限・下限

IJ プリントヘッドのノズルから吐出された液滴が、飛翔中も液滴として保持されるための条件として、Weber 数と Reynolds 数から定まる Ohnesorge 数 (Eq.1)を 0.1 以上(噴霧状のサテライト液滴にならない)、かつ、1 以下(液滴吐出が粘性散逸に妨げられない)の範囲に収める必要がある[1]。Ohnesorge 数は、液体材料特性項と液滴直径(≡ノズル径 L)間の関係式として表されるため、式変形により、ノズル径 L の上・下限が定まる(Eq.2)。

$$\text{Ohnesorge数}(Oh) = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{Weber数}(We) = \frac{\rho L v^2}{\sigma}, \quad \text{Reynolds数}(Re) = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (\text{Eq.2})$$

- ・ μ : 粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$)
- ・ ρ : 密度 (kg/m^3)
- ・ σ : 表面張力 (N/m)
- ・ L : 代表長 (m) (液滴直径)
- ・ v : 代表速度 (m/s)
- ・ ν : 動粘性係数 (動粘度) ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) (m^2/s)

$$L = \left[\frac{\mu^2}{Oh^2 \rho \sigma} \right] \quad (1 > Oh > 0.1) \quad (\text{Eq.2})$$

3.2. 液滴吐出を実現する「ノズル径・吐出速度」下限

次に、ノズルから液体材料を液滴吐出するため、液滴の表面張力を慣性力が上回る条件「Weber 数が約 4 を越える(Eq. 3)」を満たす必要がある[2][1]。Weber 数は、液体材料特性項と液滴直径(≡ノズル径 L)や液滴吐出速度 v 間の関係式であるから、ノズル径 L と液滴吐出速度 v 間の値制約が定まる(ノズル径 L に依存した形で、液滴吐出速度 v に対する下限が定まる)。

$$v^2 L = \frac{We \sigma}{\rho}, \quad v = \sqrt{\frac{We \sigma}{L \rho}} \quad (We > 4) \quad (\text{Eq.3})$$

3.3. 着弾飛散を防ぐ「ノズル径・吐出速度」上限

最後に、着弾時の液滴飛散を防ぐ制約条件「対象物表面特性と Reynolds 数と Weber 数に対する制約式 (Eq. 4)」を用いて[1]、「着弾時の吐出速度≡液滴吐出速度」と仮定した上で、IJ プリントヘッドの「ノズル径」「液滴吐出速度」上限を算出する。

$$We^{1/2} Re^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50$$

$$\left(\frac{\rho L v^2}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{v L}{\nu} \right)^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50$$

$$v^{5/4} L^{3/4} \left(\frac{\rho}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\nu} \right)^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50 \quad (\text{Eq.4})$$

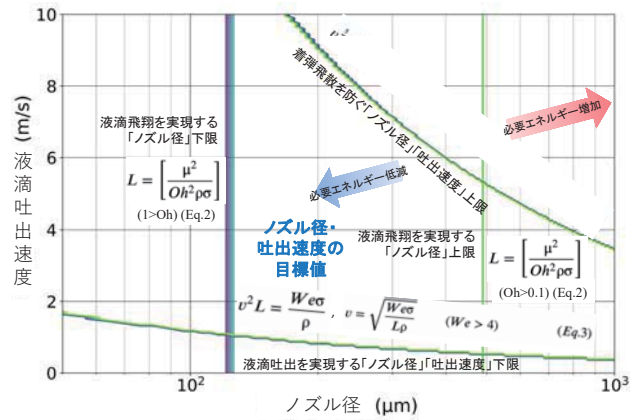


図 1. 材料・アプリ要件に応じた IJ プリントヘッド成立範囲

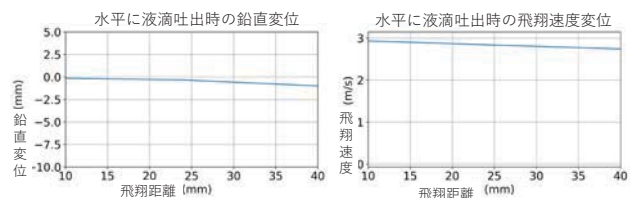
「着弾時の吐出速度≡液滴吐出速度」という仮定は、(3.4 で導出された)液滴直径(≡ノズル径)と吐出速度を用いた際の飛翔液滴周りの Reynolds 数見積りから、飛翔液滴周辺の空気流は層流条件となり、滴飛翔距離が数十 mm 程度までは、飛翔速度の低下は 10%程度(飛翔経路も直線に近い)という計算にもとづく。この仮定については、OpenFOAM による IJ シミュレーションを用いた解析結果でも、同様の結果を得ている(図.2)。

3.4. IJ プリントヘッド「ノズル径・吐出速度」仕様範囲

ここまでで導出された、要件(液体材料特性用途)から決まる「ノズル径・液滴吐出速度」の範囲を図示したものが、図 1 である。4 本線に囲まれた領域が、本題材用途にカスタマイズする IJ プリントヘッドの成立範囲となる。

以上の「IJ プリントヘッド仕様の成立範囲導出」は、従来の「既存ヘッド仕様を前提とした液体材料特性仕様の導出」の逆アプローチである。本研究の提案を端的に書くと、「従来とは逆に、目的に対しては順に考える」である。

なお、IJ プリント・ヘッドが液滴に与える運動エネルギーのオーダーは $L^3 v^2$ となり、横軸に対し 3 乗、縦軸には 2 乗の関係で、右上に向かうほど必要エネルギーが大きくなる。そこで、回路簡素化や電気・メカ的なダメージ低減のために、成立領域の左下部分を「ノズル径・吐出速度」の目標値とする。



(a) 飛翔液滴の速度・方向変化見積り(層流・球形仮定)



(b) OpenFOAM による飛翔吐出・速度見積り

図 2. 飛翔液滴の速度変化見積り

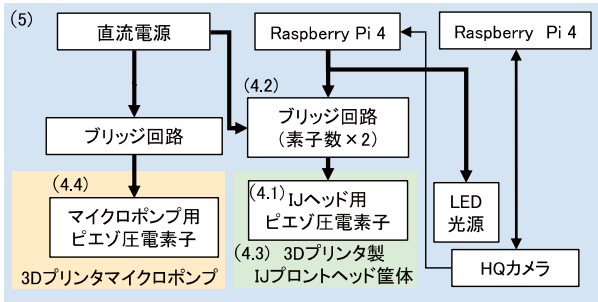
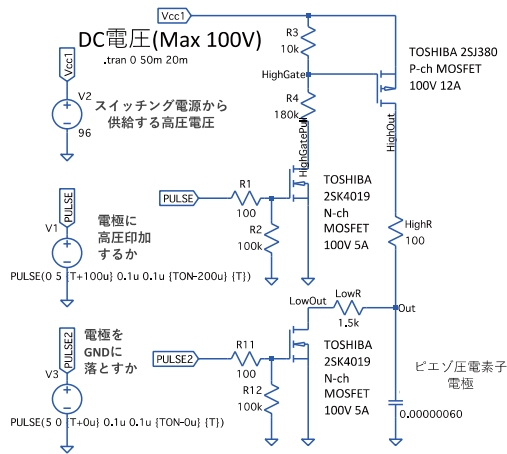
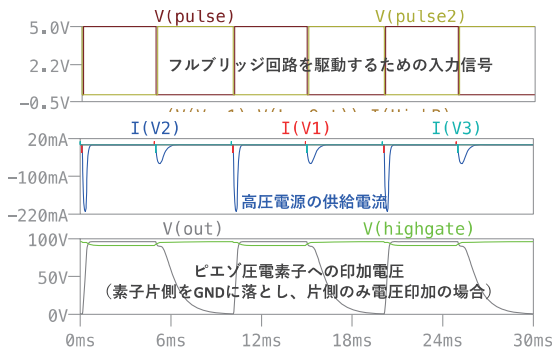


図3. 電子ブザー用ピエゾ圧電素子を加圧源として、3DプリンタやRaspberry Piなどで作成したIJプリントヘッドと液滴吐出挙動の計測治具概要



(a) 電圧印加のためのフルブリッジ回路(素子片側あたり)



(b) LTspiceを用いた部品仕様・出力波形見積り

図4. ピエゾ圧電素子への電圧印加回路(片側あたり)

4. 材料自由度が高い「ピエゾIJプリントヘッド」を作る

IJプリントヘッドの一般的な方式としては、電熱による加熱発泡で液滴吐出を行うサーマルIJや、印加電圧に応じて変形するピエゾ圧電素子による加圧で液滴吐出を行うピエゾIJがある。本研究では、材料やアプリケーション自由度がより高いピエゾIJを採用する。サーマルIJ方式を採用した場合、発泡加圧のために水性材料が必須となり、材料・アプリケーション自由度が少なくなってしまうからである。

以下、作成したピエゾIJプリントヘッド、および、飛翔液滴の挙動観察装置を説明する(全体概要は図.3)。

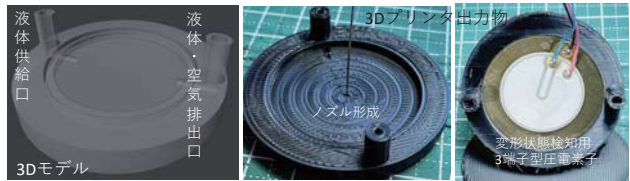
4.1 100円で買える「電子ブザー用ピエゾ圧電素子」



(a) 直径20φ素子を使った片面加圧・側面吐出形態



(b) 直径41φ素子利用の両面加圧・側面吐出形態



(c) 直径41φ素子利用の片面加圧・背面吐出形態

図5. FDM方式およびSLA方式の3Dプリンタ出力を用いて製作した、構成の異なるIJプリントヘッド筐体の例

誰でも安価・簡易に入手することができるピエゾ圧電素子として、電子ブザー用のピエゾ圧電素子がある。近所の電気屋やオンラインの電子部品ショップに行けば、直径10mm～50mm程度の大きさのものが1個100円以下で売られている。そこで、(MonomorphもしくはUnimorph型などと呼ばれる)電子ブザー用のピエゾ圧電素子を使ったピエゾIJプリントヘッドを作成する[3][4]。

なお、電子ブザー用の円形ピエゾ圧電素子を電界印加により変形させる場合、直径が大きな方が「ピエゾ圧電素子の(円平面と直交する方向の)変形長」も「圧力室の体積変化」も大きい[5]。そこで、ノズル径も吐出速度も大きい本題材例では、大直径のピエゾ圧電素子を用いてIJプリントヘッドを作成する。

4.2 ピエゾIJヘッドの「駆動回路」と「電子部品構成」

液滴吐出のために行うピエゾ圧電素子への電圧印加は、安価に作成もしくは購入可能なMOSFETフルブリッジ回路を介して、Raspberry Piから制御する。フルブリッジ回路で電圧切り替えを行うことで、極性反転を含む3レベルを組み合わせた電圧波形を、ピエゾ圧電素子に対して与える。駆動回路構成や部品仕様は、駆動周波数・印加電圧を踏まえ、下記のように設定した。

まず、駆動周波数については、印加電圧の切り替え時間(≒吐出時間 t)が、

$$\text{リガメント(ligament)長} \div \text{吐出時間}(t) \times \text{速度}(v)$$

という関係と、液滴直径(≒ノズル径 L)のオーダーがリガメント(ligament)長と同程度となる関係を用いて、

$$\text{吐出時間}(t) \div \text{ノズル径}(L) / \text{速度}(v)$$

と見積もることができる。本題材の場合、吐出パルス周期は100μs(周波数:10kHz)前後となる。

次に、印加電圧については、本題材で液滴に与える

運動エネルギーが大きく、 piezo 圧電素子の変形量は、ほぼ印加電界に比例することから[5]、片側 100V を印加可能な仕様とした。図.4 は、無料使用が可能な、アナログ・デバイセス社提供のアナログ回路シミュレータ LTspice を用いて部品選定・回路検証を行った例である。

4.3 3D プリンタで出力した「piezo IJ プrintヘッド管体」

piezo 圧電素子を取り付け、液体材料を吐出する IJ プrintヘッドの管体は、3D プリンタ(FDM 方式の FLASHFORGE Adventure 3 Lite と SLA 方式の ANYCUBIC PHOTON MONO)で作成した。ノズル部は、3D プリンタ出力の精度では不十分なため、加熱した金属針による熔融やマイクロドリル穿孔により作成した。

3D プリンタを用いて、IJ プrintヘッド構造の出力を行うと、さまざまなPrintヘッド構成を容易に試すことが可能である。たとえば、図.5 は作成した IJ プrintヘッド例であり、(a)(c)のような電子ブザー用の piezo 圧電素子を駆動源として、Bend(たわみ)モードの片面加圧を行う構造例や、(b)のような (Shear モードではなく Bend モードを用いる点については異なるものの) Xaar 社の Shared Wall 構造のような両面加圧を行う構成など、要求特性に応じた構造を持つ IJ プrintヘッドの試作が可能である。

4.4 電子ブザーで「一定量供給マイクロポンプ」も作る

今回の題材、立体表面に対する非接触加飾では、液体材料を吐出する IJ プrintヘッドの鉛直高さや吐出方向は一定でない。そのため、IJ プrintヘッドの圧力室に一定圧力で液体供給を行うのではなく、ノズルからの液滴吐出と連動して液体供給を行うことで、圧力室内に一定量の液体を保持する機構とした。

圧力室への液体供給は、IJ プrintヘッドと同様に、電子ブザー用の piezo 圧電素子を駆動源とする (diaphragm と組み合わせた) マイクロポンプ(図.6)を 3D プリンタで作成し、吐出量に応じた供給を行った。

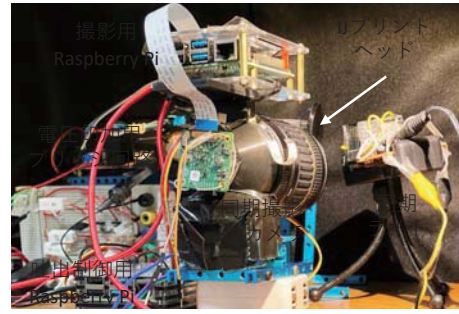


図 6. piezo 圧電素子にマイクロ流路制御とダイアフラムバルブを組み合わせたマイクロポンプ

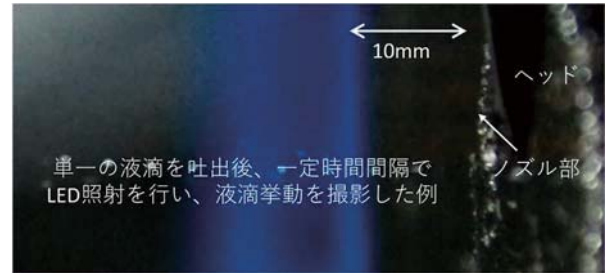
5. Raspberry Pi で液滴吐出・同期撮影の制御を行う

IJ プrintヘッドや液体供給ポンプの制御は、安価なシングルボードコンピュータ Raspberry Pi が備える GPIO(General Purpose Input/Output)から MOSFET フルブリッジ回路を介して制御する。さらに、観察撮影用に別途用意した Raspberry Pi に HQ カメラを接続し、撮影 IJ プrintヘッドからの液滴吐出を同期させることで、吐出液滴の飛翔挙動の撮影・計測も行った(図.7)。

以上に説明したシステムで、液滴吐出や吐出挙動撮影を行った例が、図.7 である。ノズルから吐出された液滴が 100mm 程度も直線的に飛翔する過程や、飛翔速度などを確認することができる。このように、高速吐出



(a) Raspberry Pi による吐出・撮影の同期計測



(b) 単一液滴の吐出に同期した複数露光撮影例

図 7. 作成した IJ ヘッドで液滴飛翔過程を撮影した結果例

される液滴の観察なども、安価なマイコンやカメラモジュールなどを用いて実施することができた。

6. まとめ

3 次元非接触加飾を題材として、実現すべきアプリケーション・材料要件をもとに、最適化した IJ プrintヘッドの基本仕様設計と製作を行うアプローチを提案し、製作実証を行った。設計と試作に用いた道具や環境は、いずれも安価・容易に購入できる電子部品や 3D プリンタなどであり、少人数グループはもちろん個人レベルまで、「誰でも」実現可能なアプローチである。

残課題としては、メカ設計や製造作業において、試行錯誤を繰り返し必要としたことが挙げられる。今後、目的のアプリケーションを容易に素早く実現するために、試行錯誤を低減する道具立てや環境整備を行いたい。

参考文献

1. B. Derby. "Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution". Annual Review of Materials Research Vol 40(2010), pp.395-414.
2. P. C. Duineveld, et al. "Ink-Jet Printing of Polymer Light-Emitting Devices". MRS Online Proceeding Library Archive 624 (2000), pp.117-122.
3. M. Alden, "Heated Piezo for Jetting Wax", (2013), https://reprap.org/wiki/Heated_Piezo_for_Jetting_Wax
4. A. Bowyer, "Reprappable-inkjet", (2013), <https://reprap.org/wiki/Reprappable-inkjet>
6. A. Neto, et al. "Piezoelectric Buzzer Optimization for Micropumps", Proceedings of the 2012 COSMOL Conference in Boston (2012)

3D プリンティング材料のための構成モデルの音響キャリブレーション法

Acoustic Calibration Method of Constitutive Model for 3D Printing Materials

钟 圣泽, プンポンサノン パリンヤ, 岩井 大輔, 佐藤 宏介

Shengze ZHONG, Parinya PUNPONGSANON, Daisuke IWAI, Kosuke SATO

大阪大学基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

(zhong@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {parinya, daisuke.iwai, sato}@sys.es.osaka-u.ac.jp)

【要約】

アディティブマニュファクチャリングでは、材料の機械的特性が構造の設計と最適化に重要な役割を果たします。本研究では、モーダルサウンドによって材料構成モデルを取得するための音響校正方法を提案します。アディティブマニュファクチャリングにおける材料構成モデルの役割を紹介し、関係を分析します。材料構成モデルとモーダルサウンドを融合させ、モーダルサウンドにより材料構成モデルを回帰させる最適化手法を提案します。この手法は、複雑な機器を使用せずに材料特性の迅速な評価を実現し、製品の最終設計品質を向上させるのに役立ちます。

キーワード: 3D プリンティング, 構成モデル, モーダルサウンド

【Abstract】

In additive manufacturing, the mechanical properties of materials play a vital role in designing and optimizing structures. We propose an acoustic calibration method for obtaining the material constitutive model by modal sound. It introduces the role of the material constitutive model in additive manufacturing, analyzes the relationship between the material constitutive model and modal sound, and proposes an optimization method of regressing the material constitutive model through modal sound. This method is helpful to realize the rapid evaluation of material properties without using complex instruments to improve the final design quality of products.

Keywords: 3D printing, constitutive model, modal sound

1. Introduction

The development of additive manufacturing technology has triggered personal manufacturing and led to rapid prototyping and structural optimization design. Through 3D printing, individual users can enrich their living space with personalized structures; companies can achieve rapid design iterations to considerably shorten the product design cycle. With the continuous evolution of 3D printing structures from ornaments to functional parts, users have put forward higher requirements for structures' mechanical performance, such as load-bearing and vibration.

Introducing material constitutive models in the design process meets these growing demands. The material constitutive model describes the material's mechanical response under load by numerically correlating stress and strain. This relationship is of great significance for the design of parts with mechanical performance requirements. After obtaining the material constitutive model, users can choose materials that are more in line with product characteristics, or they can significantly improve the performance of materials by optimizing the structure design without increasing the consumption of

printed materials [1], like the MBB beam (i.e., a supported

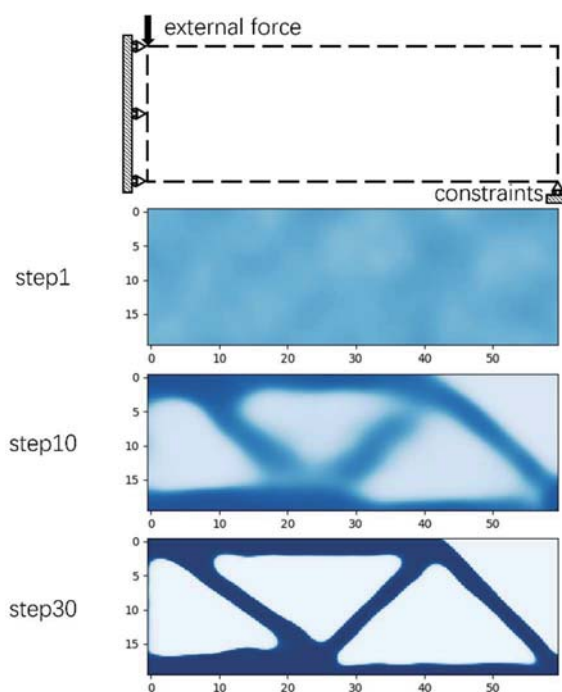


Figure 1. Optimization of 2D MBB beam. With the material constitutive model, the structure is generated with stronger

loading performance and lower weight after iterations.

beam which removes material to perform weight reduction while maintaining low compliance) [2] as shown in Figure 1.

Previously, it was difficult to obtain the constitutive model of 3D printing materials. Most 3D printed material documents do not contain the corresponding constitutive model, and the traditional constitutive model calibration method requires complex experimental equipment and operations, such as using amplified audio and laser to force and record the material's vibration [3] or use fixtures and machine tools to conduct groups of material deformation experiments [4]. In order to enable individual users to measure material properties easily, this research proposes a user-friendly acoustic calibration method that regresses the constitutive model of the material based on the modal sound of the 3D printed sample.

2. Acoustic Calibration Method

In this section, we first introduced the application of the constitutive model in structural design, followed by the calculation of modal sound through the constitutive model. Finally, we proposed the method of using modal sound to regress the material constitutive model.

The material constitutive model describes the relationship between stress and strain. In practice, the constitutive model $\mathbf{c}$ is a 6×6 matrix of material constants [5], which includes normal and shear stress-strain relationships $\sigma = \mathbf{c}\epsilon$, as shown in equation 2.1.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{61} & \cdots & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

When there is a precise demand for the force feedback of the structure, we need a more accurate constitutive model to complete the optimal design. For example, when designing the supporting flange of a shelf, we need a constitutive model to ensure that the structure looks elegant while having sufficient load-bearing capacity. Besides, when the structure is embedded in a more complex system, the constitutive model can be used to calculate and adjust the natural frequency of the structure to avoid resonance. For example, in vehicle design, there are requirements of high NVH performance (noise, voice harshness), and structures' frequency design is of great importance.

In order to observe such stress-strain relationship to calibrate the material constitutive model, the conventional method deforms the material to observe the stress-strain relationship. However, the individual user does not have such experimental equipment. Therefore, we consider

using modal analysis (to be more specific, modal sound) to observe loaded material's stress and strain relationship.

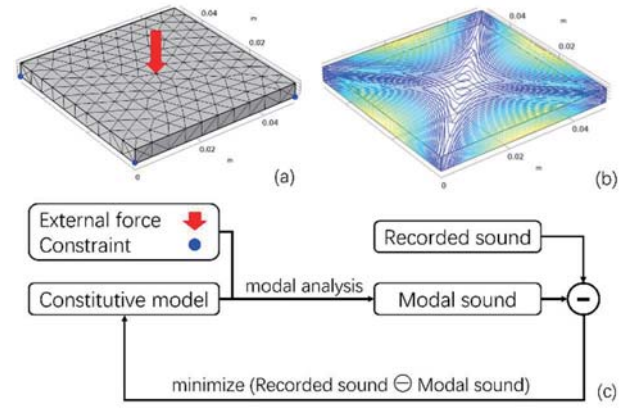


Figure 2. The proposed acoustic calibration scheme of the material constitutive model. (a) The 3D printed structure for calibration. The red arrow is the external force, and the blue dots are constraints. (b) The vibrated structure under a particular mode. (c) The constitutive model calibration process, which aims to minimize the difference between simulated and recorded sound.

Modal analysis is widely applied for measuring structural vibration in aerospace, vehicles, ships, and electrical appliances. Engineers often conduct finite element analysis according to the structure's CAD model and material parameters to obtain the computational modal. They then use the exciter to knock the vibration sensor attached to the structure's surface to obtain the experimental modal. The experimentally measured modal is also helpful to calibrate the material parameters. However, it is essential for individual users who cannot access industrial equipment to measure structural vibration more straightforwardly. Therefore, we propose a method to measure vibration using sound, which only needs a microphone.

The modal sound is closely related to the constitutive model of the material. Derivation from the constitutive model to modal sound can be divided into two parts. The first part is the vibration process. That is, the object produces modal vibration under external force. For linear systems, this vibration can be decoupled into N orthogonal single-degree-of-freedom vibration, corresponding to the N modes of the system. The second part is the acoustic transfer process, that is, the vibration of the object surface excites the surrounding air to produce a sound pressure change, and such sound pressure change will eventually radiate to our ears or the microphone and become the sound we perceive. During this process, the material constitutive model determines the vibration frequency of each mode, thereby determining the final tone of the sound. The force, constraints of the structure,

and the acoustic transfer process can be understood numerically as a filter for each modal frequency, which determines the amplitude of each sound frequency. In the experimental scenario of this article, amplitude change caused by acoustic transfer is tinier, so it is not considered in the modal sound simulation process.

Through finite element analysis, we can establish the relationship between the constitutive model and the vibration. Using the constitutive model $\mathbf{c}$ and the structure shape, the element stiffness matrix $\mathbf{k}_e$ can be assembled, as shown in equation 2.2.

$$\mathbf{k}_e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{B} dV = \mathbf{V}_e [\mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{B}] \quad (2.2)$$

Here $\mathbf{k}_e$ is the element stiffness matrix, $\mathbf{c}$ is the constitutive model. V_e is the element volume, and $\mathbf{B}$ is the strain matrix. These parameters depend on the finite element method. With $\mathbf{k}_e$, we can assemble the structure stiffness matrix $\mathbf{K}$. The mass matrix $\mathbf{M}$ is generated in a similar way with material density and the structure shape.

Therefore, solving the structure modal vibration becomes a generalized eigenvalues problem, which is

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{M} \mathbf{U} \omega^2 \quad (2.3)$$

The solution consists of eigenvalue $\omega = \sqrt{S}/2\pi$ and eigenvector $\mathbf{U}$. Eigenvalue ω is used to calculate the frequency of each mode, and eigenvector $\mathbf{U}$ represents the displacement of each node of the finite element under free vibration. Combined with the known external force and constraint, we can finally calculate the modal vibration of the structure as the weighted sum of each modal frequency and amplitude product [6].

Therefore, we associate the material constitutive model with modal sound. For ease of understanding, we can regard the modal sound as the dependent variable y ; structure shape, external force and constraint as independent variable x . The constitutive model participates in the connection between the independent variable x and the dependent variable y as $y = f(\mathbf{c}, x)$. With groups of paired (x, y) , we can optimize the best constitutive model to minimize the difference between the simulated and real modal sound. The whole calibration process is illustrated in Figure 2.

We use a conventional microphone to record the modal sound of sample parts printed with nylon material using the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer (Ultimaker3). We initialize the material with orthotropic conditions based on Young's modulus and Poisson ratio. During the experiment, we obtain multiple groups of data with different shapes and knocking positions. Specifically, we apply modal frequency with the highest amplitude difference as features to regress and estimate results. The experimental results are shown in Figure 3, where red lines show the feature frequency computed from the uncalibrated constitutive model, and blue lines show the

feature frequency with the calibrated constitutive model, demonstrating a higher frequency than experimental results. It shows that calibrated constitutive model fits better to the ground-truth experimental results.

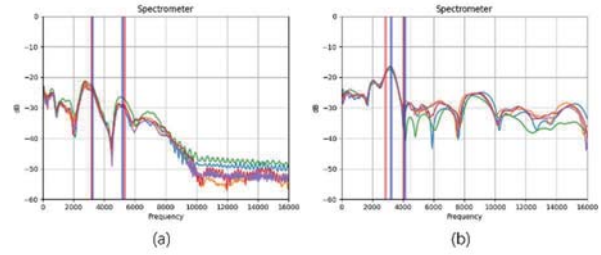


Figure 3. Modal sound of two FDM 3d printed parts with different thickness, where (a) 6mm, (b) 4mm. Each part is knocked 5 times in case of operation error. Red and vertical lines demonstrate feature modal frequencies before and after constitutive model calibration.

3. Conclusion

The acoustic calibration of the material constitutive model proposed in this paper provides a convenient and low-cost method to figure out 3D printing material mechanical property for individual users and studios. This constitutive model will allow user for better material selection, optimized structure design, and improve mechanical performance.

参考文献

1. Bendsoe, Martin Philip, and Ole Sigmund. Topology optimization: theory, methods, and applications. Springer Science & Business Media, 2013.
2. Sigmund, Ole. A 99 line topology optimization code written in Matlab, Structural and multidisciplinary optimization, Vol 21, 2, pp. 120–127, 2001.
3. Joël Cugnoni, Thomas Gmür, Alain Schorderet. Inverse method based on modal analysis for characterizing the constitutive properties of thick composite plates, Computers & Structures, Vol 85, 17–18, pp. 1310–1320, 2007.
4. Yap, Yee Ling, et al. A non-destructive experimental-cum-numerical methodology for the characterization of 3D-printed materials—polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene (PC-ABS), Mechanics of Materials, Vol. 132 pp. 121–133, 2019.
5. Liu, Gui-Rong, and Siu Sin Quek. The finite element method: a practical course. Butterworth-Heinemann, 2013.
6. Changxi Zheng and Doug L. James. Toward high-quality modal contact sound. ACM Trans. Graph. 30, 4, Article 38, 2011.

苔を活かした日本型「土」3D プリンティングによる社会環境彫刻の試み

Attempt of Sculpture for Social and Biological Environment by Japanese Style "Soil" 3D Printing
Utilizing Moss

松木 南々花¹, 名倉 泰生², 知念 司泰¹, 大村 まゆ記³, 田中 浩也¹,

青木 竜太⁴, 青山 新⁴, 伊藤 光平⁵

Nanaka MATSUKI¹, Yasuo NAGURA², Moriyasu CHINEN¹, Mayuki OMURA³, Hiroya TANAKA¹,

Ryuta AOKI⁴, Shin AOYAMA⁴, Kohei ITO⁵

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

⁴METACITY, ⁵株式会社 BIOTA

¹Faculty of Environment and Information Studies Keio University, ²Graduate School of Media and Governance Keio University, ³Faculty of Policy Management Keio University, ⁴METACITY, ⁵BIOTA Inc.

【要約】

本研究は土材料を使用した建築スケール 3D プリンティングの分野において、日本の温暖湿潤な気候特性を活かした展開可能性を探究するものである。同分野の世界的な先行事例の分布を見ると、殆どが乾燥地域に位置している。湿潤な気候は材料の乾燥速度などの面で不利であることがその一因であるが、一方で多様な生態系の醸成には好条件である。この点に着目し、土と苔を組み合わせた社会環境彫刻を制作した。彫刻はひだ状に造形された赤玉土と籾殻、加えて表面の苔から構成され、苔の環境的特性を最大化するように内外が設計されている。内部には森林から採取した土壌を投入し、この彫刻を都市空間に設置することで、森林の持つ潜在的状態を都市に移植することを試みた。この一連のプロジェクトを「Bio Sculpture」とし、これまで2回行ってきた展示の概要を述べる。

キーワード: 建築スケール, マテリアル, 土, 苔, 都市

【Abstract】

This study explores the possibility of utilizing Japan's warm and humid climate in the field of architectural-scale 3D printing using soil materials. Looking at the distribution of precedents in this field worldwide, most of them are located in arid regions. This is partly due to the fact that a humid climate is disadvantageous in terms of the drying rate of materials, but on the other hand, it is a favorable condition for fostering a variety of ecosystems. Focusing on this point, I created a socio-environmental sculpture that combines soil and moss. The sculpture consists of folds of red clay, rice husks, and moss on the surface, and is designed inside and out to maximize the environmental characteristics of the moss. The interior is filled with soil collected from the forest, and by installing this sculpture in an urban space, we attempted to transplant the latent state of the forest into the city. This series of projects is called "Bio Sculpture", and the following is an overview of the two exhibitions that have been held so far.

Keywords: architectural scale, material, soil, moss, urban

1. 序論

建築スケール 3D プリンティングの分野で土材料を使用している事例は多く見られる。イタリアの3Dプリンタ開発会社であるWASPは、地元の土壌をマテリアルとしてTECLAと呼ばれる住宅のプリントを実現した[1]。スペインの大学であるInstitute for Advanced Architecture of Catalonia(IAAC)は、地元の材料から作られた粘土を使用して環境調節を目的とした壁を製作した。これは年間の日射や風向などに対して最大限の効果を発揮するようにパラメトリックに設計されている[2]。アメリカサンフランシスコのEmergingObjectsは、粘土と水と麦わらを混ぜた伝統的な材料を用いてキャビンや窯を製作した[3]。

先行事例の分布を見ると、以上のようにほとんどが

砂漠気候や地中海性気候などの乾燥した地域で行われていることがわかる。(図1)これは土と水を混練した泥というマテリアルが、コンクリートのように科学反応によってではなく、水分の蒸発によって硬化するものであるからだと考えられる。日本は大部分が温暖湿潤気候であり泥を材料とした3Dプリントには造形の面から不向きである。一方で、土の塊を放置するだけで苔などの植物が繁茂する(図2)といった特性を持つ。これは設置したものが次第に環境と馴染むとも捉えられ、周囲の環境に負荷を与えないというメリットが考えられる。

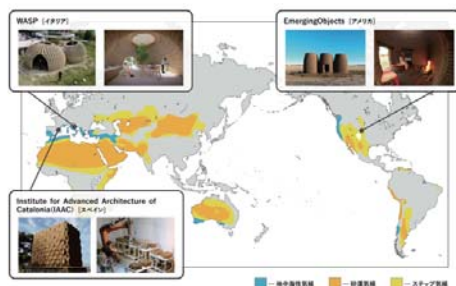


図 1. 事例の世界分布と気候区分



図 2. 屋外に放置した土から植物が生える様子

2. ArchiFAB NIWA

本研究は当研究室の所有する建築 3D プリンタ「ArchiFAB NIWA」を用いている(図 3)．ArchiFAB NIWA は 30m² の造形範囲を持つ世界最大規模のウインチケーブル式 3D プリンタである．フレームのスケールを自由に変更でき分解が可能で、可搬性が高い．出力機構はマテリアルエクストルージョン方式で、モルタルポンプによって土を主体とした自然素材を出力している．

以上の特徴から、ArchiFAB NIWA は地域ごとのサイトスペシフィックな介入によって、生態系や社会コミュニティに働きかけるデザインが可能であると考えられる．



図 3. ArchiFAB NIWA

われわれが使用しているポンプはホース径が 63mm であり、積層の際には、一層高さ 15mm の値で積み上げている．直径 500mm 高さ 500mm の円筒を出力するの

に必要な時間はおよそ 90 分である．

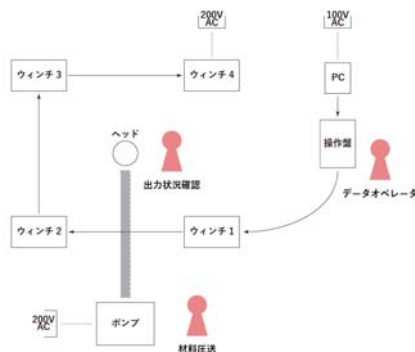


図 4. ArchiFAB NIWA システム図

3. Bio Sculpture

Bio Sculpture は、複数の自然素材にデジタル技術で新たな構造と配列を与え、生態系の一部を作り出す「人新世」の社会彫刻を模索することを目的としたアートプロジェクトとして、田中浩也研究室と METACITY のコラボレーションによって開始された．

ひだ状に造形された赤玉土と粃殻、加えて表面の複数種類の苔から構成され、苔の環境的特性を最大化するように設計されている．内部には森林から採取した土壌を投入し、都市空間に移植することで、森の持つ潜在的状態を新たな環境下で可視化することを試みている(図 5)．



図 5. 彫刻の略図

なお、このひだ構造の造形は、Different Growth Model をモチーフとしたアルゴリズムにより、自由形状の面を任意の密度で均一に満たす様に生成されている．これにより苔を貼り付ける表面積が最大化される．

3-1 マテリアル

彫刻を構成するマテリアルとその詳細を述べる．

まず、ArchiFAB NIWA では赤土と藁を混合したものを出力している．

- ・赤土: 関東ロームから採取される粘土質で乾燥によって硬化する特徴を持つ土である．そのため、3D プリンタでの造形には適しているが植物の生育には不向きである．

- ・藁: 構造を強化するための骨材として使用する．藁、赤土、水を混合し発酵させると、藁の繊維が土の粒子に絡まって粘りを増し、割れにくく丈夫な素材となる．これは古くから土壁の製法としても用いられる手法である．

彫刻内部には、下層から順に赤玉土、粃殻、黒土、

森から採取した土壌を投入する。

- ・赤玉土: 赤土を乾燥させて粒状に加工したものである。団粒構造を形成するため適度な保水性や通気性を持ち、構造に安定した水分供給を行う。
- ・籾殻: 構造を支持する軽量の充填剤として機能する。土に混ざることで通気性を付与するとともに、植物の根張りを良くする効果を持つ。
- ・黒土: 火山灰土壌の表層の土と腐植が混合し堆積したものである。生物遺体が分解、腐植化されて生成される有機物を含み、保水力と保肥力に優れるといった特徴を持つため、植物の苗床となる。

上記 3 種のマテリアルで構成された内部環境は、最上部に投入する森の土に含まれる種子や微生物の生育に適した環境を構成する。

彫刻表面には複数種類の苔を配置する。後述の日照シミュレーションに基づき、彫刻の日向部分にはスナゴケ、半日向部分にはハイゴケを配置する。半日陰部分にはシッポゴケとタマゴケ、日陰部分にはホソバオキナゴケ、シノブゴケ、トヤマシノブゴケ、タチゴケ、コツボゴケを配置する。

これらの苔は高い保水力を持ち、環境変化に強い。乾燥しても枯死せず仮死状態に移行し分解されないため、二酸化炭素固定能力が他の植物よりも高いといえる。樹木のように施肥や剪定をする必要がなく、さほどメンテナンスを要しない。また、種類によって生育に適した日射量が異なるといった特徴を持つ。そのため、Bio Sculpture においては日照シミュレーションに基づいて日向から日陰まで段階的に造形物に苔を配置した(図 6)。

日照シミュレーションには 3DCAD「Rhinoceros」の 1 機能である Grasshopper のプラグイン「Honeybee Ladybug」を用い、展示場所における積算日照量を採用した。

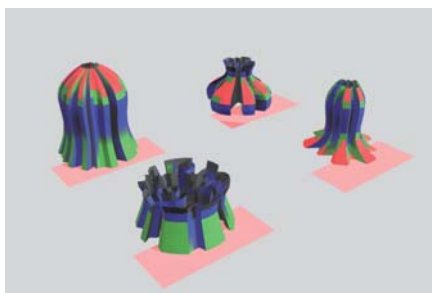


図 6. 日照シミュレーションに基づく苔の配置分布

4. 展示の実践

4-1 北九州未来芸術祭 ART for SDGs

北九州にて開催された「北九州未来創造芸術祭 ART for SDGs」では、彫刻 4 台に加えて ArchiFAB NIWA 本体も展示し、会期中に一台を出力した(図 7)。

4 台の彫刻には上段、中段、下段それぞれに環境センサー「SmartCitizenKit」[4]を設置し、温度、湿度、光量、二酸化炭素濃度などのセンシングを行い、光量と二酸化炭素濃度に相関を見ることができた。彫刻内最上

部には北九州の緑地から採取した土壌を投入したところ、会期中に複数の植物が発芽した様子を確認することができた(図 8)。また、展示終了後に 1 台を同施設内に移設し、常設とした(図 9)。



図 7. 北九州未来芸術祭 ART for SDGs での展示風景



図 8. 彫刻から発芽する様子



図 9. 常設した彫刻

4-2 生態系へのジャックイン展

千葉県にある日本庭園「見浜園」にて開催された「生態系へのジャックイン展」では、前述の ART for SDGs に対し、よりデータの収集とそのビジョンを提示する展示を行った。ドーム型のビニールテント内に彫刻 1 台とセンシングデータを表示するモニターを設置し、未来のラボを演出した(図 10)。展示終了後に同県内の遊休地に移設し、最長 2 年の長期経過観察を行っている(図 11)。隔週で彫刻内と彫刻周辺から土壌を採取し、マイクロバイーム解析を行う。



図 10. 生態系へのジャックイン展での展示風景



図 11. 常設した彫刻

5. 今後の展望

5-1 マイクロバイーム解析

土壌中には数百を超える細菌群集(マイクロバイーム)が存在している。それらの複雑な群集構造を網羅的に同定し、変動性を推測するために、土壌中の細菌 DNA において保存性が高く、種の同定に用いられる 16S rRNA 遺伝子領域をゲノムシーケンスする。

彫刻内と彫刻周辺から採取した土壌(図 12)は、植物や小石など粒度の高い物質をふるいにかけて除去した後、速やかに実験室のフリーザー(-30 度)にて保管した。

土壌から微生物 DNA を抽出し、PCR 法にて 460bp の V3-V416S rRNA 遺伝子領域を増幅し、ライブラリ調製を行った後に、次世代シーケンサ(Illumina Miseq)にてゲノムシーケンスを実施する。シーケンスデータは、株式会社 BIOTA [5] の解析プラットフォーム上で配列品質フィルタリングやエラー修正を実施したのちに、マイクロバイームの多様性や組成を網羅的に解析する。

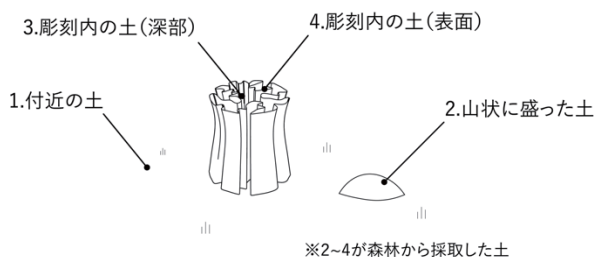


図 12. 土の採取箇所

5-2 都市空間への展開

生活環境における緑地の割合と住民の一般的な健康状態には、経済状況に関係なく正の相関があるという研究がある [6] [7]。また、アレルギー疾患や自己免疫疾患などの特定の症候群は、都市化の進行に関連しているといった研究も存在する。都市化に伴う衛生技術向上により微生物に触れる機会が減少するため人間の免疫系が不具合を起こすことが一つの要因である[8] [9]。

以上の観点からも、土壌に含まれる多様な微生物を効率的に都市に持ち込み、またモニュメントとして住民とのインタラクションを生む Bio Sculpture は、新しい都市デザインのひとつとして活用される可能性がある。

その観点を踏まえて、今後は新たな形状を探索していく。微生物増殖の観点から考えると、彫刻内部の土壌を定期的に攪拌する必要がある。攪拌が可能であるというだけでなく、都市住民とのインタラクションを通して攪拌する行為に必然性が生まれるとより望ましい。加えて、都市のシンボルとなり長期にわたって愛される彫刻とするための形状を考慮する必要がある。

2 回に渡る展示実験の知見に加えて、リサーチやユーザー評価を通して新たな形状を考案し、都市空間への設置を目指していく計画である。

参考文献

1. Alberto Chiusoli. “TECLA”. WASP.
<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>. (参照 2021-09-15)
2. IAAC. “TERRAPERFORMA”.
<https://iaac.net/project/terraperforma/>. (参照 2021-09-15)
3. Joel Ferree. “At Home with Rael San Fratello”. Unframed - LACMA. 2020-11-23.
https://unframed.lacma.org/2020/11/23/home-rael-san-fratello?fbclid=IwAR0_VbAwWTKekpATeEPGYbHj6kyXHtBqbtgK_g3Zi4P8ABrrEmxYgELNShU. (参照 2021-09-15)
4. Smart Citizen Kit. <https://smartcitizen.me/>
5. 株式会社 BIOTA. <https://biota.city/>
6. Maas J, Verheij RA, Groenewegen PP, et al. “Green space, urbanity, and health: how strong is the relation?”. *Journal of Epidemiology & Community Health* 2006;60:587-592.
7. Groenewegen, P.P., van den Berg, A.E., de Vries, S. et al. “Vitamin G: effects of green space on health, well-being, and social safety”. *BMC Public Health* 6, 149(2006).
<https://doi.org/10.1186/1471-2458-6-149> (参照 2021-09-15)
8. Nicolaou N, Siddique N, Custovic A. “Allergic disease in urban and rural populations: increasing prevalence with increasing urbanization”. *Allergy*. 2005 Nov;60(11):1357-60. doi: 10.1111/j.1398-9995.2005.00961.x. PMID: 16197466. (参照 2021-09-15)
9. Moises Velasquez-Manoff (原著), 赤根 洋子 (翻訳). (2014) 寄生虫なき病, 文藝春秋

謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

双安定なキリガミ構造による曲面設計手法

Design of curved-surface by bistable Kirigami

豊岡 龍弥¹, 舘 知宏¹

Ryuya Toyoka¹, Tomohiro Tachi¹

¹ 東京大学

¹University of Tokyo

【要約】

シート材料に切込みを与えるキリガミは、平面から曲面変形を起こす性質により、曲面形状の 4D Fabrication 法として着目されている。特に双安定構造を含むキリガミパターンを用いることで、境界を固定することなく形状が安定する。一方で面外への剛性の確保や、意図しない安定状態の除去が問題となるため、双安定性を生み出す部材の歪みの量の制御が欠かせない。本研究では双安定構造を含むキリガミパターンで、与えられた曲面を構築する新しい設計手法を提案する。特に、せん断変形するスリット中にバーを付加する構造により、構造体の変形中の歪みの量を事前に設計可能とする。

キーワード: 双安定, 切り紙, 等角写像, レーザーカット

【Abstract】

Kirigami has been focused as a 4Dfabrication method for curved surfaces because of its property of deforming to curved surface deformation from flat sheet. In particular, the Kirigami patterns containing bistable structures allows the shape to be stable without fixing the boundaries. On the other hand, it is essential to control the amount of strain in the component that generates the bistability because of weakness about keeping the out-of-plane stiffness and developing unintended stable states. We propose a new design method to construct a given surface with a Kirigami pattern containing bistable structures. Especially, we make it possible to design the amount of strain in advance by using a structure with a bar to shear-deforming slit.

Keywords: Bistable, Kirigami, Conformal mapping, laser cutting

1. 序論

シート材料に切込みを与えるキリガミは、平面から曲面変形を起こす性質により、曲面形状の 4D Fabrication 法として着目されており、彫刻[1]やアダプティブなファサード[2]への応用がなされており、建築構造や機械的メタマテリアルなどへの応用も期待される。

キリガミは各スリット周りで等方的な拡大を示す auxetic な性質を持ち、面内変形の拡大率が矛盾を起こすことで面外座屈を生じる。等方的であることから、平面から任意の曲面への変形は等角写像の拡大率の分布を求めることで設計可能である。Choi らは、等角写像を初期状態としたパターン最適化によって、曲面をプログラムする手法を提案した[3]。Konakovic-Lukovic は、三角形パネルを用いた切り紙構造を等角写像によって設計している[4]。しかしこのようなキリガミ構造は一般に高い自由度を持つため、形状安定のために、ヒンジの塑性化や外部からの支持などを必要とする。

キリガミ構造の中には、ユニット毎に展開前後の 2 状態がエネルギー障壁を挟んでそれぞれ安定となる「双安定構造」が現れるものがある[5]。Chen らは[4]と類似の手法を[5]の双安定構造に適用し、ユニット毎に割り当てられた拡大率で安定となるように双安定構造を設計し、外部の支持無しに端部を広げるだけで平面から安定した自由曲面を作ること成功した[6]。

しかし、Chen らの手法にはいくつかの課題が残されている。例えばユニット数が増えるに従い機構の自由度が大きくなる傾向にあるため、完成した曲面の面外剛性が低い。また、ユニット毎に収縮と展開状態が独立に決定し、構造全体としては双安定構造ではなく多重安定構造となり、展開動作が連動しないという問題点がある。

本研究では、自由度の低い双安定キリガミ構造のユニットを提案し、さらに変形過程での最大歪みを設計可能とすることで、面外剛性の確保と連動性の改善を目指す。具体的には、星形キリガミ構造[7]のスリットにバーを加え、Ahmad らの双安定機構[8]を挿入した、新規の双安定キリガミユニットを提案する。等角写像を用いてターゲットの曲面での各ユニットの拡大率を求め、ユニットごとに平面状態とその拡大率での二つの状態で安定となるように、バーの挿入の位置を設計する(2 節)。さらに、平面状態の展開パラメータなども調節することで、加えたバーの最大歪みを一定値として設計する(3 節)。この設計システムは、Rhino/Grasshopper 上で実装した。4 節では、既存構造との機構の自由度を比較し、本手法の妥当性を議論する。最後に設計、ファブリケーションの実例を紹介する(5,6 節)

2. 曲率の設計

2.1 星形キリガミ構造

Auxetic 構造とは応力を加えて拡大させると、その応

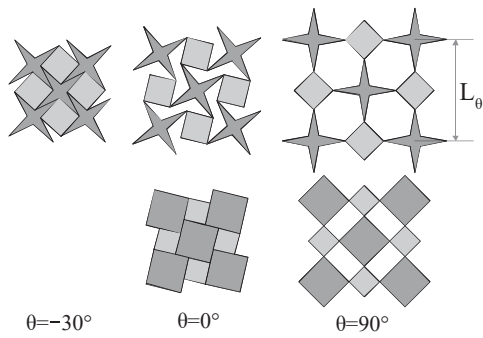


図 1 : (上)星形キリガミ構造 (下)一般的なキリガミ構造

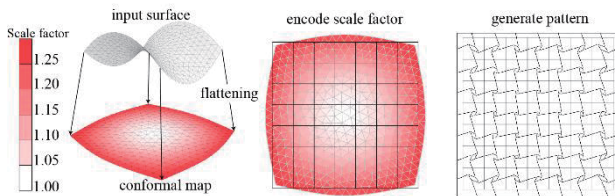


図 2 : 等角写像を用いた拡大率の割り当て

力方向と垂直な方向にも拡大するという、ポアソン比が負である挙動を示す構造の総称である。キリガミ構造によって、角を回転ジョイントで接続したタイル構造が生まれ、等方的に展開するポアソン比が常に-1のauxetic構造となる。キリガミの最大の拡大率は、一般の凸多角形を用いたものでは $\sqrt{2}$ 倍である。本研究では、最大拡大率の上限を $(1 + \sqrt{2})$ 倍まで増やした Yang ら[7]のカット形状を基本パターンとして用いる。これによって、対応できる拡大率分布を広げ、設計できる曲面を増やす。

2.2 等角写像による拡大率の決定

等角写像とは曲面上の角度を保つ写像で、任意の性質の良い曲面は等角写像によって平面に写すことが可能である。この時各点は等方的な拡大を示すため、キリガミの等方的な変形を表現することができる。等角写像による拡大率分布を用いてキリガミの設計を行う。

本手法では、目的曲面を三角形メッシュで離散化したものを用いる。図2は等角写像による設計フローを示す。離散的な等角写像を実現するために、頂点回りの隣接エッジの角度を保つ角度バネと、各頂点をxy平面に引き寄せるバネ要素を設定し、動的緩和法によって収束させることで求めた。実装には Rhino/Grasshopperのプラグインである Kangaroo2 を用いた。この時の各エッジの拡大率を算出しキリガミ構造の拡大率に用いる。キリガミ構造のユニットはグリッド状に配置されているので、メッシュの等角写像をグリッドで覆い、含まれるエッジの拡大率の平均値を、そのユニットの拡大率とした。

等角写像は、全体形状を任意の係数でスケールアップすることが可能である。最終的なキリガミ構造の最大拡大率に収まるように、係数を設定する。

2.3 双安定ユニット

星形キリガミでは正方形の一部を切り抜き星形にすることで自己交差を防いでいる。切り抜く前の形状を観察し、回転ヒンジのループをつなぐと、平行四辺形のリンケージがある事がわかる。この四節リンケージに、Ahmadらの手法[7]でバー拘束の追加による双安定性の付与を行う。

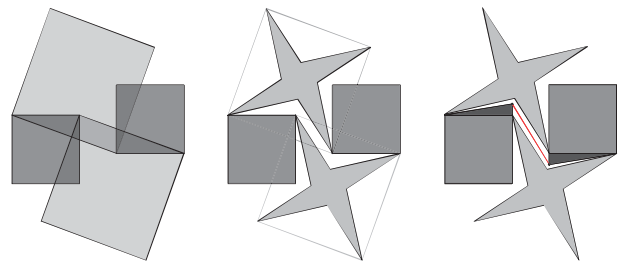


図 3 : 双安定ユニットの作成

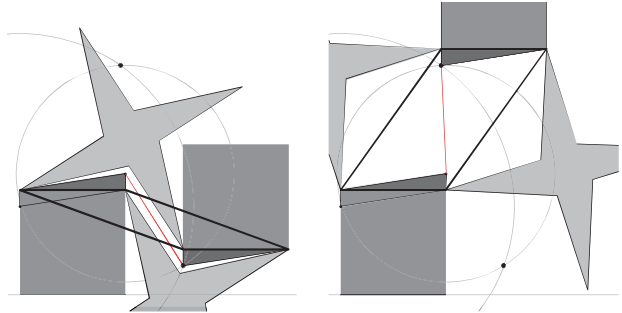


図 4 : バー拘束の設計

設計ではユニットの対称性を仮定し、平行四辺形の重心で点対称になるものとする。また、バーは平行四辺形と連結している必要があるため、平行四辺形上のエッジに適当な剛体を取り付け、バーと連結させる。これにより双安定挙動を示すユニットを作成する。このユニットを「双安定ユニット」と名付ける。図3に双安定ユニットの作成の様子を示す。

等角写像で得られる拡大率は、キリガミ構造の展開状態のうち任意の2状態を指定して定められるため、双安定構造の形状設計は自由度が1つ残っている。そこで条件式として、バー拘束の最大ひずみを与えることで展開時のエネルギー障壁を揃え、ユニット形状を確定させる(3節)。

図4はバー拘束の設計を示す。バーを加える前のユニットは平行四辺形のせん断変形により、拡大率が変化する。その時バーの端点に当たる点は、図4の大きい円を描く。この円上で、指定された拡大率となる点を求める。次に、この機構にバーを加えると、バーの端部を中心にバーの長さを半径とした円と、上記の円との交点が双安定点となる。すなわち指定した拡大率から求めた点が2円の交点となるようにバーを設計すればよい。

また、バーに蓄積されるひずみが最大となるのは2円の軌道が最も離れる時であり、この距離は交点位置によって変化する。

3.設計パラメータ

ベースとなるキリガミ構造は、シートにカッティングを加えた時点では互換性を保つので、展開前はすべての平行四辺形リンケージが同じである必要がある。双安定ユニットのパラメータとして、平行四辺形の辺長比 $\gamma (>1)$ 、初期安定角 $\alpha (-45^\circ < \alpha < 90^\circ)$ 、ユニットの拡大率 $s (s < S_{\max})$ 、最大ひずみ ϵ 、を考える。ここで $S_{\max}$ はキリガミ構造の最大拡大率である。

変形するキリガミの空隙部を表す平行四辺形 ABCD に、図のような2つの安定角度 α, β をもつようなバー拘

束を取り付けた双安定ユニットを考える。ここで、辺 AB、BC の辺長比は γ ($\gamma > 1$) で規格化しており、バー拘束のみ柔な線材とする。バーの両端 E、F は平行四辺形の重心 G で点対称とし、対称性を与えている。すなわち端部 E の位置が定まるとバーの形状が決定する。またバーは平行四辺形と連結している必要があるため、端部に対し剛体 ABE と剛体 CDF を考える。E を AB の中点 O 中心に半回転させた点を E' とし、第二安定点 β まで回転した時の F の位置を F' とする。

バーに追従する F の回転中心を E とすると、長さ EF を半径とする円 E 上の軌道を描く。しかし F は同時に平行四辺形とも追従し、点 E' を回転中心とする長さ E'F ($=\gamma$) を半径とする円 E' 上の軌道を描く。このときバーのみ変形を許容しているため、バー端部は円 E' の軌道上を動く。バーの変形が最大となるのは弧 FF' の中点まで F が移動した時である。弧 FF' について円 E のものを M、円 E' のものを M' とすると、バーのひずみ ε は

$$\varepsilon = \frac{EM'}{EF} = \frac{\{(EM + EO + OE') - E'M'\}}{EF} = \frac{(EF + 2EO - \gamma)}{EF} \quad (1)$$

で表現される。

また、図 1 のキリガミ構造で示す通りに、同一フェイス間の距離を L_θ とする。 θ が α から β に展開するときの L_θ の拡大率 s は、

$$s = \frac{L_\beta}{L_\alpha} = \frac{\sqrt{(\gamma + \sin \beta + \cos \beta)^2 + (\gamma + \sin \beta - \cos \beta)^2}}{\sqrt{(\gamma + \sin \alpha + \cos \alpha)^2 + (\gamma + \sin \alpha - \cos \alpha)^2}}$$

となる。以上より、双安定ユニットの形状は、設計パラメータ γ 、 α 、 s 、 ε で決定することが出来る。

ただし、与えられた最大歪みと拡大率から、設計パラメータの解が得られないこともある。この時は、等角写像の拡大率の係数を調整することで解が得られることもある。

4.DOF の比較

双安定キリガミ構造の DOF は、低いほうが面外剛性やメカニズムの連動性が高くなると考えられる。

図6はキリガミ構造のユニット毎の DOF を表しており、Rafsanjani ら[5]の手法で作られるパターン A(左)、本研究の単安定キリガミ構造に双安定バーを追加したパ

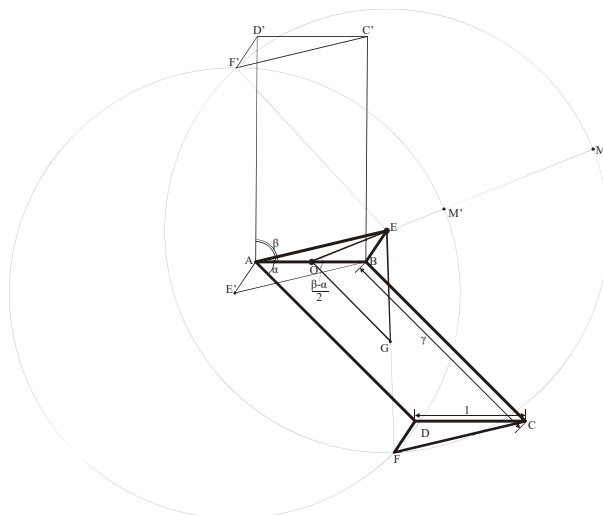


図 5: 双安定ユニットの設計

ーン B(右)について、クッツパッハ・グルーブラー基準に従い DOF の計算をする。

キリガミ構造はそれぞれ単一のメッシュで構成されている。ここで、メッシュ数をそれぞれ N_A 、 N_B とする。A は 2 種の剛体からなり、三角形剛体は面の数 N_A に、非凸な三叉の剛体の数は頂点の数 $2N_A$ に等しい。また接合部はすべてピンとし、その数は $3N_A$ である。以上より A の DOF は 0 となる。B も 2 種の剛体からなり、どちらも面の数 N_B に等しく、ピンの数は $4N_B$ である。ただし、バーは両端ピンではなく、2 点間の距離を保つ拘束とするので、バーごとに DOF は -1 される。バーの数は N_B に等しいので全体の DOF は $-2N_B$ となる。

$$A: DOF = 6(N_A + 0.5N_A) - 3(3N_A) = 0$$

$$B: DOF = 6(2N_B) - 3(4N_B) - (2N_B) = -2N_B$$

すなわち、もともと双安定構造である A よりも、単安定構造にバー拘束を追加した B は DOF が下がり、より剛な曲面設計が可能だと考えられる。

5.ファブリケーション

単安定のキリガミ構造にバーが既に追加された形状を

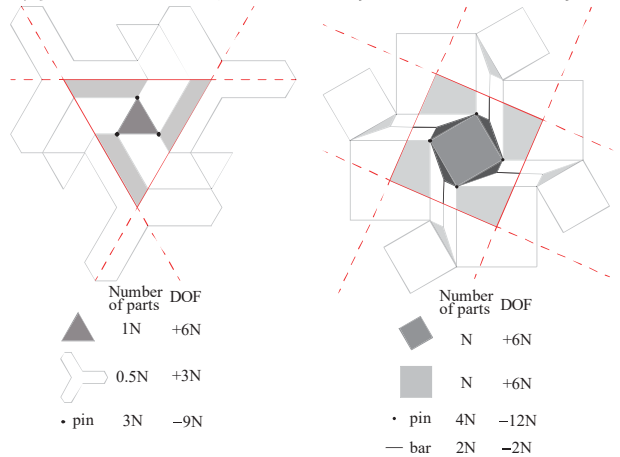


図 6 : ユニット毎の DOF の比較

平面シートからカッティングして切り出し、曲面形状に展開させる。図はレーザーカットで切り出した PE フォームである。

使用した PE フォームの厚さは 5mm、四角形メッシュの 1 辺の長さをそれぞれ mm とした。また、切り出す際分断されないようにかつコンプライアントヒンジとなるように、ヒンジ部で接している切り出し線を 1.0mm 離すなどの調整をした。使用したレーザーカッターは PLS6MW で、10.6 μ m CO₂ レーザーを 30W で運用、カットスピードを 160mm/s とした。

6.結果

実際に作成したモデルと入力した目標曲面を図 7 に示す。ドームのライズ(高さ/底面の一辺長)を比較すると、モデルは 6.2cm/37.0cm=16.8%、入力曲面は 5.113cm/11.00cm=46.4% となった。誤差は $(46.4 - 16.8) \times 100 / 46.4 = 63.8(\%)$ となり、入力曲面から大きく異

なる形状となってしまった。

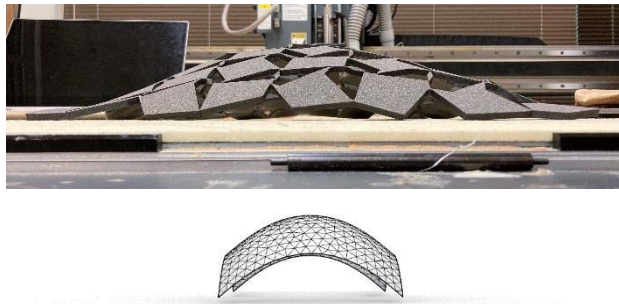


図 7：(上)作成した模型(下)入力曲面

7.結論

結果をみると境界条件や材料選定を見直すとともに適切な比較を行うべきだと考えられる。いまだに過去の研究と比較して多重安定性に大きな改善はみられておらず、またパラメータによる解空間の範囲が判明していないので、将来的に構造の詳細な剛性や双安定性の導出を行い、それをもとに最適化をする必要があると思われる。

現段階では過去の研究との構造的な比較や、多重安定性の回避に関して行っていない。ただし、機構の自由度の比較によると将来的に我々の提案手法のほうが数値的に上回ると予想される。

参考文献

- [1] Lalvani, H., 2011. Multi-directional and variably expanded sheet material surfaces, Dec. 27. US Patent 8,084,117.
- [2] Kuboki, H., Tanaka, H., Ohno, S., Sugita, K., Takayanagi, N., Nakajima, N., Yuasa, K., and Nakatani, T., 2019. “A proposal for “reactive wall panel” using auxetic patterns”. In Conference on 4D and Functional Fabrication 2019.
- [3] Choi, G. P., Dudte, L. H., and Mahadevan, L., 2019. “Programming shape using kirigami tessellations”. Nature materials, 18(9), pp. 999–1004.
- [4] Konakovic-Lukovic, M., Panetta, J., Crane, K., and Pauly, M., 2018. “Rapid deployment of curved surfaces via programmable auxetics”. ACM Transactions on Graphics (TOG), 37(4), pp. 1–13.
- [5] Ahmad R and Damiano P., 2016. “Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs”. Extreme Mechanics Letters 9 (2016), 291–296.
- [6] TIAN CHEN, JULIAN PANETTA, MAX SCHNAUBELT, MARK PAULY, 2021. “Bistable Auxetic Surface Structures”, ACM Trans. Graph., Vol. 40, No. 4, Article1.
- [7] Yunfang Yang, Zhong You, 2018. “Geometry of Transformable Metamaterials Inspired by Modular Origami”, Journal of Mechanisms and Robotics,

vol.10,021001

- [8] Ahmad A, Craig L, 2018. “Shape-morphing space arame apparatus using unit cell bistable elements”. USF patents, 1048.

視線入力アプリで 3D プリンタを操作することで DTM 機器を演奏する研究

Playing music with a 3D printer manipulated by eye tracking application

濱中 直樹¹, 大友 高行², 林 園子¹, 鈴木 ゆかり³, 梶山 紘平⁴

Naoki HAMANAKA, Takayuki OTOMO, Sonoko HAYASHI, Yukari SUZUKI, Kohei KAJIYAMA

¹慶應義塾大学 SFC 研究所, ²東海大学, ³ファブラボ宮崎 β , ⁴無所属

Keio Research Institute at KEIO SFC, Tokai Univ., FabLab Miyazaki β , Independent

【Extended Abstract】

1. 3D プリンタのアクチュエータ転用

本研究は, 3D プリンタのアクチュエーターを活用して物質に限らない「つくる」を実現する装置に関するものである。筋ジストロフィーにより寝たきりの生活を余儀なくされている障害当事者が, 様々な活動に参加することを支援する取り組みのひとつである。この障害当事者は視線入力により, 従来は難しかった様々な活動に取り組めるようになってきた。趣味の音楽のためにソフトウェアシンセを開発するなど, 様々な夢を現実のものにしてきたが, 物理的にものを動かす, という要望はまだ叶えられていない。今回, 趣味の音楽をフィールドとしてその課題に取り組むこととなった。3D プリンタのベッドに DTM 機器を設置し, 障害当事者が使用する PC のアプリで視線入力により制御データとなる Gcode を生成し, シリアル通信を介して 3D プリンタを制御する。3D プリンタのヘッド, および, DTM 機器のレバーやノブに取り付けたアタッチメントにより, 3D プリンタの動きを機器操作の動作に変換して演奏する。この様子は 2021 年 2 月 27 日に開催されたメイカソンの最終発表会で実況中継された。この研究を通して工作機械の転用が障害当事者の QOL に与える影響を評価する。

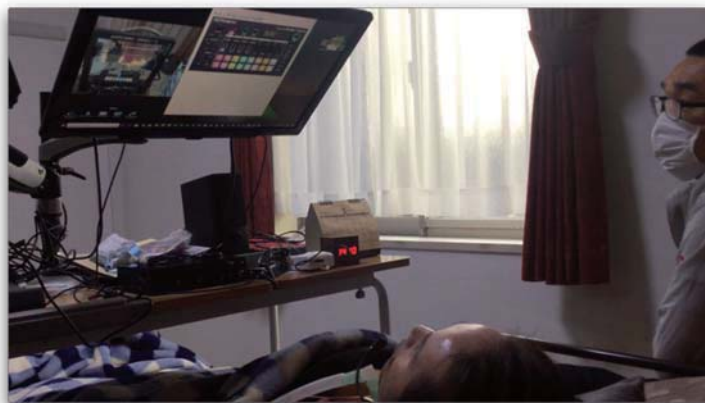


図 1. 視線入力アプリにより 3D プリンタ上の DTM 機器を物理的に操作する障害当事者

2. まとめ

寝たきりの生活を続ける障害当事者にとって, 身体運動を伴う活動はあきらめざるを得ないものと捉えられがちである。しかし, 様々な方法で少しでも夢を実現できることは大きな生きがいにつながる。今回, 3D プリンタのアクチュエーターを活用してごく短い期間に手足の可動域がほとんどない障害当事者が物理的に DTM 機器を操作できるようになった。楽器を弾いたり, 機材を操作する, という極めて身体的な営みはアーティストたちに常につきまとう表現であり, ファンはその憧れを隠さない。この障害当事者もその例にもれず, 視線入力という手段であれ, 物理的に機材を操作できることは, この障害当事者にとってこの上ない喜びである。今後はほかの機器の転用可能性も含め, 操作の即時性をどこまで高めることができ, 音楽で重要なグルーブを生み出していくことができるかが課題になる。

参考文献

Y. Kuroki, K. Watanabe, “Application of Functgraph and consideration of function generation”, Conference on 4D and Functional Fabrication 2020, OP-10 (2020), pp.37-40

ゲルプリンティングにおける熟練者技能の継承に向けたアイトラッキング 動画解析

Eye tracking video analysis for inheriting expert skills in gel printing

落合 俊樹¹, 渡邊 洋輔², 小川 純², 川上 勝²,

エムディナヒン イスラム シブリ², アジット コースラ², 古川 英光²

Toshiki OCHIAI¹, Yosuke WATANABE², Jun OGAWA², Masaru KAWAKAMI²,

MD Nahin Islam SHIBLEE², Ajit KHOSLA², 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】

我々が先導する3D ゲルプリンター「GelPiPer」の開発プロジェクトでは、ゲル造形熟練者の技能を読み解いてマニュアル化し、初心者にもマニュアルを提示することでゲルプリンターの導入ハードルを下げる狙いがある。本研究は、複合現実スマートグラス HoloLens2 に搭載されているアイトラッキング機能を用いて、初心者と熟練者が「GelPiPer」を操作するとき、どこを注視しているのか、主観映像から抽出する。造形の際、熟練者から聞き取りした操作方法のフローチャートマニュアルと、熟練者の造形の様子を主観視点および客観視点から撮影した動画を、操作マニュアルとして提示する。被験者の造形物の精度の違い、視点、操作時間、アンケート結果から共通項、相違点を解析した結果を分析したところ、熟練者と初心者の中で特に重視する作業工程に違いがあることがわかった。

キーワード: 3D, 3D ゲルプリンター, アイトラッキング, フローチャート

【Abstract】

Our research team is developing a 3D printer "GelPiPer". This task aims to lower the hurdles for introducing gel printers by presenting the skills of gel modeling experts in a manual. Therefore, in this research, we use the eye tracking installed in HoloLens 2 to extract where the beginners and experts of GelPiPer operation are watching when operating "GelPiPer". Make a flow chart manual of the operation method that you heard. Similarly, show the subjective and objective operation videos of the expert. Find common items and differences from the difference in accuracy, viewpoint, operation time, questionnaire result of the subject's modeled object. In result, common items and differences were found. Based on the analysis results of the experiment, a better manual will be created.

Keywords: 3D, 3D printer, eye tracking, flow chart

1. 序論

我々は2011年頃から3D ゲルプリンターの開発を進め[1][2]、現在はより多くの人にゲルの三次元造形に触れてことを目的として、卓上型の3D ゲルプリンターである GelPiPer を複数台組み立てている。GelPiPer の開発プロジェクトでは、ゲルを扱ったことのない研究機関に対してゲルの造形技能を提供することで技術イノベーションの創造や技術応用を誘発させ、ゲルの3D プリンターという概念を産業界に普及するという理念を掲げている。しかし、ゲルの3D プリントにはゲル特有の柔らかさを考慮した材料の選定や装置の造形パラメータの調整、造形データの修正などが必要で、操作を行う者には経験と知識を要する。現状の GelPiPer にはゲル造形に関する重要な操作やパラメータが明確にされておらず、ゲル造形の熟練者技能は暗黙知となっている。

一方で、スポーツや建設業務の分野では、熟練者の



図 1. 3D ゲルプリンター「Gel PiPer」の外観

視点や時間から行動の情報を抽出することで、暗黙知を明確化できることが報告されている[3][4] GelPiPer も同様に暗黙知を文章化し、マニュアルがあれば、初心

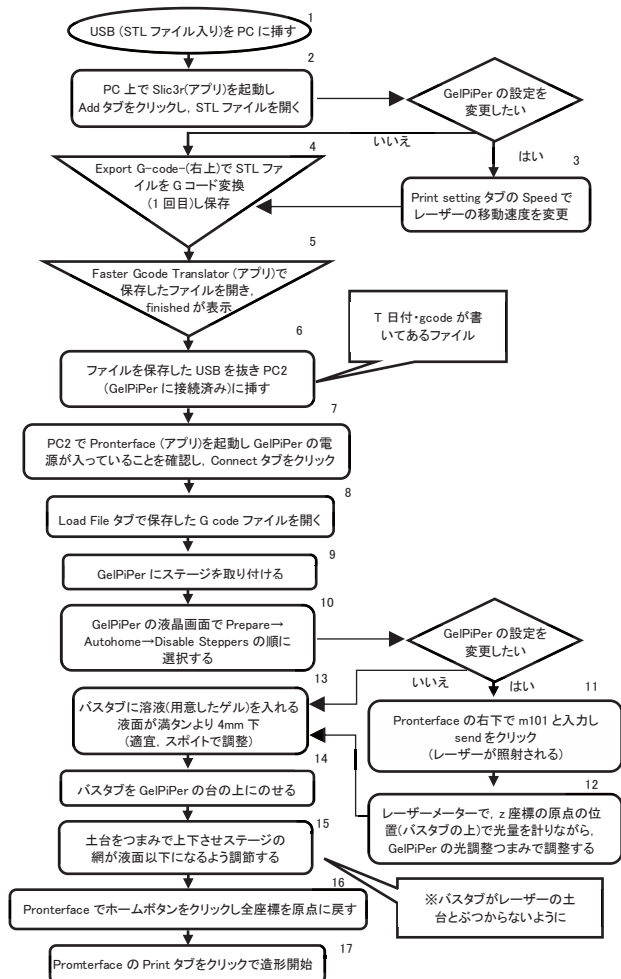


図2 Gel Piper の操作手順を示したフローチャート

者にとって扱いやすい装置となり社会実装が進むと考えた。そこで本研究では、初心者と熟練者の GelPiPer 操作時の視点動作をアイトラッキングし、その動画を解析した。そして初心者と熟練者および造形精度の違いと操作視点に関連性があるか検証する。加えて、実験

後にマニュアルについてのアンケートとフローチャートの操作工程ごとの重要度をスコア化し、定量的評価と動画解析の結果に基づいて、熟練者の重視する工程と初心者が陥りやすいミスについて明らかにする。

2. 実験

2.1 アイトラッキング装置

今回アイトラッキングに使用する装置は HoloLens2 である。HoloLens2には、被験者がどこを見ているのかを認知し、映像に注視している点が赤点で表示されるプログラムを構築した。注視点は被験者の視野内で、0.4 秒に 1 回表示される。

2.2 被験者

被験者は GelPiPer の操作期間 1 週間未満の初心

表 1. 被験者の映像と STL データの組み合わせ

	映像	STL データ
初心者 1	主観	空中立方体
初心者 2	主観	円錐
初心者 3	客観	空中立方体
初心者 4	客観	円錐
熟練者 5		空中立方体
熟練者 6		円錐



図3. 造形物の STL データ

者 4 名と操作期間 2 か月以上の熟練者 2 名を対象とした。

2.3 実験準備

初心者には GelPiPer 操作のための映像のマニュアルと紙面上のフローチャートのマニュアルを提示した。図 2 にフローチャートマニュアルを示す。フローチャートの工程は、CAD で作成した STL ファイルが入った USB を PC に挿し、GelPiPer で造形を開始するまでとした。各工程に上から順に 1~17 の番号をふる。本実験では、図 2 中の右側に記載している 3・11・12 の工程は事前に設定しており、被験者が行うことはない。

映像マニュアルは熟練者が HoloLens2 を装着して撮影した主観映像と、一眼カメラで撮影した客観映像を用意した。被験者に造形してもらう形は中空構造の立方体と円柱で、「Fusion360」で作成した。作成した STL データを図 3 に示す。

初心者と熟練者には 2 つの STL データと 2 つのマニュアル動画をランダムに見せた。今回の実験において、被験者に渡したデータと、見せた映像の組み合わせの表を表 1 に示す。

2.4 実験手順

初心者には、最初に映像マニュアルとフローチャートを同時に提示した。この際、映像は繰り返し見てもよいこととした。一通りの動作を理解したあとは、フローチャートが手元にある状態で造形開始までの工程を行った。

工程に取り掛かる前に、HoloLens2 を装着し、視点調整、動画撮影開始、アプリ起動を行った。また、初心者

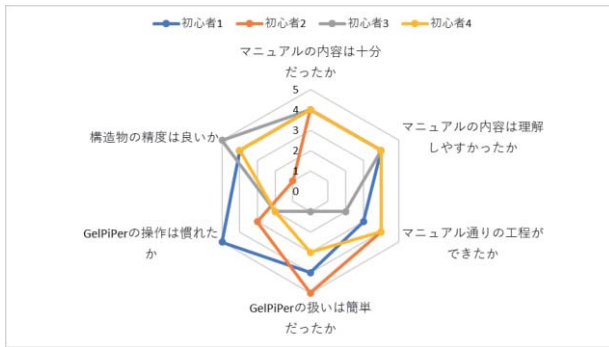


図 4. アンケート結果グラフ

表 2. 各工程の所要時間(s)

被験者	2	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15
初心者 1	60	20	70	18	15	20	19	28	138	76	110
初心者 2	38	30	118	10	16	14	20	23	48	20	30
初心者 3	178	25	175	8	20	25	39	55	65	29	62
初心者 4	60	178	60	18	20	18	19	58	82	10	125
熟練者 1	15	20	10	8	14	9	25	18	50	10	55
熟練者 2	22	15	10	8	8	16	9	28	26	10	68

は、操作がわからない工程があれば質問をしてもよいこととした。すべての工程が終わり、造形が終了後にアンケートを実施した。アンケートはマニュアル、GelPiPer に関する 6 項目の質問である。

また、熟練者はフローチャートを見てもらい、HoloLens 2を装着して、造形を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 アンケート結果

アンケート結果を図 4 に示す。5 段階評価で実施し、評価項目は左から「マニュアルの内容は十分だったか」、「マニュアルの内容は理解しやすかったか」、「マニュアル通りの工程ができたか」、「GelPiPer の扱いは簡単だったか」、「GelPiPer の操作は慣れたか」である。

3.2 各工程の所要時間の算出

HoloLens2で撮影した動画を見て、被験者ごとの各工程にかかった時間を算出した。今回は時間に違いがでた工程 2～15 の 11 工程を用いる。3, 11, 12 は除く。被験者ごとの各工程の所要時間のデータを表 2 に示す。50 秒以上かかった工程は数値を赤字にて記載している。

3.3 各工程の所要時間のベクトル差

被験者の表 4 にある各工程の時間をベクトルの要素とし、被験者ごとの 11 次元ベクトルで被験者同士のコサイン類似度を求めた。コサイン類似度は 2 本のベクトルがどれくらい同じ向きを向いているのかを示す指標であり 1 から+1 の値を取りうる。求め方を式(1)に示す。

表 3. 各工程の時間と要素の数値の関係

時間の範囲(s)	0~10以下	10~20以下	20~30以下	30~40以下	40~
要素の数値	-2	-1	0	1	2

表 4. 被験者ごとのコサイン類似度

	初心者 1	初心者 2	初心者 3	初心者 4	熟練者 1	熟練者 2
初心者 1		0.63	0.71	0.49	0.15	0.16
初心者 2			0.67	0.73	0.37	0.33
初心者 3				0.76	0.19	0.15
初心者 4					0.23	0.31
熟練者 1						0.78
熟練者 2						

表 5. バスタブとレーザーの台の視点の数

被験者	1	2	4	5	6
視点の数(個)	110	50	120	90	100

$$\cos(\vec{A}, \vec{B}) = \left(\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| |\vec{B}|} \right) \quad (1)$$

$$\vec{A} = (x_1 + x_2 + \dots + x_{11})$$

$$\vec{B} = (y_1 + y_2 + \dots + y_{11})$$

A, B は比較する 2 人の被験者とする。x, y に関して、秒数の間隔で要素の数値を決める。各工程のかかった時間と要素の数値の関係を表 3 に示す。表 2, 表 3, 式(1)より、各被験者のコサイン類似度を求める。求めた結果を表 4 にまとめた。

表 4 より、熟練者同士の組み合わせはコサイン類似度が 0.78、初心者同士の組み合わせの平均は 0.67、熟練者と初心者の組み合わせの平均は 0.24 となった。11 次元ベクトルにおいて初心者と熟練者の組み合わせは、熟練者同士と初心者同士に比べてコサイン類似度が小さくなった。よって、初心者と熟練者には各工程にかかった時間が初心者同士、熟練者同士と比べて違うことがわかる。

3.4 視点情報

3.2 節よりバスタブとレーザーの台の調整の工程に熟練者が時間をかけていることがわかった。そこで工程 15 での、アイトラッキングによって得られた視点情報を解析した。初心者 2 と熟練者 1 から得られた視点情報を図 6 に示す。初心者 2 は構造物の造形精度が悪かったこと、熟練者 1 とのコサイン類似度が高かったため、この組み合わせを比較対象として採用した。図 5 はある工程における視覚情報を示したものである。バスタブとレーザーヘッドにおける視点(図 5 中の赤い点)の数を表 5 に示す。

3.5 考察

初心者のアンケート結果より、マニュアルに関する項目のスコアが高いため、マニュアル自体に問題はない。



初心者2

ゲルを入れるバスタブ



熟練者 1

図 5. アイトラッキングによって得られた視点情報

一方で、被験者の中で初心者2のみ造形に失敗しているため、造形失敗の原因は初心者2の視覚情報から類推できると考え、視覚情報の確認を行った。すると、GelPiPer 操作において、3.2 節と 3.3 節により初心者と熟練者では時間をかける工程が違うことが分かった。熟練者は 13, 15 の工程に特に時間をかけている。この工程の視覚情報を確認すると、熟練者はゲルの入ったバスタブ、レーザーの台をよく注視している。バスタブを置いた台とレーザーの台の調整が重要な操作であることがわかる。

4. 結論

GelPiPer の操作にて、初心者と熟練者の操作工程の時間の抽出、アイトラッキングによる視点情報の抽出をし分析したことで、GelPiPer のバスタブの液面の調整、バスタブとレーザーの台の調整が重要ということが分かった。本実験では、上記の工程にかけた時間が長く、視点の数がバスタブとレーザーの台に集中している人の造形はうまくいった。熟練者は上記の工程に特に時間をかけていた。本結果より、今後、GelPiPer のみならず、他の機械、また別分野にても熟練者の技能の抽出を検討したい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224、JP18H05471、JP19H01122、JST COI JPMJCE1314、JST OPERA JPMJOP1844、JST OPERA JPMJOP1614、ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508、

JPJ009237)、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第 2 期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO)によって支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 日出間り, 杉田恵一, 古川英光. (2011). 「レーザー走査照射による高強度ゲルの 3 次元光造形」、日本機械学会論文集 A 編、77(778), 1002-1006
- [2] Hisato Muroi, Ruri Hidema, Jin Gong, Hidemitsu Furukawa. (2013). 「Development of optical 3D gel printer for fabricating free-form soft & wet industrial materials and evaluation of printed double-network gels」, Journal of solid mechanics and materials engineering, 7 (2), 163-168.
- [3] 森田順也, 藤本奈央, & 柳田克巳. (2018). 視線データを活用した建設現場の品質管理技能伝承への取り組み. In 人工知能学会全国大会論文集 第 32 回全国大会 (2018) (pp. 1M202-1M202). 一般社団法人人工知能学会.
- [4] 村田厚生, & 森若誠. (2010). 危険予知課題における運転者の視覚情報処理特性-運転初心者と運転熟練者の比較. 人間工学, 46 (6), 393-397.

複数の高分子材料を組み合わせた触覚認知モデル

A haptic cognition model emerged from different polymer materials

廣瀬 航佑¹, 渡邊 洋輔², 小川 純²,
エムディ ナヒン イスラム ジブリ², アジット コースラ², 川上 勝², 古川 英光²

Kosuke HIROSE¹, Yosuke WATANABE, Jun OGAWA²,

MD Nahin Islam SHIBLEE², Ajit KHOSLA², Masaru KAWAKAMI², Hidemitsu FURUKAWA²

¹ 山形大学工学部

² 山形大学大学院理工学研究科

¹ Faculty of Engineering, Yamagata University

² Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

人間の口腔構造は歯や歯肉、舌などの物性の異なる触覚センサー群と捉えることができる。口腔内にモノが侵入すると、歯触りや舌触りなどを多角的に捉え、そのモノがどういう触感を持つ物体であるかを認識できる。そこで本研究は物性の異なる高分子材料による造形物を組み合わせて口腔構造をロボットアームのエンドエフェクタを利用して開発する。各高分子造形物には同じ圧電フィルムセンサを貼り付けており、咀嚼実験を実施することで取得される信号に対してクラスタリングアルゴリズムに適用することで、優れた物体認識を実現できるかを検証する。

キーワード: 高分子材料, ソフトロボット, センシング, 機械学習

【Abstract】

The human oral structure can be regarded as a group of haptic sensors with different physical properties such as teeth, gums, and tongue. When an object enters our oral cavity, we can recognize what kind of texture the object has from various data based on the sensing of the teeth and tongue. This study develops an end-effector that mimics the structure of the oral cavity using a composite of modeling materials made of polymers with different physical properties. Each polymeric object is attached with a piezoelectric sensor, and we apply a clustering algorithm to the signals obtained from chewing experiments to verify whether superior object recognition can be achieved.

Keywords: polymer materials, soft robot, sensing, machine learning

1. 序論

食品分野における研究には食べ物の食感を調査する試験として、官能評価[1]やテクスチャー評価[2]等が頻繁に採用されている。しかし官能評価では感性の個人差や評価時の環境などによる再現性の難しさが、テクスチャー評価は数値による客観的な結果を得ることが可能ではあるが、実際に口に入れた時の感覚が掴めない。また同じ食品でも用いている材料が少し異なっている場合に生じる極微妙な硬さなどを明確に測定することも可能ではない。そこで本研究では人間の口腔構造に着目し、圧電センサーを取り付けた口模型を開発した。それが人間の口の様な物体認識が実現できるかを検証、また食品に使われる異なる材料による微妙な硬さの変化を分類可能であるかも検証し、新たな測定装置として加わることを目指す。口模型を製作するにあたり、実際の人間の口腔内の模倣を行うため、歯を硬い PLA で再現し、歯肉の部分をつややかなシリコンで再現、そして舌の部分をつやかく粘度のあるゲルを用いて再現を試みた。これは歯だけでなく歯肉や舌等でも物を食べる際の食感に関わっているのではと想いついたため、複数の材料を組み合わせて作製することにした。

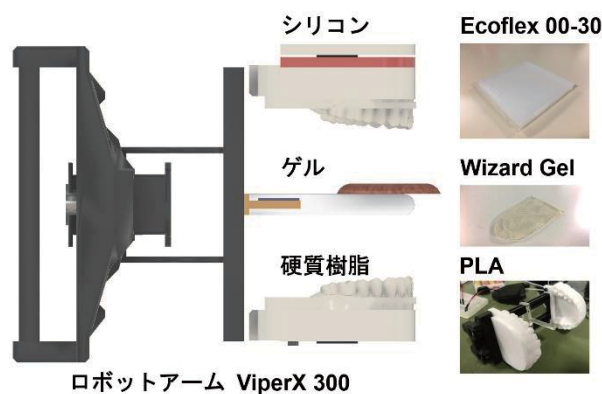


Fig. 1 異なる高分子造形物で模倣する口腔構造

2. ロボットマウスの開発

2.1 ロボットマウスに用いる材料の選定

本研究は Fig. 1 に示す 3 つの高分子材料と Trossen robotics 社が提供するロボットアーム「ViperX 300」を組み合わせたロボットマウスを開発する。まず上下歯を模倣する高分子材料として、硬質樹脂のひとつであり 3D プリント用フィラメントとしても広く普及しているポリ乳酸

樹脂(以降, PLA と称す)を採用している. 上下歯模型は, 米国保健社会福祉省の国立衛生研究所から公開されている上下顎歯モデルを用いている. 本モデルをロボットアームに取り付け可能なようカスタマイズし, 3Dプリンターにて造形する. 次に歯肉を表現する高分子材料として Smooth-On 社が提供する Ecoflex00-30 と呼ばれるシリコンを採用している. このシリコンを前述の上顎歯モデルの上面に配置することで歯肉部を模倣する. 舌の模倣にはユシロコーン業社のハイドロゲル材料である Wizard Gel [3]を採用する. Wizard Gel は自己修復性ハイドロゲルの一種で, ハイドロゲルの中でも「高靱性・高伸縮性・耐乾性」を有しているため, 長期的使用に耐えうるゲル材料である.

2.2 ロボットマウスに用いるセンシング方式

本研究のロボットマウスは弾性率が明確に異なる3つの高分子材料を採用しており, 各造形物の接触情報を抽出するために材料の造形物にピエゾフィルムセンサである TE Connectivity Measurement Specialties DT1-028K を張り付けている. ピエゾフィルムセンサとは, 圧力を加えると電圧が発生する圧電効果と呼ばれる現象を利用したセンサーであり, 小型で軽量の点, また応答が速い点等が主な特徴である. センシングの手順は, 圧電フィルムセンサが読み取った波長データをワンボードマイコンのひとつである Arudino に送信し, Arudino から取得したデータをシリアル通信経由で Python スクリプトにて PC 上で受信する. ロ模型にモノを噛ませることで歯の表面から口全体に振動し, その振動が各々の部位のピエゾフィルムによって測定される. ピエゾフィルムからは毎秒約 120 回データが送信され, 1 枚のピエゾ

フィルムから得られるデータは 3 桁の 16 進数として表示される. 実際に開発したロボットマウスの外観を Fig. 2 に示す.

3. 菓子類の触覚認知実験

3.1 触覚認知に用いるデータ

本研究は Fig. 2 のロボットマウスが市販品の「せんべい」「棒状スナック菓子」「どら焼き」「棒状チョコレート」「板状チョコレート」の計5種類の分類をどのような精度で分類できるかについて検証する. 前述の各菓子を1秒間隔で20回噛ませるように自動咀嚼プログラムを実装し, 各菓子に対して7セット, 計140回噛ませることでデータの収集を行う. 計測後のデータに対してはノイズ除去および線形傾向の除去を適用し, ピーク部分の抽出とラベリングを実施する. また, 収集したデータは訓練データとテストデータの2つに分割する. 2.2 節のセンシング方式から得られるデータ値の範囲は-2048~2047 であるため, 機械学習を適用しやすいよう正規化処理を施し, -1~+1 の範囲で表現している.

3.2 分類学習器

学習器として線形サポートベクターマシン(線形 SVM), K 近傍法, ランダムフォレストの3種を使用し精度を比較する. これらはオープンソースの Python 用機械学習ライブラリである scikit-learn に実装済みのものを使用する. 学習器のハイパーパラメータのチューニングには K 分割公差検証法とグリッドサーチを用いる.

3.2.1 線形 SVM

1960 年代から存在する分類や回帰などの問題を解く学習モデルの1種であり, 2つのクラス間に境目となる直線及び曲線(決定境界)を引くことで分類を行う. このとき, 決定境界に最も近い点をサポートベクターと呼び, この点と決定境界までの距離をマージンと呼ぶ. そして線形 SVM はこのマージンを最大化するよう学習する分類手法である.

3.2.2 K 近傍法

クラス判別用の手法の 1 種であり, 学習データをベクトル空間上にプロットしておき, 未知のデータが得られたら, そこから距離が近い順に任意の K 個を取得して多数決でデータが属するクラスを推定する分類手法である.

3.2.3 Random Forest

複数の機械学習モデルを組み合わせることで強力なモデルを構築するアンサンブル学習のバギングをベースに, 少しずつ異なる決定木, 即ち「人の判断を木の木造のように細分化して判断を進めていくモデル」をたくさん集めたものである. 決定木単体では過学習しやすいという欠点に対応する手法でもある.

3.3 分類実験

3.1 節にて述べたようにロボットハンドに噛ませることで, 5種のお菓子の分類が可能であることを検証する. Fig. 3 に交差検証でデータを5分割した際の学習データの平均正解率の評価を示す.



Fig. 2 開発したロボットマウスの外観

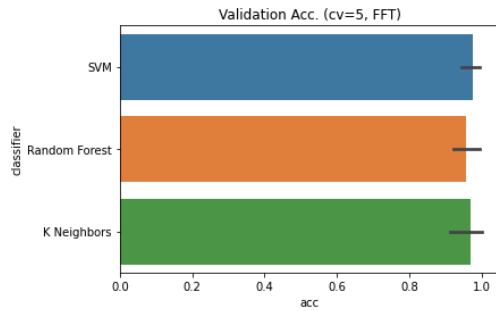


Fig. 3 菓子類の平均正解率

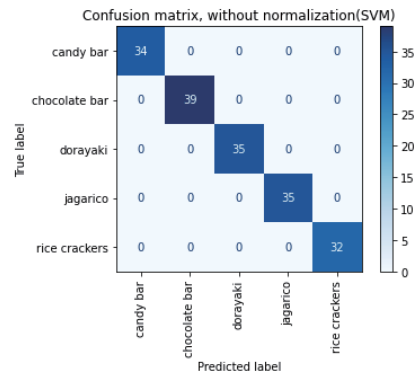
次にグリッドサーチと交差検証を併用して学習器ごとのハイパーパラメータを求めた後、総データ数697個をテスト用に25%、訓練用に残りの75%を分割して分類学習させる。その後、お菓子ごとの正解率の結果を混合行列にまとめ、ヒートマップに可視化したものを Fig.4 に示す。これは縦軸が正解のラベルであり、横軸が学習から導き出された予測のラベルである。各々のセル値は分類されたテストデータの総計である。最後に前述にて求めた混合行列を用いて、機械学習の評価指標にあたる正解率 (Accuracy), 適合率 (Precision), 再現率 (Recall), F 値 (F-measure) を学習器ごとにまとめて Tabel.1 に示す。

3.4 材料ごとの分類精度の比較実験

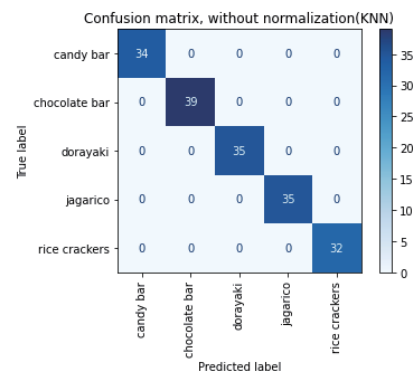
上歯 (PLA), 下歯 (シリコン), 舌 (ゲル) の 3 つから取得される波形を組み合わせで分類学習を行った。この時に得られる波形は同じ物体でも部位ごとに異なり、得られるピーク値も異なる。前述したように本研究では複数の高分子材料を用い、異なる信号の波形の総合から物体認識が可能であるかを明らかにすることを目的としている。そこで3つの信号を用いた場合と1つの単体だけを用いた場合の平均正解率及び標準偏差を比較するため、Table.2 にこれらをまとめて示す。加えて、同じ物体を噛ませた時の PLA, シリコンおよびゲルから得られる波形も各々 Fig. 5 に示す。

4. 考察

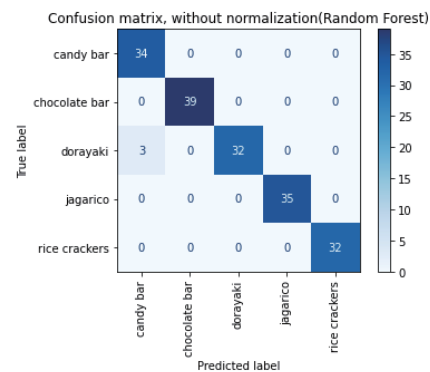
Table.1 や Fig. 3 の結果から、すべての学習器にて 95% 以上の正解率を得られることがわかる。これは高速フーリエ変換 (FFT) などでノイズ除去を入念に行ったことや交差検証を用いてモデルの精度を向上させたことが起因していると推測できる。したがって、本ロボットマウスの各材料により特徴化された各菓子の触感機械学習のアルゴリズムを隔てることで高精度に認識できることを示唆している。同様に Table.2 や Fig.4 を見ると、正解率、適合率、再現率、F 値共に Random Forest 以外 100% を出しており、Random Forest も 99% と非常に高い値を出している。こちらもグリッドサーチと交差検証を併用したやり方でハイパーパラメータチューニングを行ったことで分類精度を向上させることが可能であることも明らかになっている。次に比較実験については、シリコンの K 近傍時の正解率が 0.2% 程度、3 種を組み



(a) 線形サポートベクターマシンによる分類精度



(b) K 近傍法による分類精度



(c) ランダムフォレスト法による分類精度

Fig. 4 各分類手法における菓子類の分類精度

合わせたときよりも高い結果となっている。これはシリコン単体と K 近傍法が今回準備した菓子類の分類には適していることを示唆している。しかし、3 種類の高分子材料から抽出できるデータの場合、どのアルゴリズムに対しても高精度な分類精度を示しており、全体の偏差も微小なことから、複数の材料を用いることで機械学習に対する汎用性を高めることができると判断できる。個別に見ると PLA やシリコンは実際に噛ませた歯から振動が直接に伝わっているため Fig.5 より波形が綺麗に取得できており、正解率も高い。しかしゲル舌は物体を乗せているだけであり、PLA やシリコンほど振動がうまく測れず、また Fig.5 からノイズも多いこともわかる。このことから、舌も噛む際に押し付ける動作等や更なるノイズ除去があれば今よりも高い正解率を出せ、結果的に全体の正解率の向上に繋がるのではないかと推測できる。

Table.1 各分類手法における菓子類の分類精度

	Accuracy [%]	Precision [%]	Recall [%]	F 値 [%]
SVM	100	100	100	100
RF	99.4	99.4	99.4	99.4
KNN	100	100	100	100

Tabel.2 各材料における平均正解率と標準偏差

		SVM	K Neighbors	Random Forest
PLA (上歯)	正解率	88.8	90.3	91.6
	偏差	0.060	0.052	0.039
シリ コーン (下歯)	正解率	94.4	97.1	93.5
	偏差	0.025	0.037	0.061
ゲル (舌)	正解率	74.2	72.8	72.1
	偏差	0.039	0.051	0.041
3種	正解率	97.4	96.9	95.7
	偏差	0.031	0.056	0.042

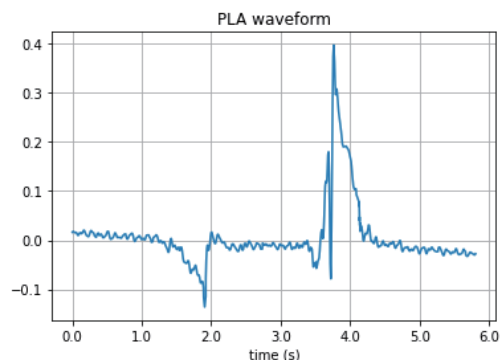
6. 締言

本研究では、人の口腔構造を模倣したエンドエフェクタを作成し、実際にモノを噛ませたときに生じる振動をピエゾフィルムセンサで波形として取得、その波形を3つの学習器を用いて分類ができるか検証した。結果として全ての学習器で95%以上の正解率が得られ、各々の学習器の評価指標でも高い水準の結果を得ることができ、比較実験でも各々の波形の特徴や正解率を得ることができた。これはノイズ除去やハイパーパラメータの最適化がこの結果に影響していると推測できる。しかし、今回は噛ませる菓子の硬さがはっきりしている点やゲル舌の設置場所及び動作などの課題が挙げられる。

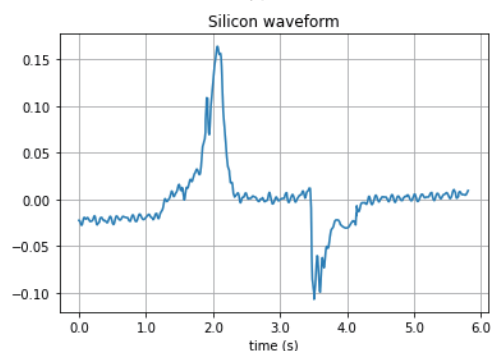
今後は硬さが近い物や形状を変化させた物を噛ませ、分類できるかどうか。また2つの食材が組み合わさった複合体の分類が明確に出来るかどうかを調査する。加えて、より人間の口腔構造に近づけるため、作成に用いる材料の検討やセンサーの改良も行う。

謝辞

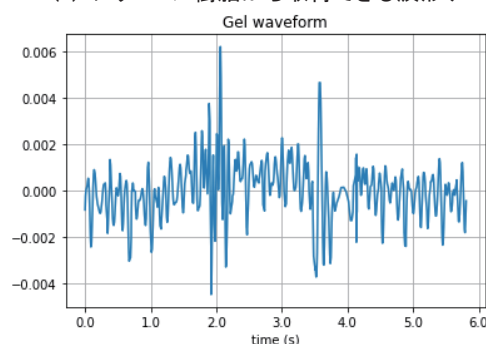
本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237), 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人:NEDO) によって支援を受けたものである。



(a) PLA から取得できる波形データ



(b) シリコーン樹脂から取得できる波形データ



(c) ハイドロゲルから取得できる波形データ

Fig.5 各材料から取得できるセンサー波形の差異

参考文献

- 戸田 準 “日本食品工業学会誌にみる官能検査の型と手法”, Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi (Vol.25, No.3, 1994), 21 July 1993(p218-223)
- 山野 善正 “食品のテクスチャーの評価”, Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi (Vol.44, No.2, 1997), September 1996(p83-92)
- Hiroyasu Yamaguchi, Ryosuke Kobayashi, Yoshinori Takashima, Akihito Hashidzume, Akira Harada “Self-Assembly of Gels through Molecular Recognition of Cyclodextrins: Shape Selectivity for Linear and Cyclic Guest Molecules”, Macromolecules, 25 March 2011(p2395-2399)

3D スキャンを可能とするゲルの表面修飾法の検証

Validation of surface modification methods for gels to enable 3D scanning

鈴木 康海¹, 川上 勝², 渡邊 洋輔², 小川 純², エムディナヒン イスラム ジブリ²,
アジット コースラ², 古川 英光²

Koumi SUZUKI¹, Masaru KAWAKAMI², Yosuke WATANABE², Jun OGAWA², MD Nahin Islam SHIBLEE²,
Ajit KHOSLA², Hidemitsu FURUKAWA²

¹ 山形大学工学部

² 山形大学大学院理工学研究科

¹ Faculty of Engineering Yamagata University

² Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

透明性の高いハイドロゲルを 3D プリンターで複雑な形状に造形できる技術は発展しているが、造形したハイドロゲルの寸法を計測するための手段は確立されていない。一般的な構造物の測定方法はノギスや金尺等の道具を直接あてがう方法や非接触の光学式 3D スキャナによる測定が用いられる。しかし、柔らかく透明度が高いハイドロゲルを対象とした場合、これらの方法をそのまま実行したとしても、その結果は測定の正確さにおいて必ずしも適しているとはいえない。そのため本研究は後者の光学式 3D スキャナでゲルの 3D 形状をデータ化する方法を検証する。ここではゲル表面の修飾法に着目し、着色剤添加およびコーティング剤塗布を行うことで 3D スキャンがどの程度可能となるのかについて定量的に評価する。

キーワード: 3D スキャナ, 精度評価, 修飾法

【Abstract】

The technology to form highly transparent hydrogels into complex shapes using 3D printers has been developed, but the means to measure the dimensions of the formed hydrogels have not been established. In general, structures are measured by directly applying tools such as calipers or metal measures, or by using a non-contact optical 3D scanner. However, these methods are not always suitable for hydrogels, which are soft and transparent, in terms of measurement accuracy. Therefore, in this study, the latter method of converting the 3D shape of the gel into data using an optical 3D scanner is verified. In this paper, we focus on the modification method of the gel surface and quantitatively evaluate how much 3D scanning is possible by adding coloring agents and coating agents.

Keywords: 3D scanner, accuracy evaluation, modifier

1. 序論

ゲルとは高分子鎖が架橋されて 3 次元構造の網目を造り、それが水などの溶媒を含んだ物質である。そのため、柔らかく湿っている材料であり、柔軟性や高含水率、高い透明性、生体適合性、低摩擦などの特性を備えている。その特性を活かして、医療やロボット工学といった多岐にわたる分野での利用が期待されていたが、注型による成型が一般的で、複雑な構造物の造形が難しかった。近年、複雑な形状を造形可能な 3D ゲルプリンターが開発されており、医療分野では人工血管、眼内レンズ、臓器モデルのような医療器具の作製にゲルが使用され始めている[1]。

一方で、造形したゲルの寸法を定量的に評価するための方法が確立されていない、という問題がある。例えば、ノギスや金尺等の道具を直接あてがう方法は柔らかく変形しやすいハイドロゲルに適用することが困難である。

そのため本研究では、非接触で 3D 形状を計測でき

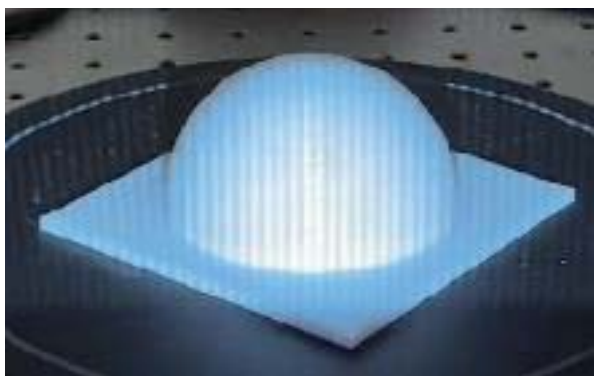
る光学式 3D スキャナに注目した。光学式 3D スキャナの場合、ガラスやハイドロゲルのような透明な物体は反射光が少ないことでパターン投影がうまくいかず計測が難しい[2]。そこで、3D スキャンによる形状計測が可能になるような、ゲルの表面修飾方法について検討を行った。

2. 使用機器

本研究において光学式 3D スキャナは図 1 に示す SHINING 3D 社の Ein Scan-SE を使用する。Ein Scan-SE は白色光 LED を光源としているデスクトップ 3D スキャナである。プロジェクターが縦縞模様のパターンを投影し、そのパターンをカメラが読み取り解析して対象物との距離を測定することが可能である[3]。しかし、スキャン対象物が金属、半透明、金属光沢、黒色の素材、溝の隙間が非常に狭いまたは深いなどといった場合、距離の測定ができないことがある。そのため、光透過性の高いゲルをスキャンするためには表面を修飾する必要がある。スキャン対象物の大きさはターンテー



(a) 光学式 3D スキャナ「Ein Scan-SE」



(b) ゲルスキャン時の様子

図 1. 3D スキャン装置の外観と実行中の様子

ブルに乗せられる程度に限定されており、最小スキャンサイズは 30mm×30mm×30mm、最大スキャンサイズは 200mm×200mm×200mm となっている。

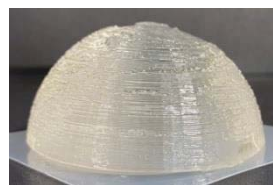
3. ゲルの作製および表面修飾法

3.1 ゲルの作製

本稿では型造形が可能な N,N-Dimethylacrylamide (DMAAm)ゲルを検証に用いた。DMAAm ゲルの溶液はモノマーとして DMAAm、架橋剤として N,N'-Methylenebisacrylamide (MBAA)、開始剤としてペルオキソ二硫酸アンモニウム(過硫酸アンモニウム)(APS)を混合させ、溶媒として精製水を混合することで作製した。ゲルを作製する際には、促進剤として N, N, N', N'-テトラメチルエチレンジアミン(TEMED)を加え、重合を開始させた。ゲルの形状はスキャンの方向依存性を軽減するために半径 35mm の半球を選択して、シリコンの半球型にゲル溶液を入れて硬化させることで造形した。実際に作製したゲルを図 2(a)に示す。

3.2 着色剤添加による表面修飾法

ゲルのスキャン精度と色による相関を検証するために、図 2(b)に示す着色剤を添加したゲルを検証に用いた。本稿では着色剤に「ピカエース(ディープレッド)」という顔料を用いた。顔料は直接ゲル溶液に溶かすことができないため、非イオン界面活性剤のノイゲンに溶解し、ゲル溶液と混合させた。含有量として、ノイゲン1wt%、顔料 0.2wt%とした。



(a)半球型の DMAAm ゲル



(b)着色剤を添加



(c) コーティング剤を塗布

図 2. 表面修飾法を施したゲル造形物の外観

3.3 コーティング剤

本研究ではゲルの表面修飾法の 1 つとして、コーティング剤を検討する。実際にコーティング剤を塗布したゲルを図 2(c)に示す。

今回、コーティング剤は 3D スキャン用昇華型スプレーである「AESUB blue」(株式会社システムクリエイト)を使用した。「AESUB blue」は一般的な現象液スプレーと異なり白色粉末を含まずにスキャン対象物をスキャン可能な状態にすることができる。また、「AESUB blue」が作り出す白色の膜は時間経過により昇華するアダマンタンという成分だけで構成されているため、スキャン後に粉末を除去する必要がない。

3.4 ゲルの評価方法

ゲルの評価方法として、理論的な半球の 3D データとスキャンで取得した 3D データを比較し、交差と差分を求める。図 3 に示すように、交差とは、2 つの物体を中心を合わせた時に重なる部分、差分は重ならない部分を指す。交差、差分それぞれを半球の体積の理論値に対する百分率で表し、一致率、差分率とした。

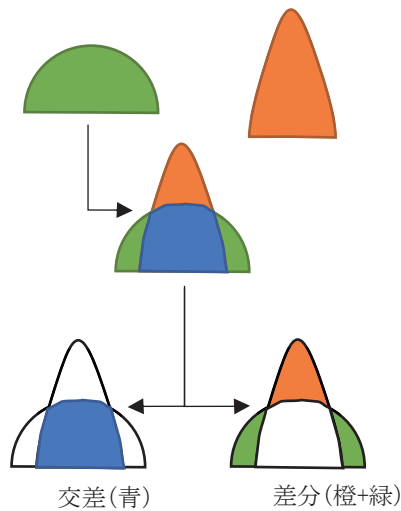


図 3. 交差と差分を求める図解

表 1. 各データの体積

	体積[mm ³]
半球の体積の理論値	89658
ゲル製半球 (コーティング剤塗布)	90833
ゲル製半球 (着色剤添加)	83612
PLA製半球	107978
ABS製半球	101754

表 2. スキャン精度評価

	交差 [mm ³]	一致率 [%]	差分 [mm ³]	差分率 [%]
ゲル製半球 (コーティング剤塗布)	86215	96.01	6962	7.753
ゲル製半球 (着色剤添加)	82265	91.76	7665	8.550
PLA製半球	89592	99.92	11426	12.37
ABS製半球	89657	99.99	17650	19.16

4. 結果と考察

4.1 スキャンの検証

各ゲルのスキャン後に得られた形状データを図 4 に示す。表面修飾を施していないゲルは図 4(a)に示すように、形状データが取得できなかった。一方、図 4(b), (c)が示すように、表面にコーティング剤を塗布したゲル及び着色剤を添加したゲルは形状データの取得に成功した。

4.2 スキャン評価

次に 3D スキャンによる有効性を定量的に評価した、評価する項目として、体積を検討した。Ein Scan-SE でスキャン後、スキャンソフト内でメッシュ穴埋めを行い、3D データをSTLデータで保存した。その後、3D プリントソフトウェア Materialise Magics (materialise 社製)を用いて、3D データの体積を取得した。今回は、3DCAD で作製した半径 35mm の理想的な半球とスキャンによって得られたゲルの形状データに加えて、ポリ乳酸(PLA)

樹脂及びアクリル・ブタジエン・スチレンの共重合合成 (ABS) 樹脂のスキャン結果を比較した。各半球の形状データから取得した体積のデータを表 1 に示す。

今回は、理論的な体積を持つデータとスキャンで取得したデータを比較し、2 つのデータの交差と差分を求め、スキャン精度を評価した。表 2 にスキャン精度評価結果を示す。

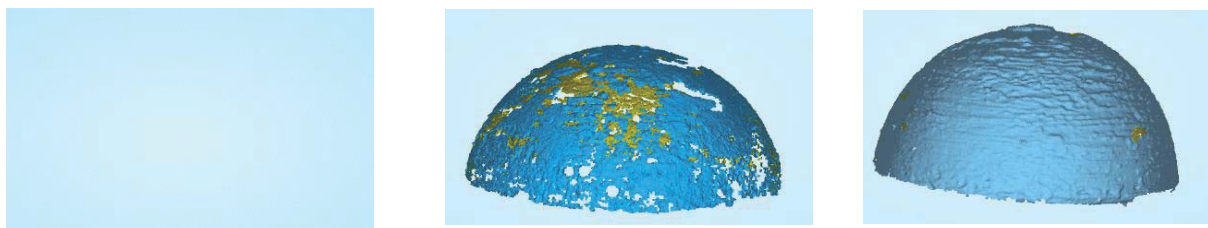


図 4. スキャン結果(未修飾, 着色剤添加, コーティング剤塗布)

表 3. 複数回の積算スキャンをした場合のスキャン精度の比較(理想的な半球のデータとの比較)

スキャン積算 回数	体積 [mm ³]	交差 [mm ³]	一致率 [%]	一回前との一致率 [%]	差分 [mm ³]	差分率 [%]
1回目	90833	86215	96.01	—	6962	7.753
2回目	90827	86165	95.96	99.94	7071	7.874
3回目	90800	86124	95.91	99.95	7126	7.936
4回目	90298	86049	95.83	99.91	6773	7.543
5回目	90146	86005	95.78	99.95	6706	7.468
6回目	90146	85998	95.77	99.99	6718	7.481

図 4 に示すように、着色剤を添加したゲルは 1 回のスキャンでは一部しかデータを得られなかったため、5 回程度スキャンを行い十分にスキャンが確認できるデータを使用した。表 2 より PLA と ABS では一致率が高いことがわかった。しかし、差分率が 10%以上と正確性に欠けた結果が見られた。これは、PLA と ABS 製半球をスキャンしたデータが大きめにスキャン結果として取得されたため、差分率が高く算出されたのではないかと推測される。また、一致率や差分率においてコーティング剤や着色剤といった修飾法を施したゲルとの比較では一致率が 90%以上、差分率が 10%未満と高い精度が見られた。この時、コーティング剤を塗布した場合に一致率が高く差分率が低いのは、着色剤よりコーティング剤のほうが表面の形状がより明確に表れるためだといえる。そのため、コーティング剤を用いた修飾法のほうが有効的であるとわかった。

次に同じ対象物をスキャンする回数によって精度が変化するか検証した。コーティング剤塗布したゲルを 1~6 回のスキャンを行い、各スキャン回数におけるスキャン精度を求めた。その結果を表 3 に示す。スキャン回数において、6 回までスキャンしたデータを取得したが交差率や差分率はすぐに収束し、各データにおいてスキャン結果や体積などにおいて大きな差異が見られなかった。そのため、はっきりスキャンできる対象物に対して複数回の積算スキャンする必要はなく、2 回程度のスキャンで十分な精度を示すことがわかった。しかし、1 回のスキャンで一部しかスキャンできない対象物である場合、復元が可能になるまで複数回の積算スキャンを行う必要がある。

5. 結論

図 4 の結果よりコーティング剤と着色剤による修飾法の有効性が確認された。また、表 2 より理想的な半球のデータとの交差の一致率が高く、差分率が低いコーティング剤を用いた修飾法のほうが有効的であると分かった。これは、着色剤よりコーティング剤のほうが表面の形状がより明確に表れるためであると考えられる。

精度評価においては、コーティング剤や顔料といった修飾法を施したゲルとの比較では一致率が 90%以上、差分率が 10%未満と高い精度を示したが、PLA と ABS のスキャンデータとの比較では一致率は 90%以上であるが、差分率が 10%以上であるため、より高い精度を示す手段を検討する必要がある。また、体積のみの評価でなく、評価の精度を高めるために寸法などの他の項目についての評価を検討する。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, ムーンショット農林水産研究開発事業(MS508, JPJ009237), 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第 2 期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人:NEDO)によって支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 岡田耕治, 牧野 真人, KabirMd. Hasnat, 宮 瑾, 古川 英光, “3D ゲル プリンター SWIM-ER の開発とゲル人工血管の研究”, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集, No. 14-1, J0440301 (2014).
- [2] Behzad Valinasab, Maxym Rukosuyev, Jason Lee, Junghyuk Ko, Martin B.G Jun “Improvement of Optical 3D Scanner Performance Using Atomization-Based Spray Coating”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers/Volume 24 Issue 1/p.23-30 (2015)
- [3] 佐藤甲癸, 5-4 3D スキャナ(3D 入力装置), 画像電子学会誌/ 44 巻 2 号(2015) p. 282-284

3DPrint 造形物と繊維構造体によるコンポジット複合材

Composite material with 3D Print model and fiber structure

沼田みゆき¹, 増田恒夫², 児嶋大世¹, 山中克浩¹, 宮本正教¹, 青木まゆみ², 田中浩也²

Miyuki NUMATA¹, Tsuneo MASUDA², Taisei KOJIMA¹, Katsuhiro YAMANAKA¹,

Masanori MIYAMOTO¹, Mayumi AOKI², Hiroya TANAKA²

¹ 帝人株式会社, ² 慶應義塾大学

¹Teijin Co. Ltd., ²Keio University

【要約】

本研究は、MEX(材料押出)方式のエス. ラボ株式会社製3D プリントを用いて出力した、2種類のポリエステルエラストマー樹脂からなるラティス構造を持つ3DP 造形物と、3DP 造形物に繊維構造体を付加したコンポジット複合材の特性評価に関するものである。繊維構造体を付加することにより、ヤング率を低下させる効果があり、柔らかさを付与できることが示された。樹脂種、ラティス構造、さらには繊維構造体を組み合わせて設計を行うことにより、3DP造形物だけでは得られないやわらかさや、吸水・速乾等の機能性をも付与することが可能となる。

キーワード: 3D, ラティス構造, Ashby Map, 繊維構造体, 機能付与

【Abstract】

This study is related to the characteristic evaluation of a 3DP model having a lattice structure composed of two types of polyester elastomer resins and a composite material in which a fiber structure is added to the 3DP model. The lattice structure is made by MEX (material extrusion) method, which was manufactured by Slab Co., Ltd. It was shown that the addition of the fiber structure has the effect of lowering Young's modulus and imparts softness. By designing by combining the resin type, the lattice structure, and the fiber structure, it is possible to impart softness that cannot be obtained only by the 3DP model and functionality such as water absorption and quick drying.

1. 序論

従来、一般産業向けに使用されている素材を用いて、Architected Material と呼ばれる、3次元幾何学構造を作製すると、材料固有の機能を超えた新しい機能を実現可能性がある。機能例としては例えば、吸音、遮音、衝撃吸収^[1]、衝撃緩和などが注目されている。

2020 年に開催された 4DFF2020 で岡崎太祐氏による「AshbyMap を用いた 3D Print (3DP) 可能な architected structures の特性把握」では FDM/SLA 方式の 3D プリントと複数のマテリアルを用いたラティス構造の出力及び材料機械特性の比較図の作成に関する研究結果が発表された。

本研究はそれに続き、機能として「やわらかさ」という観点から、MEX(材料押出)方式のエス. ラボ株式会社製 3D プリントを用いて、2種類のポリエステルエラストマーの樹脂ペレットからラティス構造を出力、①3DP 造形物のみ、②繊維構造体を付加した 3DP 造形物(以後、コンポジット複合材と記載)のそれぞれについて、ヤング率評価を行い、密度とヤング率の 2 軸からなる Ashby Map へのマッピングを行った。

2. 実験内容

2.1 樹脂材料

① 帝人株式会社製ヌーベラン TRB-EL2 (以下、TRB-EL2 と記載)と、② TRB-EL2 と「ジュラネックス®

PBT 500FP EF202X」との混合品(以下、TRB-EL2 改と記載)の 2 種類のポリエステルエラストマーを用いた。

2.2 繊維構造体

ポリエステル繊維を含むダブルニット編物を用いた。

2.3 装置、構造体の作製

2.3.1 ラティス構造

造形する幾何構造は、先行研究で熱溶解積層方式(材料押出法)の造形可能性が確認されている 4 パターンの幾何学構造^[2]を基本に、新たに単純立方格子と面心立方格子に基づく構造を加え、それぞれについて全体を囲むフレーム・梁の有無を整理し、結果として Fig.1 に示す 6 パターンの幾何学構造を基本モデルとすることにした。幾何構造は主に単純立方格子、体心立方格子、面心立方格子を基に作成した。

試験片のモデルサイズは 30 mm × 30 mm × 30 mm を基本にした。本研究では Fig.2 に示すように、内部を分割する基本単位の繰り返し回数(Lattice period、以下 sq と記載)を 5 種類(4, 6, 8, 10, 12 の偶数)、柱の太さ(thickness、以下 t と記載)を 4 種類(1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm)をそれぞれ独立に変化させた形状を用いることとした。

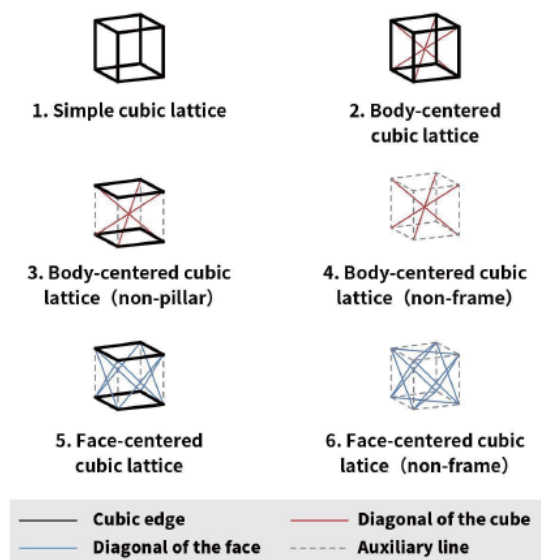


Fig1. 6 パターンの幾何学構造

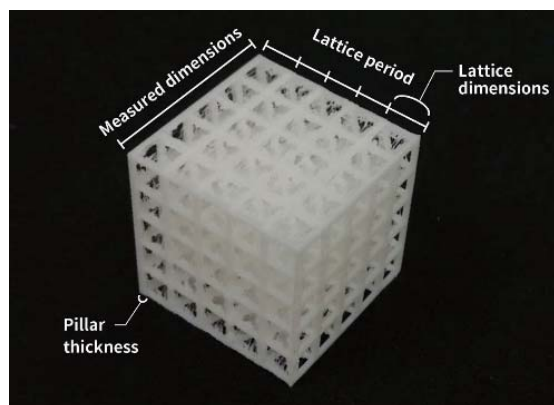


Fig.2 ラティス構造

2.3.2 3Dプリンタ装置

樹脂ペレットを造形材料とする MEX(材料押出)方式のエス. ラボ株式会社製3D プリンタ、品番GEM550Dを用いて、ラティス構造を持つ3DP 造形物を作製した。本装置はフィラメント化が困難な樹脂でも3D 造形できる可能性があり、本研究で使用する材料との相性が良いため、採用した。ラティス構造を作製するため、ノズル径が直径 0.5 mm、1.0 mm のノズルを用いることとし、温度条件の最適化を行った。

また、コンポジット複合材を作製する際には、繊維構造体の上にラティス構造を持つ3DP 造形物を造形し、複合材を得た。

3. 評価方法

ヤング率評価には、押し込み型硬さ試験機 YAWASA MSES5012-1-SL(テック技販社)を用いた。

標本は定盤の上に乗せ、圧力センサーに球面上のプローブ(φ 30 mm)を取付けた状態から、0.5 mm/s の

一定の速度で、標本の中央部に対して 5 N の荷重に達するまで荷重をかけた。各造形サンプルに対して 5 回ずつ測定を行い、平均値を計測結果とした。測定の様子を Fig.3 に示す。

また、造形物の密度は造形物の重量を電子天秤(エー・アンド・デイ社, EW-1500I)を用いて重量を測定し、外形寸法を電子ノギス(Mitutoyo, CD-15AX)で 3 辺の計測を行った結果より体積を求め、空隙を含んだ嵩密度を算出した。

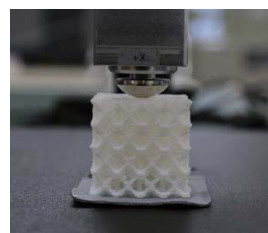


Fig.3 YAWASA 試験時の写真

4. 結果

4.1 3DP 造形物

①TRB-EL2 と、②TRB-EL2 と「ジュラネックス® PBT 500FP EF202X」との混合品である、TRB-EL2 改の 2 種類のポリエステルエラストマーについて、100%樹脂を最密充填構造でバルク材を作製し、密度とヤング率を測定した結果を Table1に示す。TRB-EL2 改は TRB-EL2 対比ヤング率が 1.2 倍高い数値を示した。

	TRB-EL2	TRB-EL2 改
密度 (g/cm ³)	1.02	1.00
ヤング率 (kPa)	4,341	5,276

Table1. バルク材の密度とヤング率

TRB-EL2は、繰り返し回数(Lattice period)を5種類(4, 6, 8, 10, 12 の偶数), 柱の太さ(thickness)を4種類(1.0mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm)変えたサンプル 45 条件、TRB-EL2 改については、TRB-EL2 対比ヤング率が 1.2 倍高いため、やわらかさを出すためにヤング率を低くコントロールすることを目的とし、多くの格子内に空隙を保有する、内部を分割する基本単位の繰り返し回数(Lattice period)が 4, 6, 8 であり、柱の太さ(thickness)は 1.0mm, 1.5 mm の 2 種類変えたサンプル 22 条件のラティス構造を選択、3D プリンタで出力した3DP 造形物を作製した。

次に、TRB-EL2 と TRB-EL2 改の3DP 造形物について、密度とヤング率の 2 軸からなる Ashby Map へのマッピングを行った。結果を Fig.4 に示す。

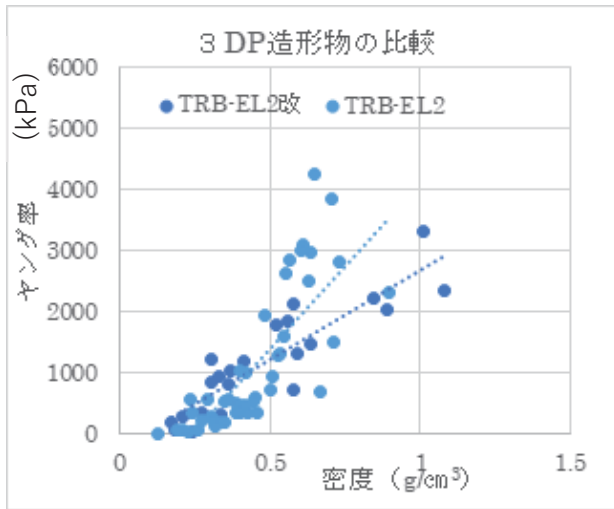


Fig.4 樹脂種による3DP 造形物の比較

TRB-EL2 では、 0.65 g/cm^3 程度の密度で、ラティス構造を変えることにより、ヤング率 $692 \sim 4,264 \text{ kPa}$ の範囲で変化させることができることを確認した。ヤング率 692 kPa と 4265.5 kPa の3DP 造形物を Fig.5 に示す。



Fig.5 TRB-EL2 で作製した3DP 造形物

TRB-EL2 改では、 0.6 g/cm^3 と同じ密度で、ラティス構造を変えることにより、ヤング率 $728 \sim 2,113 \text{ kPa}$ の範囲で変化させることができることを確認した。ヤング率 728 kPa と $2,113 \text{ kPa}$ の3DP 造形物を Fig.6 に示す。

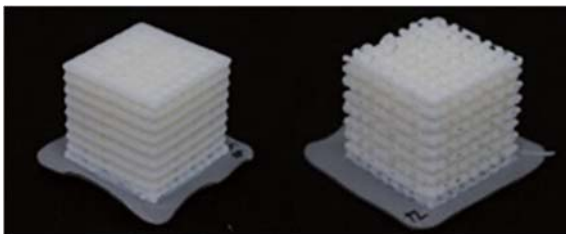


Fig.6 TRB-EL2 改で作製した3DP 造形物

上記結果から、同じ密度においても、3DP 造形物のラティス構造を変えることにより、ヤング率のコントロール範囲を広げられる可能性があることが示唆された。

4.2 コンポジット複合材

次に、TRB-EL2 と TRB-EL2 改の3DP 造形物と繊維構造体を付加したコンポジット複合材について、密度とヤング率の2軸からなる Ashby Map へのマッピングを行った。結果を Fig.7、Fig.8 に示す。また、Fig.9 でコンポジット複合材の樹脂種による比較を行った。

TRB-EL2、TRB-EL2 改ともに、3DP 造形物のヤング率が高くなるにつれて、コンポジット複合材とのヤング率の差異が顕著に現れることを確認。3DP造形物は繊維構造体を付加することにより、ヤング率を低下させる効果があり、柔らかさを付与できることが示された。一方で、元々やわらかい、ヤング率が低い3D 造形物では顕著な差は見られなかった。

また、上記述べた事象は、本研究で使用したポリエステルエラストマーにおいては、樹脂種によらないと推察されるが、樹脂種に加えて、ラティス構造や付加する繊維構造体にもよるところがあることは留意が必要である。

なお、TRB-EL2 改のコンポジット複合材を用いると、TRB-EL2 のコンポジット複合材と同じヤング率を、より低密度で達成できる可能性がある。例えばおよそ 2000 kPa のヤング率を TRB-EL2 改では密度 1.08 g/cm^3 であるのに対し、TRB-EL2 では密度 0.63 g/cm^3 で達成できた。Fig.10 に一例として、上記コンポジット複合材を示す。

5. 結論

樹脂種、ラティス構造、さらには繊維構造体を組み合わせて設計を行うことにより、やわらかさの指標であるヤング率を変えるのみならず、軽量化の設計指針も見いだせる可能性があると考ええる。

また、目的とするアプリケーションに合わせたコンポジット複合材の提案が可能となり、繊維構造体を付加することにより、3DP造形物だけでは得られない肌触りの良さや、繊維構造体の機能、例えば吸水・速乾等の機能性をも付与することが可能となる。本複合材は、例えば身体に密着するような箇所への使用、ヘルスケア用途などへの展開が期待される。

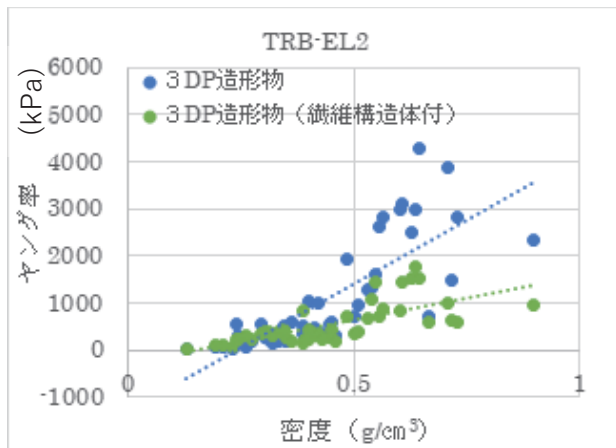


Fig.7 TRB-EL2 を用いた3DP 造形物とコンポジット複合材

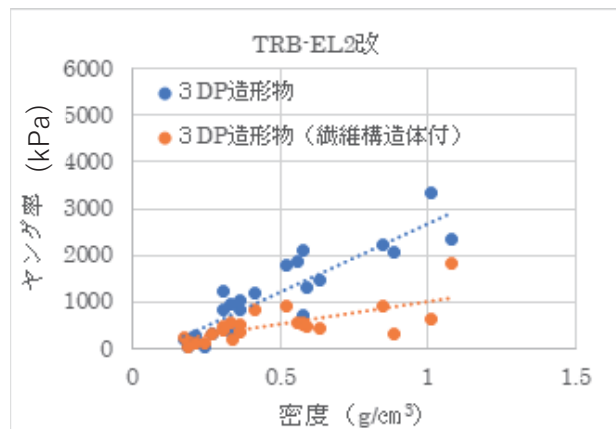


Fig.8 TRB-EL2 改を用いた3DP 造形物とコンポジット複合材

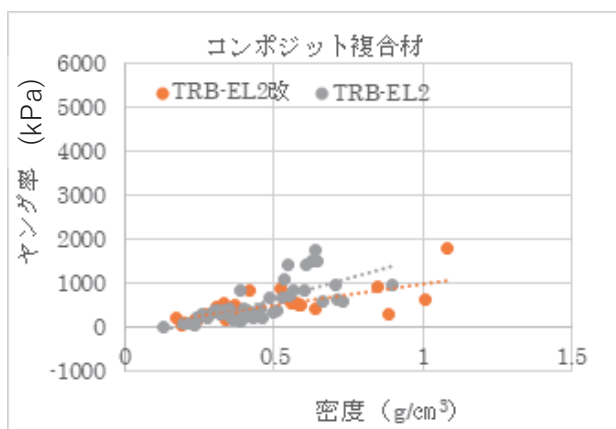
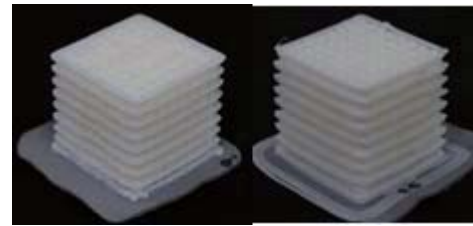


Fig.9 コンポジット複合材



m3_t25_sq08 m2_t15_sq08

Fig.10 コンポジット複合材

参考文献

- [1] CARBON, "Riddell Partners with Carbon® to Produce First-Ever 3D Printed Football Helmet Liner.", <https://www.carbon3d.com/news/press-releases/riddell-carbon-produce-football-helmet/>, (accessed 2021-07-19).
- [2] T. Sakurai, T. Tokiwa, Y. Asano, and H. Tanaka, "A Proposal for a "Softness Metric" that Corresponds 3D Printable Structures to Existing Objects," Proceedings of the Conference on 4D and Functional Fabrication 2019 (Imaging Conference Japan 2019), [in Japanese].

バイメタルを使用した熱誘起相転移を示す格子構造の創製

Creation of Thermally induced phase transition lattice structure using bimetal

永山 隼¹, 鐘ヶ江 壮介¹, 奥川 将行¹, 小泉 雄一郎¹

Hayato NAGAYAMA¹, Sosuke KANEGAE¹, Masayuki OKUGAWA¹, Yuichiro KOIZUMI¹

¹大阪大学 大学院工学研究科

¹Graduate school of engineering, Osaka University

【Extended Abstract】

1. Thermally Induced Phase Transforming Cellular Material (PXCM)

Phase Transforming Cellular Material (PXCM) は、一定以上の圧縮荷重が加わると曲り梁の部分が飛び移り座屈現象を発生させて大きく変位し、別の形状へ遷移する[1, 2]。また、圧縮後に除荷しても変形後の形状を維持し、かつ逆向きの変形で元の形状を回復する双安定性 (bistability) を示す。しかし、現状の PXCM は変形後に引張方向の応力を加えなければ、元の形状へと回復しない。一方、熱膨張率の異なる 2 種類の金属を貼り合わせたバイメタルは、温度変化によって熱ひずみによる内部応力を発生し湾曲するという性質を持つ[3]。PXCM の一部にバイメタルを組み込めば、圧縮・引張荷重を加えたときに変形するだけでなく、加熱・冷却によっても形状が変化することが期待される。本研究では、PXCM の曲がり梁にバイメタルを使用することで、圧縮変形後に温度変化によって形状を回復させ疑似的な形状記憶特性を発現する Thermally Induced PXCM (TIPXCM) を新たに作製した(図 1)。TIPXCM は H 型梁、I 型梁、バイメタルの 3 つの要素で構成される。バイメタルは、たわんだ状態で H 型梁のノッチによって単純支持され、さらに I 型梁の一端のスリット部分にねじ止めされる。本研究では、その TIPXCM の温度変化にともなう変形を高速度カメラと画像解析ソフトを用いて測定し温度とひずみの関係を評価した。

2. 結果と結論

はじめに TIPXCM の 1/2 単位格子の加熱・冷却実験にて、温度とひずみの関係を求めた(図 2)。1/2 単位格子は、バイメタルのスナップにより、-135℃で急速収縮、167℃で急速膨張し、一般的な材料とは異なるメタマテリアルの特性を発現した。また、1/2 単位格子を多数繋げて TIPXCM として加熱すると、スナップスルーが段階的に発生した。最初のスナップスルーをトリガーとして連鎖反動的に他の箇所が変形し、最終的に TIPXCM は 20%以上のひずみを回復させた。これは Ti-Ni 形状記憶合金のひずみ回復量 7~8%の 2 倍以上と大きく、TIPXCM 特有の特性である。

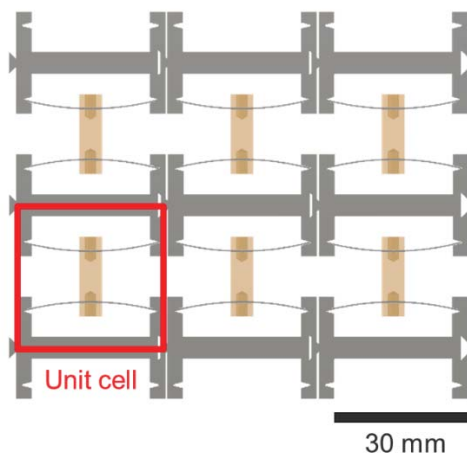


図 1. TIPXCM 模式図.

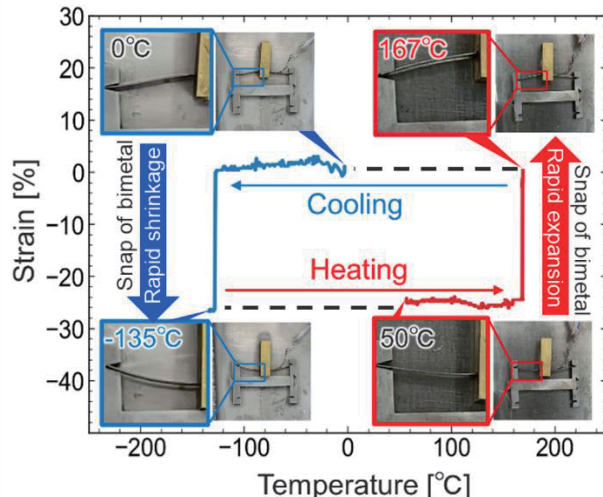


図 2. TIPXCM を加熱冷却した時の温度-ひずみ曲線.

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”, The Journal of 4D and Functional, **1**, pp.1-8 (2020).
- [2] D. Restrepo, N. D. Mankame, P. D. Zavattieri, “Phase transforming cellular materials”, Extreme Mechanics Letters, **4**, pp.52-60 (2015).
- [3] S. Timoshenko, “Analysis of Bi-Metal Thermostats”, Journal of the Optical Society of America, **11**, pp.233-255 (1925).

菌糸と生分解性プラスチックを複合した多孔質構造体の可能性

Potential of Porous Structures Composed of Mycelium and Biodegradable Plastics

知念司泰¹, 鳥居巧¹, 名倉泰生², 田中浩也¹

Moriyasu CHINEN¹, Takumi TORII¹, Yasuo NAGURA², Hiroya TANAKA¹

¹慶應義塾大学環境情報学部, ²慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

¹Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

² Graduate school of Media and Governance, Keio University

【要約】

近年サステナブルな素材として菌糸材が様々な分野で注目されている。菌糸材を利用したプロダクトにはたとえば梱包用緩衝材があり、型枠での成型でつくられている。一方、菌糸材は耐火断熱性に優れ、建築用断熱パネルや緩衝材としての利用も期待されている。ただし、建築への利用においてはプロダクトに見られる成形方法は規模の問題から好まれず、有効な成型方法が見いだせないまま課題とされてきた。本研究では先行事例を分析し菌糸材を利用した建築の成形方法が抱える課題を、乾燥工程の不自由さと形状の制限にあると整理した。これらの課題を踏まえ、生分解性プラスチックを用い、単なる型枠ではなく、菌糸材の成長とともに構造を実現する多孔質構造体を3Dプリンタによって製作し、それがもたらす乾燥工程の効率化と自由な形状の成形の可能性を探索した。これをもとに考案した災害用仮設建築へのデザイン例を示し、今後の社会実装を展望する。

キーワード: 3D プリンティング, 生分解性プラスチック, 菌糸材, マテリアル

【Abstract】

In recent years, mycelium has been attracting attention as a sustainable material in various fields. For example, cushioning materials for packaging are made from mycelium by molding. On the other hand, mycelial materials have excellent fireproof and heat-insulating properties, and are expected to be used as heat-insulating panels and cushioning materials for construction. However, the molding method used in products is not preferred for architectural applications because of the scale problem, and an effective molding method has not been found. In this study, we analyzed the previous cases and identified the problems of the molding method for architecture using mycelium as the inconvenience of the drying process and the limitation of the shape. Based on these issues, we designed a porous structure using biodegradable plastic, which is not just a formwork, but a structure that grows with the growth of mycelium, using a 3D printer. This paper presents an example of a design for a temporary building for disaster relief, which was devised based on the results of this research, and looks forward to future social implementation.

Keywords: 3D printing, biodegradable plastic, mycelium, material

1. 序論

近年サステナブルな素材として菌糸材が様々な分野で注目されている。菌糸はキノコの体を構成する糸状のものである。甲殻類の殻を構成する硬質なキチン質を細胞壁に持ち、リグニン、セルロースを含んだ木材や、藁などの非枯渇性資源を母材とし、この母材と菌糸が混合されたものを菌糸材と呼ぶ。菌糸は母材を分解しながら全体を繊維状に張り巡らすように成長することで材全体を固定化する。

固定化された後、全体を乾燥させ菌の活動を止めると耐火性[1]、断熱性[2]、軽量性[3]を持った素材としての活用が可能となる。また菌糸材は土壌分解される成分で構成されており、さらにキチンは長期的な土壌改良に寄与する効果が報告されているため[4]、自然に還り、かつ自然に寄与する機能が期待されている。この特性を生かして菌糸材をプロダクトに利用した例はあるものの、建築資材としての実用例は少なく、未だ試みの域を出ない[5][6]。菌糸材の建築資材としての利用のためには乾燥

工程の困難さや形状の制約といった課題の技術的解決が求められる。

本研究は生分解プラスチックを3Dプリントして菌糸材と共に構造を実現する多孔質構造体を製作し、自然に循環する建築資材としての可能性を探索した。

2. 菌糸材の特性確認

まず準備として、菌糸材が建材として注目される耐火性、断熱性、軽量性の基礎的な確認を行った。

2.1 耐火性の確認

赤松、菌糸材(オオヒラタケ菌糸+ブナおがくず)、発泡スチロールの3種の試験体を、火力を統一したガスバーナーの炎(1500~1700℃)に最大20秒間さらし、その状態を観察した。構造材として使われる赤松に対して多少劣るものの、断熱、緩衝材として比較される発泡スチロールに対して高い耐火性を示した。

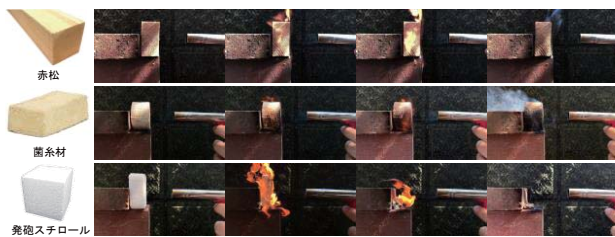


図 1. 20 秒間炎にさらした様子

2.2 断熱性の確認

コップ状の試作型枠にマンネンタケ菌糸材を詰めたもの(壁厚 8mm)を 80℃の熱湯に入れ、外壁、内壁、水面 3点の温度を測定した。外壁、内壁ともに底部から高さ 2cm の位置にマーカーを付け、非接触型温度計でマーカー部の温度測定を行った。

外壁部は実験開始後4分半で水温に到達し、その後ほぼ同じ温度変化を示した。対して内壁部は測定開始後3分間で 10℃上昇した後、その温度を保ち続けた。

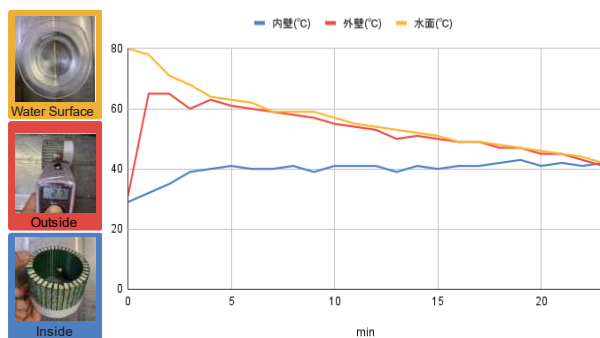


図 2. 温度推移グラフ

2.3 軽量性の確認

直径 45mm、高さ 30mm の円筒形菌糸材(マンネンタケ+ブナおがくず)の重量測定、密度算出と水に浮かせる実験を行った。重量測定の結果 10g であったため、0.21g/cc となり5倍発砲の発泡ポリスチレンや、コルク、バalsa材に近い軽量性を示した[3]。

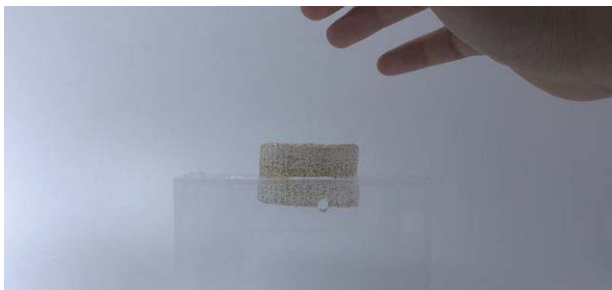


図3. 水に浮かせた様子

また比重が 0.21 であり、水に浮くことが確認できた。

3. 先行研究とその課題

菌糸材を建築資材として利用した先行研究を調査し、工法の観点から一体成形とモジュール成形に分けて分類を行った。

図 4 に見られるように一体成形では自由な形状を作りやすい反面、大型の建築を建てる工法として適していないという特徴がある。反対にモジュール成形は形状の制約を受けるが大きな建築を建てる際比較的作りやすい。

菌糸材は最終工程で全体の乾燥が必要であり、一般的には成形物を囲い内部の湿度を下げることで乾燥させている。一体成形はモジュール成形と比べて大きな囲いを用いるため大規模な乾燥設備を必要とする。また天日による乾燥を行う例もあるが、気候条件の制約を大きく受けるため主要な方法となり得ない。

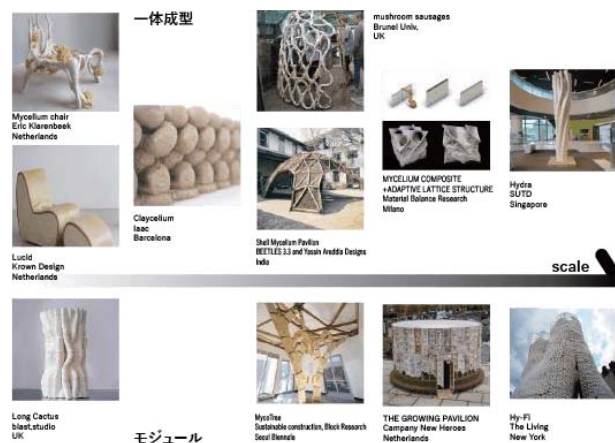


図 4. 菌糸材を建築資材として利用した例

4. 新たな乾燥方式の提案

4.1 ダクト乾燥方式

以上の議論から課題点として挙げられた乾燥に関して、本研究では新たな解決法を提案したい。菌糸材の成形物内部にあらかじめ通気口を設けておけば、熱せられた空気を流すことで成形物全体を均一に乾燥させることができる。これを我々は「ダクト乾燥方式」と名付けた。ダクト乾燥方式ではモジュール成形、一体成形に関わらず乾燥工程で必要になっていた囲いが不要であり、これにより大規模な乾燥設備を必要としない建築施工が期待される。



図 5. 乾燥方式の違い

4.2 ダクト乾燥方式の検証

ダクト乾燥方式の有効性を簡易的に検証した。ダクトを有する試作型枠にマンネンタケ菌糸材を詰めて十分に成長させたものを二つ用意した。それぞれ 40℃の空間内に置いて乾燥させる従来の方式と、40℃の空気が

流れるダクトを連結させるダクト乾燥方式の2条件で乾燥させ、その1時間当たりの重量変化をそれぞれ計測した。重量変化が見られなくなった時点で十分に乾燥されたとみなし計測を終了した。また乾燥装置はドライフルーツメーカー (A977-S2) を用いた。

検証の結果、ダクト乾燥方式は従来の方式と比べ1時間ほど多く時間を要し、乾燥速度において多少劣るものの乾燥方式として機能することを確認した。

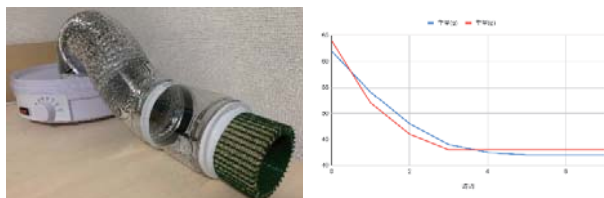


図 6. 検証の様子

5. モジュール

本研究では以上の議論を踏まえ、多孔質構造体の設計を行った。3D プリントした多孔質構造体に菌糸材を詰め込むことで、建築資材として利用できるモジュールを製作する。従来のモジュールは基本的にレンガ状の直方体に押し固められており、形状の制約が課題となっていた。さらにモジュールの内部と外部とで菌糸材の乾燥具合の個体差が生じる可能性がある。大量生産を前提にしているモジュールにおいて個体差が出てしまう設計は好ましくない。このような課題から多孔質構造体の設計要件は以下通りである。

- ・サポート材を必要としないこと
- ・形状の自由度を向上させること
- ・ダクト乾燥方式で用いる通気口を用意すること
- ・菌糸材が多孔質構造体から外れず一体化すること

この4点を踏まえて多孔質構造体の設計を行った。

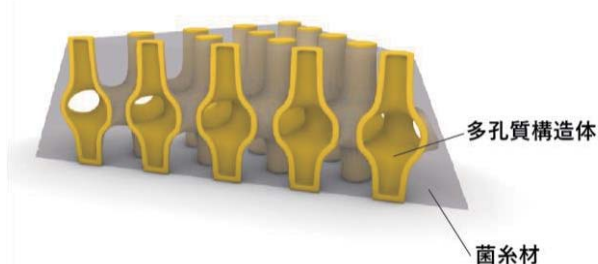


図 7. 多孔質構造体と菌糸材の分布

また与えられた任意のパネル形状に沿って上図の多孔質構造体を生成するアルゴリズムを製作した。

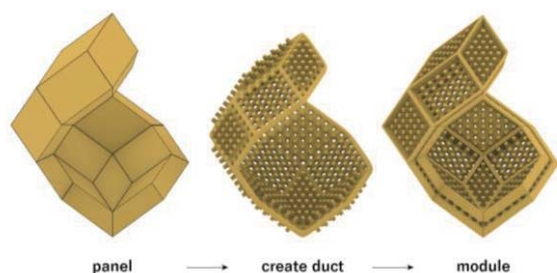


図 8. 多孔質構造体生成のフロー

これにより設計された多孔質構造体は設計要件に加え、タイリングによる構築を行うためモジュールを小さく軽量のサイズで設計しても大型の物を構築でき、建築資材の製作、施工をより簡易化する可能性がある。

また3D プリントする際の材料には高い生分解性を持つ BioPBS 材料として、三菱ケミカル社の FORZEAS™[7] を使用する。これによって、菌糸材が持つ循環性を損なわずに、本章で述べたモジュールの利点を享受することが可能となる。



図9. 多孔質構造体に菌糸を詰めて成長させた様子

6. 社会実装の提案

6.1 仮設建築

本研究では製作した多孔質構造体と菌糸材の複合材料を用いた災害用仮設建築を提案する。仮設建築は将来解体、撤去することが決まっている一時的な建築を指す。仮設建築を解体、撤去する際、多孔質構造体と菌糸材は共に土壌微生物に分解されるため、既存の仮設建築が及ぼしていた解体、撤去による環境負荷の軽減が期待される。さらに施工の工程を簡易化させることでこれまで困難だった市民の施工への参画を可能にする。

6.2 コンセプト

本研究が提案する仮設建築はダクト乾燥方式が最も効果的に機能する設計を目指す。その設計にあたり血管の血液循環システムとシロアリの蟻塚の空調システムをモチーフとして引用した。血管の血液循環システムとは心臓から単一の動脈を伝い毛細血により全身の細胞に血液を運んだ後再び単一の静脈に集まることである。またシロアリの蟻塚の空調システムとは高低差による気圧差と温度の高い空気の上昇を利用した気流を作るものである。これらのモチーフを踏まえてダクト乾燥方式に適した建築を設計する。

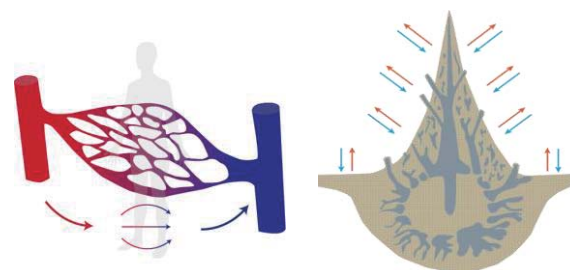


図 10. 血液の循環システム, 蟻塚の空調システム

6.3 設計

ダクト乾燥方式において無数の連続する通気口が仮設建築の床と壁部分に張り巡らすように設計した。床の中心に位置する通気口が集合する地点より熱せられた空気を流し仮設建築の細部にまで空気を行き届かせ乾燥を促す。その後天井の中心に位置する再び通気口が集合する地点から仮設建築内部に空気を排出する。排出された空気は仮設建築内部の乾燥も促進する役割を果たす。竣工後、通気口はセントラルヒーティングのような冷暖房設備として建物の温度調節を担う。

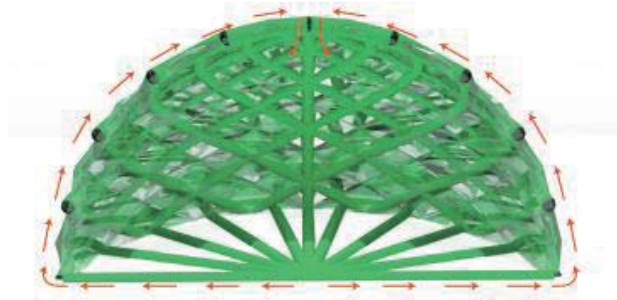


図11. ダクト乾燥方式を生かした仮設建築の壁構造

6.4 循環システム

本研究が設計した仮設建築は独自の循環システムを構築する。災害発生後、被災地に3Dプリンタと菌糸材が届けられ、そこから図12のようなステップで建築部材の製作と組み立てプロセスが行われ、実際に建築が使用されたあとは、仮設建築が土壌微生物により分解される。これまでの仮設建築は予め組み立てられた状態で被災地に届けられる例が多く運搬が非効率的であり、大量のエネルギー消費が課題となっていた。一方被災地でモジュールを製作し仮設建築を建てる本研究が提案する仮設建築では運搬効率を向上させることでエネルギー消費を抑えることが期待できる。

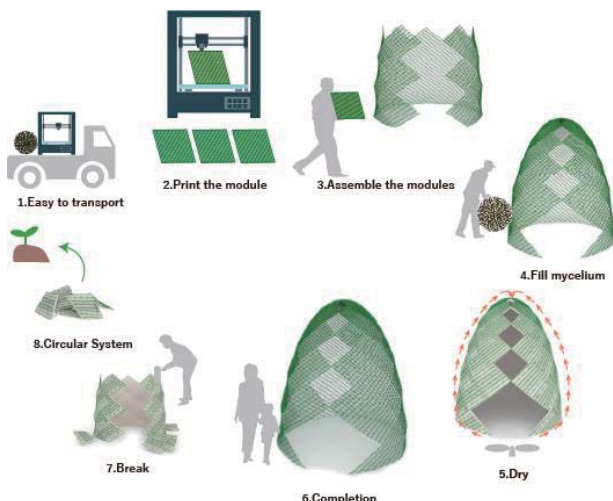


図12. 仮設建築の建設から分解までの流れ

6.5 都市への広がり

近年日本では自然災害が多発しており、効率の良い復興が求められる。仮設建築においても一時的な住空間

間としてだけでなく、被災前よりも災害に強い都市とシステムを再構築する起点となる役割が必要である。本研究が製作した多孔質構造体によって、仮設建築の建設と都市の復興が連続的に営まれる復興モデルの可能性を検討する。

7. 結論

本研究では菌糸材を利用した建築の成形方法が抱える課題が乾燥工程の不自由さと形状の制限にあることを突き止めた。これらの課題を踏まえ菌糸材とともに構造や質感を実現する多孔質構造体を製作し、それにより実現される乾燥工程の効率化と自由な形状の成形を基に、建築資材としての利用と仮設建築への応用を提案した。今後は多孔質構造体の乾燥効率の計測や強度試験、そして土壌分解の検証を行いつつ、具体的な都市システムのリサーチ、設計を進め復興モデルの提案を目指す。



図13. 都市イメージ

参考文献

1. Mitchell Jones¹, Tanmay Bhat, Chun H. Wang, Khalid Moinuddin and Sabu John. Thermal degradation and fire reaction properties of mycelium composites, 21st International Conference on Composite Materials At: Xi'an, China, (2017).
2. Grown, Insulation panel, <https://www.grown.bio/product/insulation-panel/> (参照 2021-09-15)
3. Asahi Kasei, <https://www.asahi-kasei.co.jp/infofoam/sunforce/feature/lightweight.html> (参照 2021-09-15)
4. Chibu Hiroko, Hidejiro Shibayama, <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030662148.pdf> (参照 2021-09-15)
5. Pascal Leboucq, Lucas De Man and Eric Klare nbeek. The Growing Pavilion, <https://thegrowingpavilion.com/about/> (参照 2021-09-15)
6. Giombattista Areddia, Asif Rahman and Mohamad Yassin. Shell Mycelium, <https://argarchitecture.com/> (参照 2021-09-15)
7. MITSUBISHI CHEMICAL. FORZEAS™. https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/sustainable/product/1209172_7166.html (参照 2021-09-15)

安全性向上に向けた高分子光開始剤の開発

Development of polymer photoinitiator to improve safety

竹田 賀美¹, 小林 大輔¹, 清貞 俊次¹

Yoshimi TAKEDA¹, Daisuke KOBAYASHI¹, Toshitsugu KIYOSADA¹

¹KJケミカルズ株式会社

¹ KJ Chemicals Corporation

【要約】

本研究では、新規な高分子光開始剤の開発を行い、低分子の光開始剤と比較して課題であった硬化性や相溶性、硬化物透明性等を改善した高分子光開始剤を見出し、安全性が高い造形物作製の可能性を検証した。その結果、弊社にて開発したノリッシュ II 型の高分子光開始剤は、低分子量水素供与体の添加無しでノリッシュ I 型の高分子光開始剤と同等の波長対応性と高い硬化性、また、他成分に対する良好な相溶性に基づく造形物透明性を有することが示された。また、光開始剤そのものが高分子量で安全性が高く、得られる造形物からの低分子量成分の溶出もごくわずかであることを確認した。

キーワード: 3D, 高分子光開始剤, 安全性, UV-LED

【Abstract】

In this study, we developed a new polymer photoinitiator, that shows improved curability, compatibility and transparency of cured product compared to that of the low molecular weight photoinitiators. Furthermore, possibility of creating a highly safe model was verified. The novel polymer photoinitiator based on Norish type II, that are developed without the addition of a low molecular weight hydrogen donor, however, it demonstrates same wavelength correspondency, high curability and transparency as that of the model based on the Norish type I polymer photoinitiator. Additionally, this photoinitiator was confirmed to have high molecular weight improving its safety, as well as reducing the elution of low molecular weight component.

Keywords: 3D, polymer photoinitiator, safety, UV-LED

1. 序論

3D プリントは様々な方式が提案されているが、光硬化を利用する光造形方式として、材料噴射方式や液槽光重合法などある。これらの光造形方式の特徴として、フルカラーや精緻な造形ができる点があるが、使用される光硬化樹脂の進化により、実用品も造形できるようになってきている。しかし、これらの光造形方式では造形時間の短縮や硬化性のコントロールを実現するため、多量の光開始剤が使用されている。

現在 3D プリントに活用されているラジカル光開始剤は、UV-LED 光への波長対応性と硬化性の高さにより、主にノリッシュ I 型の低分子光開始剤、特に開始剤効率の高さから Omnirad TPO (ジフェニル(2,4,6-トリメチルベンゾイル)ホスフィンオキシド)がよく用いられている。しかし、Omnirad TPO は、生殖毒性が知られており、安全性

が懸念されつつある。また光開始剤の使用量が多いことから、光開始剤が残留したり、光重合を行う際に開始剤分解物が副生するため、造形物から開始剤や分解物のブリードアウトや臭気の発生が問題となっている。一方でノリッシュ II 型の光開始剤は、水素引抜きによりラジカルを発生させるため、開始剤分解物が生成しにくい。またモノマーが水素供与体になる場合、重合物がマクロモノマー化や、重合物からもラジカルが発生するために、低分子量の重合物が発生しにくい利点がある。しかし開始剤効率が低めであり、開始剤そのものも残留するため、ノリッシュ I 型の開始剤との併用などで使用され、単独での使用は十分に検討されていない状態であった。

そこで本研究では、開始剤の分解物が発生しにくく、また光開始剤自体の溶出を抑制できるノリッシュ II 型の

表 1. ラジカル光開始剤の分類

開始剤タイプ	ラジカル発生	特徴	低分子光開始剤	高分子光開始剤
ノリッシュ I 型 光開始剤	分子内開裂	・開始剤効率が 高い ・重合が低分子 量化しやすい ・開始剤分解物 が生成	Omnirad TPO(アシル フォスフィン系) Omnirad 184(アセ トフェノン系) Omnirad 907(アミ ノアセトフェノン 系)	ESACURE KIP 150 (アセトフェノン 系)
ノリッシュ II 型 光開始剤	水素引抜き	・重合が高分子 量化しやすい ・水素供与体が 必要 ・開始剤分解物 が発生しにくい	ベンゾフェノン IPTX(チオキサント ン系) Omnirad MBF(オキ シフェニル酢酸エ ステル系)	Speedcure 7010 (チオキサント ン系)

高分子光開始剤として、弊社にて開発した光開始剤 (Kohshylex[®]-I)を用いて、光造形への適用を検討した。

2. 実験

2.1 材料

弊社開発品の「Kohshylex[®]-I」の他に比較として、ノリッシュ I 型の高分子光開始剤「ESACURE KIP 150」(IGM Resins 社製)、ノリッシュ II 型の高分子光開始剤「SpeedCure 7010」(Lambson Ltd HQ 製)を用いた。

光硬化樹脂は、各種モノマーと光開始剤を混合して作成し、光開始剤 5wt%とする処方A、30wt%とする処方Bを用いて評価を行った。

2.2 硬化と評価

光硬化樹脂 (処方A) は、UV-LED 光源を用いて、365nm、385nm、405nm の各波長光を照射して 5mm 厚の成形物の硬化を実施した(図1)。

また、厚み 100 μ m のフィルム状光硬化樹脂の成形物を作製し (処方B、405nm)、成形物中に含有する未硬化成分や分解副生物等の低分子量成分をアセトンにより抽出し、成形物のゲル分率と低分子量成分含有率を定量した(表 2)。

3. 結果及び考察

各光開始剤を5wt%用いた処方Aの光硬化樹脂を用いた成形物 (図1、K:365nm、J:385nm、C:405nm の UV-LED にて硬化)にて、Kohshylex[®]-I(図 1a)、ESACURE KIP 150(図 1b)を用いた場合、いずれの波長においても透明な成形物が得られた。一方で、ノリッシュ II 型の市販の高分子光開始剤である SpeedCure 7010(図 1c)

を用いた場合、365nm、385nm の UV-LED による硬化は認められず、405nm においても表面の一部が硬化するのみで、成形物の厚みも 0.5mm 以下であった。三級アミンやチオール等の低分子量水素供与体の添加無しでの単独での硬化性は不十分であり、光開始剤量 30wt%まで増量した処方Bでも同様に硬化不良の結果であった。

Kohshylex[®]-I は開始剤効率の低いノリッシュ II 型の開始剤であるにもかかわらず、ノリッシュ I 型の ESACURE KIP 150 と同様な、高い硬化性と多成分に対する良好な相溶性を有することが示された。

また処方 B にて 405nm での成形物のゲル分率と低分子量成分含有率の定量を行った(表 2)。その結果、Kohshylex[®]-I を用いた場合、ゲル分率が最も高く、低分子量成分の溶出もごくわずかであった。ESACURE KIP 150 ではゲル分率は比較的高いものの、ゲル化していない成分として、低分子量成分が多量に残留し、主に光開始剤由来であることが確認され、硬化性は良好ながら、安全性に懸念の残る結果だった。また SpeedCure 7010 では硬化性が不足しており、ゲル分率が低い結果だった。

表 2. ゲル分率と低分子量成分

光開始剤	ゲル分率	低分子量成分(*)
	(wt%)	(wt%)
Kohshylex [®] -I	89	1
ESACURE KIP 150	72	28
SpeedCure 7010	29	22

(*)分子量1,000以下の抽出量

4. 結論

これらの結果から、自身が高分子量体である Kohshylex[®]-I はノリッシュ II 型の水素引抜きによる重合により得られる硬化物が高分子量化しやすい特徴があるため、硬化物中の低分子量成分の含有量がごくわずかであることが確認された。

一方で硬化性は三級アミンやチオール等の低分子量水素供与体の添加無しに、ノリッシュ I 型同等の良好な開始能を示しており、特に処方 B では UV-LED 365nm を使用した場合、1mW/cm²の照度にて数秒で薄膜の硬化が可能なのも確認しており、液槽光重合法、いわゆる DLP3D プリンターでの使用も可能であることが示された。

また処方Aの粘度は 25℃において 50mPa・s 程度とインクジェットインキとして適用可能な粘度であり、材料噴射方式、いわゆる UV インクジェット方式の 3D プリンターでの使用が可能であることも示された。

以上のことから、弊社開発品 Kohshylex[®]-I は光開始剤として材料噴射方式や液槽光重合法の光造形向けに使用可能であり、光開始剤そのものが高分子量で安全性が高く、また硬化物中の低分子量成分を大幅に低減できるため、造形物の安全性向上に寄与できることが示唆された。

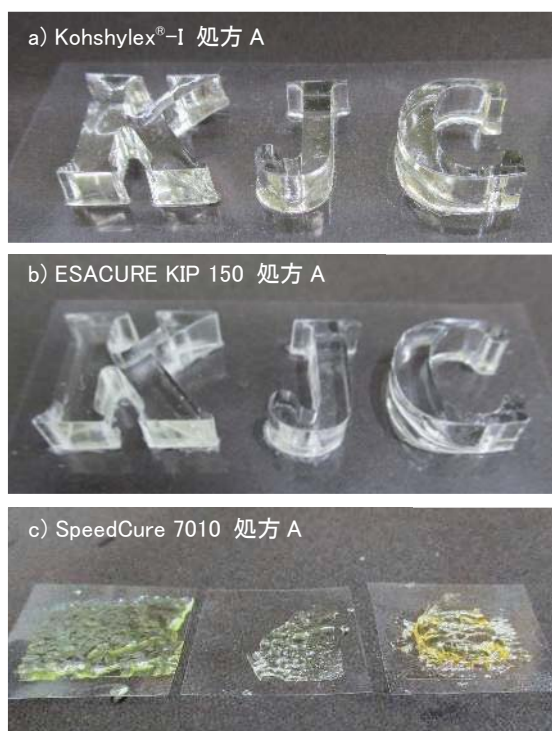


図 1. 成形物 (K:365nm、J:385nm、C:405nm)

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

An Examination of Learning to Create 3-D Works Using GelPiPer in Japanese School Education

臼井 昭子¹, 登本 洋子², 櫻井 佑真³, 渡邊 洋輔⁴, 古川 英光⁴

Shoko USUI¹, Yoko NOBORIMOTO², Yuma SAKURAI³, Yosuke WATANABE⁴, Hidemitsu FURUKAWA⁴

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 東京学芸大学大学院教育学研究科,

³ 山形大学工学部,

⁴ 山形大学大学院理工学研究科

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

² Graduate School of Teacher Education, Tokyo Gakugei University,

³ Faculty of Engineering, Yamagata university,

⁴ Graduate School of Science and Engineering, Yamagata university

【要約】

3D プリンタを学校の授業で活用するための探索的な実践として、高校生を対象にワークショップを行い、美術科の立体造形の学習における Tinkercad と 3D ゲルプリンタの有用性について検討した。その結果、3D モデリングソフトウェアの操作経験がない高校 2 年生の場合、Fusion360 に比べ Tinkercad の方が操作の習得にかかる時間は短い傾向が見られた。また、生徒らはゲルという材料と 3D ゲルプリンタという造形方法に向き合い、その特徴をいかすような工夫を重ね立体造形に取りくむ様子が確認された。こうした生徒らの学習態度からは、3D ゲルプリンタが美術科の立体造形における学習目標の達成を支援できていたと考えられた。

キーワード: 3D ゲルプリンタ, ゲルパイパー, 初等中等教育, 立体作品, 美術科

【Abstract】

We conducted a workshop for high school students to exam whether Tinkercad and 3D gel printer could support the learning of creating 3D works in Japanese school education. We found that the second-year high school students who had no experience in operating 3D modeling software tended to take less time to learn Tinkercad than Fusion360. The students were seen to be creative in making use of the softness of the gel material and the unique features of the 3D gel printer modeling method. The students' creative activities and learning attitudes suggest that the 3D gel printer was able to assist them in achieving the learning objectives of the art classes.

Keywords: 3D Gel Printer, GelPiPer, Primary Secondary Education, 3D Works, Art Classes

1. 序論

1.1 学校教育の情報化と 3D プリンタ活用の課題

文部科学省の GIGA スクール構想により 1 人 1 台端末の整備が進められ、2021 年 7 月の速報値によると、全国の 96.1% の小・中学校で端末の整備が完了している[1]。小学校ではプログラミング教育が導入されたほか、総合的な探究(学習)の時間や STE(A)M 教育といった教科横断型学習の広がりが見られ、学校教育における学びは情報化とともに大きな転換期を迎えている。3D プリンタはこうした新しい学びを支援する技術の一つになると期待されており[2]、アップル社の元教育部門担当ジョン・カウチは「3D プリンタは子供たちの学習を根底から変える可能性を秘めている」と述べている[3]。

しかしながら、筆者らが日本における 3D プリンタの教育的な活用の研究事例を調査したところ、表 1 に示した

通り、高等専門学校や大学など対象の年齢層が高くなるほど研究事例が多く、小・中・高等学校といった初等中等教育での研究事例は少ないことが確認された[4]。

表 1. 3D プリンタの教育的活用の研究事例数(件)

校種	研究事例数
小学校	4
中学校	9
高等学校	11
高等専門学校	25
大学	47
校種がまたがったもの	13
教員を対象にしたもの、そのほか	24

* J-STAGE において「3D プリンタ」という語で検出された研究事例数 2,570 件のうち、学校教育における活用の研究と判断した 133 件をさらに校種で分類した(2020 年 9 月時点)。

現時点では、日本の初等中等教育において 3D プリントが活発に活用されている状況とは言えない。その原因の一つに、3D データを作成するモデリングソフトウェア(以降、3D ソフト)の操作の習得が難しいことが指摘されている[5]。例えば、筆者らが 3D ソフト未経験の高校 2 年生 5 名を対象に行なったワークショップでは、Fusion360 をダウンロードしセットアップするのに約 45 分かかり、さらに、「ゆるキャラをつくろう」というテーマのもと 3D データを作成するのに要した時間は表 2 の通りであった[6]。生徒イの場合、セットアップ(45 分)後に操作を習得し 3 個のデータを作成するには 735 分を要した。735 分は 50 分授業の場合 15 時数弱に相当する。年間の授業時数が 35(中学 3 年生の技術・家庭科、中学 2・3 年生の美術科)や 70(高校の情報科、高校の美術科)であることを考慮すれば、3D プリントの授業への導入は慎重にならざるを得ない。今後は、初等中等教育の授業で使いやすい 3D ソフトを検討していく必要がある。

表 2. Fusion360 でデータ作成にかかったおおよその時間(分)

	生徒ア	生徒イ	生徒ウ	生徒エ	生徒オ
1 個目	180	300	120	120	300
2 個目	120	180	30	30	90
3 個目	—	210	30	30	—

1.2 美術科の学習目標の設定例における 3D ゲルプリンタの有用性

学校教育(本稿では初等中等教育を指すこととする)で行われる指導内容は、法的拘束力を持つ「学習指導要領」によって示されている。学習指導要領とは、全国の学校でも一定の水準が保てるよう、文部科学省が定めている教育課程(カリキュラム)の基準のことであり、これを逸脱して授業を組み立てることはできない[7]。

そのため、3D プリントを授業で活発に活用してもらうためには、3D プリントが学習指導要領で示されている各教科の学習目標の達成を支援する教具になり得ることを具体的に示していくことが求められる。例えば、高等学校の情報科に 3D プリントなどのデジタル工作機械を用いた STE(A)M 教育を導入し、生徒らがアイデアを形にするプロセスに一定の有効性を確認した松浦らの実証実践[8]のように、3D プリントの活用がどの教科のどんな学習目標の達成を支援できるかについて実践と検討を重ね、知見を得ていく必要があろう。

現時点で、立体物を造形する学習活動が明確に関係している教科は、技術・家庭科のほか小学校の図画工作科と中・高等学校の美術科などがある。このうち、美術科では、学習指導要領に準じた教科書(日本文教出版『美術 2・3 下』)において、学習目標の設定例(表 3)とその題材例(図 1)が提示されている。題材例「想像の動物を打ち出そう」では材料に銅板を用いているが、学習指導要領解説では、使用するべき材料は指定されておらず、「より自由で多様な価値やイメージの可能性を考えて材料や方法を選び、新しいことに挑戦して創造

表 3. 美術科の学習目標の設定例

学習目標
(発想・構想) 生き物の持つ豊かな形や色からイメージを広げよう
(創造的な技能) 材料を生かし、方法を工夫して効果的に表そう
(鑑賞) 自然や作品の造形的な美しさを感じ取り、幅広く味わおう



図 1. 表 3 の学習目標に基づく題材例「想像の動物の形を打ち出そう」(教科書から転写)

的に表すこと」とされている。つまり、教員や生徒が材料や造形方法を選択することができる。

そこで、筆者らは、この学習目標(表 3)を達成するためには、3D ゲルプリンタ(別称、GelPiPer)[9]が有用であると考えた。なぜならば、ゲルという材料から生まれる唯一無二の造形は非常にユニークであり、粘土や石膏、銅板といった既存の材料と違い、より生き物に近く構想時のイメージも広げやすいと思われたからである。さらに、印刷後に時間経過とともに変化する材料で立体作品を創作する学習活動はこれまでにほとんど見られず、生徒らの興味・関心を高め、創作意欲を刺激することが期待できる。加えて、コンピュータを用いた 3D ソフトでの立体造形は、新しいことに挑戦して創造的に表すという点で期待が持てる。

1.3 目的と方法

3D プリントを学校の授業で活用してもらうための探索的な実践として、本稿では、直観的な作業ができると言われている 3D ソフトの Tinkercad とゲル状の柔らかい立体造形ができる 3D ゲルプリンタに着目する。

高校生を対象に、表 3 の学習目標を設定したワークショップを行う。ワークショップのテーマは、想像の動物を造形する題材例(図 1)から着想を得て、「3D ゲルプリンタで『世界にひとつだけの海洋ゲル生物』をつくろう」とし、Tinkercad の操作の習得にかかる時間を計る目安として、(1)1 個目の 3D データ作成にどれくらいの時間を要したか、(2)美術科の学習目標の達成を 3D ゲルプリンタが支援できていたかについて元美術科教員の第一筆者が考察し、美術科の立体造形の学習における Tinkercad と 3D ゲルプリンタの有用性を検討した。

2. ワークショップの実践

期間は 2021 年 8 月の 3 日間で、場所は Z 大学であった。ワークショップの概要を表 4 に示した。Y 高校の高

校 2 年生 4 名 (A~D) が参加した。Y 高校は工業高等学校で、3 名が情報系の学科、1 名が化学系の学科であった。全生徒に 3D プリンタの印刷をした経験や 3D ソフトの操作経験はなかった。適切な感染対策を行い、Z 大学の学生 3 名と第一筆者の計 4 名が実践補助者としてワークショップをサポートした。

表 4. ワークショップの概要

テーマ	3D ゲルプリンタで『世界にひとつだけの海洋ゲル生物』をつくろう
学習目標	表 3 の通り
内 容	ゲルの特性を生かしながら水流に漂う海洋生物を Tinkercad でデザインし、3D ゲルプリンタで印刷する。水槽に浮かべ観察・鑑賞する。
生徒の活動	1 日目 午後 ・アイスブレイク ・ゲルの特性や 3D ゲルプリンタに関する講義 ・Tinkercad の操作の習得
	2 日目 から ・Tinkercad でデザインする ・3D ゲルプリンタで印刷する ・水槽に浮かべ観察・鑑賞する ・改善点を探る
	3 日目 午前 ・完成した作品の発表会 ・質問紙記入
	3 日目 午後 ・完成した作品の発表会 ・質問紙記入
	3 日目 午後 ・完成した作品の発表会 ・質問紙記入

1 日目、生徒らは水流にゲル片を漂わせる実演を見たり、Tinkercad と 3D ゲルプリンタの説明を受けたりした。3D データを作成するためのパソコンは各生徒に 1 台準備した。Tinkercad の操作を習得する際には、最初、補助者の大学生が Tinkercad を操作するパソコンの画面を大型モニターに映し出し、基本的な操作方法について説明した。

3D ゲルプリンタについては、光造形方式のいわゆるバスタブ型でサポート(材)が発生しない構造であることなどの特徴に加えて、印刷後 1.5 倍ほどに膨潤することや 4D プリンティング[10]の概念について簡単に説明した。さらに、データを作成する際のコツとして「中空のデザインのよしあし」や「底面を安定させると印刷が成功しやすい」などについて補助者の学生が説明した。

探索的な実践のため、作成する 3D データの目標個数や完成時間の設定はしなかった。最終日は、「工夫したところ」「印刷後に膨潤することを意識して創作したか」などについて質問紙に記述してもらった。

3. 結果と考察

生徒らが 3D データ作成にかかった時間を表 5 に、作成した 3D データと実際の印刷物、質問紙の記述文を表 6 に示した。データの完成は生徒自身が完成と判断した時点とし[11]、作成にかかった時間は生徒の自己申告でおよそで報告してもらった。生徒らは各自 3~4 個の 3D データを作成した。

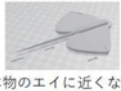
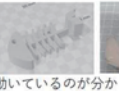
表 5. Tinkercad でデータ作成にかかったおよその時間(分)

	生徒 A	生徒 B	生徒 C	生徒 D
1 個目	75	120	90	60
2 個目	60	180	75	180
3 個目	60	120	80	120
4 個目	—	—	120	60

3.1 操作の習得に要した時間

操作の習得に要した時間を 1 個目のデータ作成にかかった時間で考察した。表 5 にあるように、1 個目のデータ作成に、各生徒は 60~120 分かけていた。ワークショップのテーマが違うため一概に比較はできないが、同じ条件のもと(3D ソフトの操作経験のない高校 2 年生が Fusion360 で作成した際にかかった時間 120~300 分(表 2)に比べ短いことが読み取れる。3D ソフトの操作経験のない高校 2 年生にとっては、Tinkercad の方が Fusion360 に比べ操作の習得が容易であることがうかがえた。一方で、Fusion360 では、2 個目以降のほとんどを 1 個目より短い時間で作成しているものの、Tinkercad の場合は、生徒 B の 2 個目、生徒 C の 4 個目、生徒 D の 2, 3 個目の作成時間が 1 個目より長くなっていた。表 6 の記述文に「(生徒 B)ヒレの形は scribble tool を使って

表 6. 生徒らが作成した 3D データと実際の印刷物、工夫したところなどの記述文(原文のまま転載)

	生徒A	生徒B	生徒C	生徒D
	3Dデータ 工夫したところなど	3Dデータ 工夫したところなど	3Dデータ 工夫したところなど	3Dデータ 工夫したところなど
1 個目	 甲羅を立体的につくった。ひれをうすくした	 首を長くし過ぎず、頭の大きさ角度を調整し、造形しているときに形が崩れないようにした	 本物のエイに近くなるようにできるだけこまくした。ひげをつかってヒレをつくった	 波で動いているのが分かりやすいように骨にした
2 個目	 下が平面になるようにヒレの位置を変えた	 ヒレの形を scribble tool で自分で描き作成した。尾びれが崩れないように形を斜め上と平行にした	 印刷できず	 もともと透明な生物を作るとキレイになると考えてつくった
3 個目	 うすく平べったくした	 印刷できず 下に接する面積が小さかったため形が崩れ印刷が上手くいかなかった。尾びれが斜め上になっていたため印刷できなかった	 アザラシにはねをつけた	 Mを使ってタコの足を再現した
4 個目			 押し出しを使ってハサミを上手く作ることができた	 ハサミは押し出しを使って再現した。左右微妙に違う足になるよう1本1本工夫してつくった

自分で描き」「(生徒 C)押し出しを使って」などとあるように、生徒らは各々で工夫をしていた様子がわかる。Tinkercad は円柱や立体文字など既存データを使えるため操作が容易である一方で、シェイプジェネレーターの押し出し機能などを使い、ある程度自由な曲線を描くことができオリジナリティを出しやすい。そのため、2 個目以降の作品に時間をかけていた背景には、高校生らがオリジナリティを求めて様々な表現に挑戦していた可能性がある。

また、Tinkercad は、ソフトのダウンロードを必要としないため Fusion360 に比べて授業に導入しやすいと考えられた。ブラウザで保存したデータを後日のパソコンでも開いたり編集したりできる点は、学校教育においても利点の一つであると思われる。参加した生徒からも「後日また修正を加えてみたい」といった声が聞かれた。

3.2 学習目標の達成

生徒らは操作をある程度習得した後は、自身のスマートフォンなどで調べものをし、例えばクリオネなど既存の動物の形を注意深く観察し自分の作品にいかそうとする姿勢が見られた。こうした様子からは、美術科の学習目標(表 3)の【(発想・構想)生き物の持つ豊かな形や色からイメージを広げよう】が達成されていたことが読みとれた。

【(創造的な技能)材料を生かし、方法を工夫して効果的に表そう】については、全生徒が印刷後に膨潤することを意識して創作したと答えており、表 6 にある「(生徒 A)下が平面になるようにした」や「(生徒 B)下に接する面積が小さかったため形が崩れ印刷が上手くいかなかった」といった記述からは、造形方法を工夫して効果的に表そうとしていた姿勢が見られ、この学習目標も達成できていたと考えられた。

また、【(鑑賞)自然や作品の造形的な美しさを感じ取り、幅広く味わおう】については、図 2 のような水流に漂う作品を鑑賞しながらお互いの作品を評価し合ったり、自身の作品について説明したりするなど幅広く味わおうとしている様子が見られた。

学習目標はいずれも達成されていたと読み取ることができ、3D ゲルプリンタが美術科の学習目標の達成を支援する教具になり得ることが示されたと考えられる。

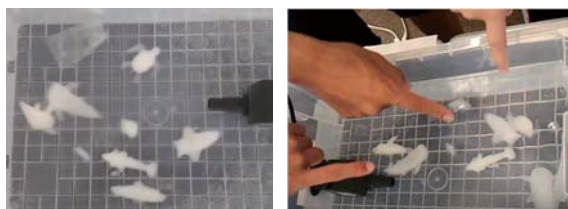


図 2. 水流に漂う印刷物とそれを指す生徒らの手

4. 結語

高校生を対象に 3D ゲルプリンタのワークショップを行った結果、主に以下の事柄が確認された。

(1) 3D ソフトの操作経験がない高校 2 年生の場合、

Fusion360 に比べ Tinkercad の方が操作の習得にかかる時間は短い傾向が見られた

(2) 生徒らはゲルという材料と 3D ゲルプリンタという造形方法に向きあい、その特徴をいかすような工夫を重ね立体作品を創作しており、美術科の学習目標は達成されていた

参加生徒の人数と属性から結果が示す範囲は限定的であるものの、以上の結果から、美術科の立体造形の学習における Tinkercad と 3D ゲルプリンタの有用性を示すことができた。

これまで美術科の題材では平面作品を取り扱うことが多く、立体作品を取り扱うことは少ない傾向が見られた[12]。コロナ禍のオンライン授業では、材料の配布という課題も生まれ、美術科の立体造形の学習がより敬遠されていることが推察できる。こうした点からも、立体造形の学習に 3D ソフトと 3D プリンタを導入する意義はより高まっていると考えられる。

5. 謝辞

生徒に楽しいお話をしてくださった川上勝先生、小川純先生、ワークショップを補助してくださった鈴木康海さん、落合俊樹さんに深く感謝します。科学研究費補助金(課題番号 20K12883)の助成を受けて発表しました。

参考文献

1. 文部科学省初等中等教育局, “端末利活用状況等の実態調査(令和 3 年 7 月末時点)(速報値)”, https://www.mext.go.jp/content/20210830-mxt_jogai01-000009827_10.pdf
2. 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.
3. ジョン・カウチ, ジェイソン・タウン, 花塚恵(訳), “Apple のデジタル教科書”, かんき出版, 2019.
4. 臼井昭子, 登本洋子, 渡邊洋輔, 古川 英光, “3D プリンタを活用した学校教育における研究の傾向と児童を対象にした研究事例の考察”, CIEC 春季カンファレンス 論文集 Vol.12 (2021), pp.80-85.
5. 鈴木二正, 芳賀高洋, 大川恵子, 村井純, “小学校低学年における 3D プリンタ学習の可能性”, 情報処理学会論文誌 教育とコンピュータ, 2(2) (2016), pp.10-18.
6. Shoko Usui, Yoko Noborimoto, Yosuke Watanabe, Hidemitsu Furukawa, “An Examination of Learning 3D Modeling Software and Creating 3D Data Using Online Video in a 3D Printer Workshop for High School Students”, 10th International Congress on Advanced Applied Informatics, (2021), pp.924-925.
7. 奥村高明, “美術教育課程論への焦点, 美術教育学叢書 1”, (2018), pp.45.
8. 松浦李恵, 岡部大介, 渡辺ゆうか, “高等学校における FALAB の公教育導入実証実践の事例報告”, 日本教育工学会論文誌, 44(3) (2020), pp.325-333.
9. GelPiPer, <https://gelpiper.cc/>
10. <https://doi.org/10.15108/stih.00258>
11. 浅野恵治, “立体造形における 3 次元スキャナ活用の諸問題”, 美術科教育学会誌, 33 (2012), pp.1-12.
12. 村上佑介, “児童を対象とした立体造形ワークショップの実践”, 美術教育学研究第 52 号 (2020), pp.337-344.

3D プリントフットウェアを活用した市民参加型ワークショップの実践 鎌倉市における実証実験「データウォーク@かまくら」を通じて

Practice of a citizen participation workshop using 3D printed footwear
through the “Data Walk @ Kamakura” demonstration experiment in Kamakura City

浅野義弘¹, 中山秀樹², 宮田知起³, 奥野雅大⁴, 増田恒夫¹, 守矢拓海¹, 田中浩也¹

Yoshihiro ASANO¹, Hideki NAKAYAMA², Tomoki MIYATA³, Masahiro OKUNO⁴,

Tsuneo MASUDA¹, Takumi MOROYA¹, Hiroya TANAKA¹

¹慶應義塾大学, ²鎌倉市共生共創部, ³株式会社 ORPHE, ⁴ラピセラ株式会社

¹Keio University, ² Kamakura city government, ³ ORPHE Inc., ⁴ Rapithela Corporation

【要約】

本研究は 3D プリントで製作したシューズとインソールを組み合わせ、被験者ごとにカスタマイズしたフットウェアを製作し、さらに歩容と地理情報を取得可能なセンサを組み合わせ、防災などのテーマに基づいて実施した市民参加型の歩行実験について述べるものである。データの取得を身近に捉え、複数人や自治体単位での活用可能性を探索することを目的として、市販のスマートシューズも併用しながら実験を行い、3次元地図上における歩行データの可視化やアンケート調査を行った結果、「身近なデータが生活の質の向上や地域づくりに役立つ」という認識を向上させることが分かった。また、個別製作した 3D プリントフットウェアにより、実験への関心を強化する可能性が示唆された。

キーワード: 3D プリント, フットウェア, スマートシティ, 歩容, マッピング, 市民参加

【Abstract】

This study describes how 3D printed objects and sensor-based walking capture and visualization can change the way people think about data utilization. We conducted several walking experiments, visualizations, and discussions with citizens living in Kamakura City, using commercially available smart shoes and 3D printed footwear created from their 3D scanned data. The result of survey showed that visualization of data can change consciousness about data, and also suggested that the 3D printed objects can attract consciousness and make positive changes.

Keywords: 3D printing, footwear, smart city, gait, mapping, citizen participation

1. 序論

センサや通信技術の発達によって、種々のデータの取得や共有が容易になった。IoT センサキットを用いて生活空間の情報を取得し、特定地域の行政に働きかけるような運動も起こっている[1]。こうしたデータ活用によって課題解決や価値創出が図られる都市や地域はスマートシティと呼ばれ、政府の支援等によって日本国内でも推進されている。他方、データの取得やその活用という行為の身近さが個人によって異なるデジタルディバイドの課題も共存しており、鎌倉市職員へのヒアリングでは、一部の市民にとってデータが「見えない／描けない／触れない／関係ない」ものとして捉えられていることを問題視していることが判明した。

データ活用に関する市民の意識を変容させるため、身近な行為である「歩行」をテーマとして、参加型の実験を実施した。歩行データの可視化によって「見えない／描けない」、個人の足形状や好みに基づいた 3D プリントフットウェアを作ることで「触れない」、実験中のディスカッションや振り返りを経て「関係ない」にそれぞれアプローチし、どのような意識変化が起きるかを調査した。

2. 実験の概要

実験は慶應義塾大学 SFC 研究所ソーシャル・ファブリケーション・ラボと鎌倉市の共催事業「データウォーク@かまくら～歩いて「私」と「まち」を知り、データで紡ぐみんなの鎌倉～」内で行われた。鎌倉市の広報誌と Web サイトを通じて募った鎌倉市内在住の成人 10 名を対象に、3 日程に分けて実験を実施した(表 1)。

表 1. 「実験のスケジュールと主な内容」

	日程	主な内容
第 1 回	20/12/19	ORPHE TRACK を用いた 避難シミュレーション
第 2 回	21/1/30	3D プリントフットウェアの試し履きと 製作プロセスの紹介
第 3 回	21/1/30 - 21/2/27	自由なテーマによる歩行とデータ収集, 結果についてのディスカッション

2.1 【第1回】津波発生時の避難シミュレーション

第 1 回ではデータの収集と可視化を体験するため、ORPHE 社の販売する、足の動きの解析に特化し、歩容解析・記録が可能なスマートシューズ「ORPHE TRACK」

(シューズ品名:SHIBUYA 1.1, センサモジュール品名: ORPHE CORE 1.1)と、1歩ずつデータを取得できるiOSの実験用アプリを用いて歩行実験を行った(図1)。



図 1. ORPHE TRACK を履いて街を歩く様子

歩行のテーマには、鎌倉市が抱える課題のひとつとして津波からの避難を設定した。被験者は5グループに分かれ「①スマートフォンを利用せずに海岸から 12 分間でできるだけ安全な場所に避難する」「②紙の地図を見ながら公共の避難所までたどり着く」の2つのテーマに従い、データを取得しながら移動を行った。

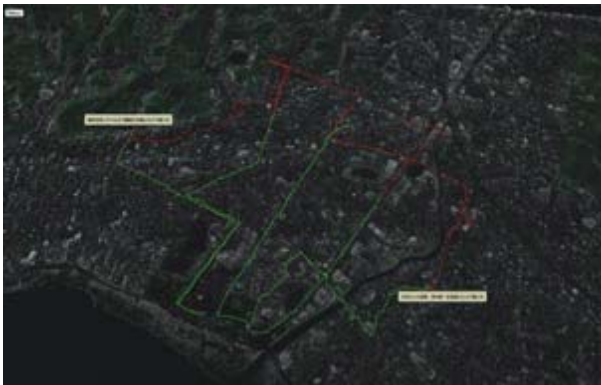


図 2. 海岸からの避難ルート(緑)と避難所へのルート(赤)

移動終了後、歩行データをコンピュータに送付し、海岸と2か所の避難所を含む鎌倉市役所周辺の 3D マップ上に移動ルートを表示(図 2)し、浸水領域のシミュレーションなどをスクリーン上で共有しながら、全グループで避難行動の振り返りを行った。なお、この実験内容や避難時間は先行事例[2]から着想を得ている。

2.2 【第2回】3D プリントフットウェアの貸与

第 1 回の実験終了後、被験者全員の足首から下部を左右それぞれ 124 枚の静止画として撮影(スキャン)し、Metashape[4]を用いて 3D モデル化した。そのデータを元にシューズの外形を設計し、ナイロン 12 をベースとしたエラストマーと着色用のペレットを用い、ペレット式 3D プリンターGEM550D(エス.ラボ社)で印刷したのち、超音波溶着によって組み立てた。また、義肢装具士がインプレッションフォームで採型した足底形状を、Structure Sensor(Occipital 社)を用いて 3D モデル化したものから設計したインソールを、3D プリンターCarbon

L1(Carbon 社)で製作した。

これらに ORPHE 社の歩容センサモジュール「ORPHE CORE 1.1(後に Android ユーザーのみ ORPHE CORE 1.2 に交換)」、スペーサー、フィッティング用の当て布を同封し、実験用フットウェアとして被験者に貸与した(図 3)。



図 3. 被験者に貸与した実験用フットウェア一式

当初の予定では第 2 回は第 1 回と同じルートを歩き、ORPHE TRACK と実験用フットウェアを比較するつもりであったが、新型コロナウイルスの流行に伴う神奈川県の実験事態宣言発出を受け、急きょオンラインに開催方式を変更し、実験用フットウェアを作る過程を紹介するプロセスを動画とスライドで紹介し、使用上の注意を説明した上で、被験者が各自で軽く試し履きをするに留まった。試し履きがうまくフィットしなかった被験者に対してのみ、間隔を開けて別会場に訪れてもらい、ヒートガンや当て布を用いてフィッティングを行った。

2.3 【第3回】自由なテーマによる歩行とデータ収集

第 2 回終了からおよそ1ヶ月のあいだ、被験者には ORPHE TRACK もしくは実験用フットウェアを貸与し、各自が自由に決めたテーマに基づいて一度以上歩行データを収集するよう依頼した。なお、第 1 回で使用した計測用アプリは利用可能な機種に制限があったため、被験者によるデータ回収は一般公開されている iOS/Android 用のアプリ「ORPHE TRACK Run」を通じて行われた。なお、被験者都合により、テーマを決めてデータを収集した被験者は最終的に7名となった(表 3)。

表 3. 「被験者によるデータ収集テーマ(一部)」

被験者	テーマ
A	できるだけ同じルートで 2 種の靴をはきくらべ、歩行データを測定する
B	ふだんの鎌倉生活の足あと(市役所への移動や散歩)
C	普段歩かない道を意識して鎌倉制覇
D	由比ヶ浜海岸から避難ルートの案内表示を頼りに避難所まで歩いてみる！
E	靴の違いを調べる(同じコースを歩く)
F	普段車でしか走らない道を歩いてみる
G	鎌倉の古道をデータで再発見？ 化粧坂切通し編

その後、被験者が集めたデータを鎌倉市全域まで拡

張した 3 次元マップ上に描画(図 4)し、オンラインで画面共有しながら各自の取り組みの振り返りを行った。



図 4. 鎌倉市の全域にマッピングされた歩行データ

3. 結果

各実験の終了後には、質問紙(第1回)およびオンラインの質問フォーム(第2回, 第3回)を用いてアンケートを実施した。以下、第 1 回から第3回まで継続して参加した7名についてアンケートの結果を記載する。

3.1 生活にまつわるデータ活用についての意識変化

第1回から第3回まで共通して行った質問「歩行のような生活にまつわる身近なことに関するデータ活用について、今日のイベント前のあなたの認識に一番ちかいものを選んでください」への回答は、「①あなた自身の生活や活動のデータが、自分の生活の質の向上に役立つ」「②あなた自身の生活や活動のデータが、まちづくりや地域づくりに役立つ」の2問に対し、それぞれ「1 強く意識していた／2 まあまあ意識していた／3 あまり意識したことがなかった／4 全く意識したことがなかった」の選択式で行われた。その点数の推移を示す。

表 3. 「① あなた自身の生活や活動のデータが、自分の生活の質の向上に役立つ」への回答スコア

	A	B	C	D	E	F	G	平均値	中央値
第 1 回	1	4	2	3	3	3	1	2.43	3
第 2 回	1	3	1	2	2	1	1	1.57	1
第 3 回	1	2	2	1	2	4	1	1.86	2

表 4. 「② あなた自身の生活や活動のデータが、まちづくりや地域づくりに役立つ」への回答スコア

	A	B	C	D	E	F	G	平均値	中央値
第 1 回	2	4	4	4	2	4	2	3.14	4
第 2 回	3	3	2	3	3	2	1	2.43	3
第 3 回	3	2	3	1	3	3	2	2.43	3

「生活の質の向上(表 3)」および「まちづくりや地域づくり(表 4)」双方において、第 1 回よりも第 2 回と第 3 回の方が平均値・中央値ともに低い(＝意識が強い)スコアを示していることが分かった。

3.2 データの可視化についての評価

データの可視化に関する意見をまとめる。第 1 回ではグループごとの避難経路を 3D マップ上に描画しながら振り返りを行ったが、「本日のイベントの満足度をお聞かせください」に対する自由記述として、「グループ毎に通るルートが全く異なりそれぞれに発見があった」「避難行動の違いがとても興味深かった」といった回答があった。また、浸水領域のシミュレーション(図 5)に対する口頭でのコメントとして、「距離に対して浸水しにくい道を選んでていたが、ある場所では想定外の方から水が来ることを知り学びになった」という旨の振り返りも行われた。

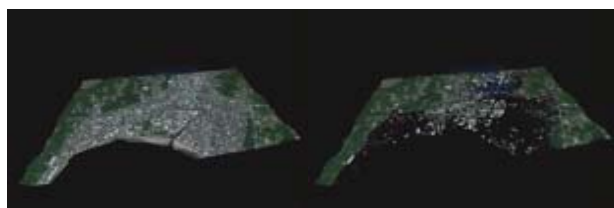


図 5. 浸水領域のシミュレーション(第 1 回)

第 3 回での自由記述式の質問「データの可視化や物質化によって、新しい発見や気づきはありましたか？」に対する「平面図ではわからない山の高低差(図 6)を見られたことに感動しました」「鎌倉の立体的な特徴」といった回答や、「有用だと感じたり、もっと使ってみようと思うデータはありましたか？」に対する「平面上の紙地図と違って、高低差など感覚的に伝わるものがあり、歩いてみたいと思いました」「3D データが記録できるのであれば、ショッピングモール等の大型施設内での人の流れも分析できるのかな」といった、3次元的な描画を評価する意見も多く寄せられた。



図 6. 被験者 G による山道を歩いたデータの描画(第 3 回)

3.3 データの可触化についての評価

製作した実験用ソフトウェアに関する意見をまとめる。第 1 回での「足をスキャン・採型する際に、何か気になったことはありますか？」という質問に対しては、「初めての経験で興味深かったです」「特になし(違和感は無かった)」といった、抵抗なく受け入れられる回答が主だった。

第 3 回のデータ収集後に行ったインソールに関する質問「日常でも使ってみようと思いましたか？」に対しては、1名が無回答、1名が「足がすべらなさすぎて、歩きづらさを感じました」として「あまり使いたくない」と答えた。残りの 5 名は「使いたい」と答え、その理由として「自分の足にじっくりくるインソールだった」「足裏へのフィッ

ト感があって、体に良さそうな感じです」「左右のバランスが改善できそうな気がする」などが挙げられた。

同様のタイミングで集めたシューズ本体への感想としては、「踵が緩くて脱げてしまいそうになるため歩き方も不自然になります」「全体的に硬いので、早く歩くのには向いていないと感じました」「上部カバー部のつま先部が当たり痛かった。はきづらかった」といった、履き心地に関するネガティブな評価が寄せられた。

4. 考察

3.1 で示したように、実験を通じて自身の生活や自治体でのデータ活用に関する意識が変化している。第 1 回から第 2 回での意識の向上には、「ORPHE TRACK を用いた歩容データの収集体験」や「避難ルートの可視化」が寄与したと考えられる。第 2 回から第 3 回の間には実験用フットウェアを各自に郵送し、被験者自ら設定した課題によるデータ収集に取り組んだが、第 1 回から第 2 回の間ほど明確な数値の変化は見取れなかった。この理由として、3.2 で示したような第 1 回での体験（データを見る／データを描く）がすでに認知の変化に十分寄与するものであったことや、第 2 回以降余儀なくされたオンラインでの会合や個人単位でのワークにより、体験の質が変化したことなどが推察される。

また、3D プリントで製作した実験用フットウェアについて、3.3 で示したとおり、インソールは肯定的に、シューズ部分是否定的に捉えられる傾向があった。インソールの製作プロセスは既に商業レベルで確立されたものである[4]が、シューズ部分の設計や製造方法は実験的なものにとどまっていたことが原因と考えられる。シューズ部分の改善が進み、より快適な歩行やデータ収集が行えるようになれば、「データに触れる」ことがもたらす意識の変化は異なる結果になることが予想される。



図 7. 被験者の足形状と色の希望に基づいて製作された
10 パターンの実験用フットウェア

その他の要素として、実験用フットウェアは製作前の段階でサンプルとして用意した3色から選んでもらうことを想定していたが、実物を見た被験者から「サイドの色も変えてほしい」「淡目の色が良い」といった細かな要望が寄せられ、結果として図 7 のようなバリエーションに派生した。また、第 2 回のオンラインセッションでは各自のフットウェアを画面上で見せ合ったが、「他の方のフットウェアの実物を拝見したい」といったコメントも寄せられ

た。さらに、被験者によるデータ収集のテーマ設定では、「ORPHE TRACK との履き比べ」というテーマも生まれており、実験用フットウェアという「かたちある実物」が存在することで、実験自体への興味を引き出し、歩くことへの積極的な動機付けにも寄与したと考えられる。

5. 結論

本研究では 3D プリンタで製作したシューズとインソールを組み合わせ、被験者ごとにカスタマイズしたフットウェアなどを利用し、歩容と地理情報を取得可能なセンサと組み合わせ、津波からの避難などのテーマに基づいて歩行実験を実施した。アンケート調査によって、歩行データを収集する体験やその3次元的な可視化が、「身近なデータの活用が、生活の質の向上や地域づくりに役立つ」という認識を向上させることが分かった。また、本実験のために製作した実験用フットウェアは履き心地の面で改善すべき点が多いが、かたちある実物が存在することで、実験への関心や歩行への動機を引き出す可能性が示唆された。

現在、フットウェアの履き心地の向上や柔軟性を増すための工夫を始めており、また、収集された歩行データやコメントの公開(図 8)を通じ、今後の具体的なまちづくりなどのアクションに反映していくことを目指している。



図 8. 実験後 Web[5]で公開されたコメント付き 3D 地図[6]

6. 謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点 (JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献, 注釈

- [1] Smart Citizen Kit <https://smartcitizen.me/>
- [2] 逃げ地図づくりプロジェクトチーム: 災害から命を守る「逃げ地図」づくり, ぎょうせい, 2019 年
- [3] <https://www.agisoft.com/>
- [4] ラピセラ社によるインソール製作クラウドサービス「eLabo」 <https://rapithela.co.jp/elabo/>
- [5] <https://kamakura.sfc.keio.ac.jp/datawalk/>
- [6] ブラウザ上で点群描写をするライブラリ Potree (<https://github.com/potree/potree>)を基に開発。

都市における多様な居方・振る舞いに対応した大型メタマテリアル構造体の設計と製造

Design and Manufacture of Large Metamaterial Structures for Diverse Urban Situations and Behaviors

矢崎友佳子, 有田悠作, 加藤陸, 田中浩也

Yukako YAZAKI, Yusaku AIRITA, Riku KATO, Hiroya TANAKA

慶應義塾大学, 田中浩也研究会

Hiroya Tanaka Laboratory, Keio University

【要約】

3D プリンタで家具やベンチを製造するプロジェクトが盛んに行われているが、家具スケールの 3D プリントでメタマテリアル構造を用いたものは未だ数少ない。我々は、メタマテリアル構造によって異なる機能・特性を持った数種類の 35cm ブロックを 3D プリントし、それらを積み・並べる等組み合わせることによって街具と遊具の中間形態をつくり出す可能性を検討している。そうしたなかで、実際の設置実験を通じてニーズを抽出し、改めてペルソナを設定したうえで、次なるメタマテリアル構造を導き出し、漸次的に発展させていく設計の方法論を見出すこともできた。本稿では、こうした方法論を軸に、メタマテリアル構造を備え家具スケールの 3D プリント物が、都市空間に与える価値と魅力について論じる。

キーワード: 家具スケール 3D プリンター, メタマテリアル

【Abstract】

There have been many projects to manufacture furniture and benches by 3D printers, but there are still few furniture-scale 3D printed products using metamaterial structures. We are investigating the possibility of creating an intermediate form between street furniture and playground equipment by 3D printing several kinds of 35cm blocks with different functions and characteristics based on the metamaterial structure, and combining them by stacking or arranging them. In the process, we were able to extract needs through actual installation experiments, set up a new persona, derive the next metamaterial structure, and find a design methodology for gradual development. In this paper, we discuss the value and attractiveness of furniture-scale 3D printed objects with metamaterial structures in urban spaces based on this methodology.

1. 序論

近年、3D プリンタで家具やベンチを製造するプロジェクトが増えている。特に街具(=public furniture)として街に設置する事例がたくさん生まれている。たとえば”Print Your City”[1]はプラスチック廃棄物から作られた 3D プリント街具であり、様々な色や機能を持った街具をカスタマイズして購入することができる。PHILIPP ADUATZ と incremental3D が制作した街具[2]はコンクリート製であるため、屋外に設置する 3D プリント物でありながら劣化を抑えて長く使うことができる。益山らは Circular Printed Chair として 一筆書きからつくられるリサイクルプラスチック製家具のシリーズを展開している [3]。

これらの街具に共通して言えるのはどれも固く、座り心地や使い方は、従来の街具と大きく変わらないということである。

そこで我々は、柔らかな材料と、メタマテリアル構造を用いて今までにない座り心地・使い方をする街具を開発することにした。それらが都市空間に与える価値と魅力

について検討する。

2. メタマテリアル

メタマテリアルとは小さな周期構造を制御することで元のマテリアルが持つ以上の新規な特性を実現させるものである。概念としては過去からあったが、3D プリンタの登場によりその実現可能性が大きく開かれ、様々な種類のメタマテリアルが提案されている。

Hasso-Plattner-Institute が提案したものでは[4]、力をの伝え方を制御することによりドアノブやハサミのような構造を一括で 3D プリントすることが可能になっている。Christian Schumacher は、単一素材で 3D プリントされているのにもかかわらずモデル内で柔らかさのグラデーションがつけられている構造を提案している [5]。Jonas Martinez はボロノイ構造を制御して柔らかくモーフィングさせる構造を開発している[6]。

メタマテリアルの構造を特性と振る舞い別に分類してみた結果が図1である。



図 1. メタマテリアルの特性と振る舞いの分布図

双安定性は二つの安定状態があること、そして弾性は負荷を掛けると歪み、除くと元の状態に戻ることである。また2D→3Dはシート状のものが立ち上がった曲面になること、変形は内部構造により力を伝え、決まった方向にトランスフォームすること、触覚はふわふわ・ぷにぷになど人に何らかの触覚の印象を与え大きな特徴になること、テクスチャは表面に何らかの模様が現れ、大きな特徴になることである。

ほとんどのメタマテリアルは素材や機能などは違えども小型の3Dプリンターで作られたものであり、大型の3Dプリンティングに活用した例は少ない。そこで本研究はメタマテリアルを大型化した時にどのような新しい機能・振る舞いを発現するのかということを探索することとした。

2. 中型ペレット式3Dプリンタ

今回使用するのはFGF(Fused Granular Fabrication)方式の3Dプリンタ GEM220D(図2)で、扱えるペレット材料の幅が広く出力も高速であるが、メタマテリアルを造形するにあたっては制約もある。工業用ペレットを押し出すのに十分な大きさのノズル穴の直径が必要のため、プリントされるフィラメントの直径は比較的大きい。そのため、太いフィラメントで構成された支持体を印刷後に切断・除去することができず、サポート材を使用することができない。このように、複雑な3Dデータを用いて自由にメタマテリアルを設計することには限界があるが、この制約の下でも3Dプリントが可能な典型的なメタマテリアル構造がいくつか存在する。



図 2. GEM220D(ArchiFAB IRORI)

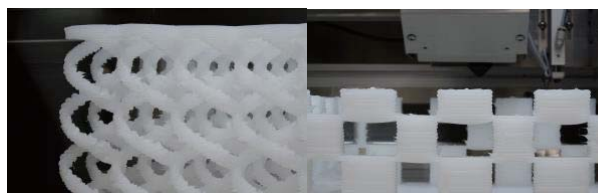


図 3. オーバーハング(左),ブリッジ構造(右)

3. 3種類の初期プロトタイプ

まず我々は、良く知られた代表的なメタマテリアル構造をそのまま採用し、「柔らかい」「硬い」「跳ねる」の3種類の振る舞いをする街具を制作した。「柔らかい」はオーセティックパターン[7]を使用しており、緩やかに沈みこむ動きをする。「硬い」はジャイロイド構造[8]を使用しており強度を保ちつつ少ない材料で制作されている。「跳ねる」はバネ構造を使用しておりクッションやトランポリンのような挙動をする。人間が座りやすい高さということでそれぞれ35センチ立方のサイズに設定した。

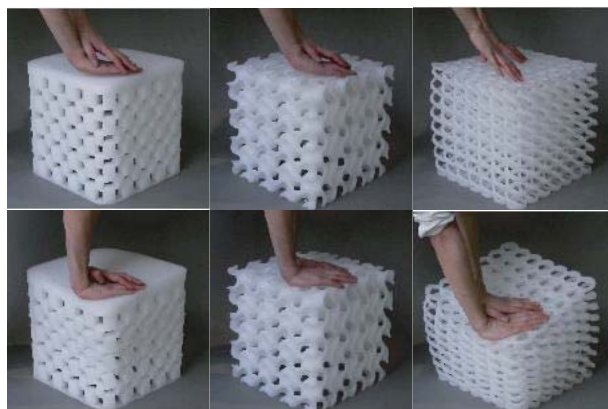


図 4. 左から「柔らかい」「硬い」「跳ねる」

これらを実際に様々な場所に設置し、使われ方を観察した。子供は「跳ねる」「柔らかい」を主に使いながら1人から複数人で長い時間過ごし、組み合わせを自由に変えて本を読んだり遊具として使ったりしている様子を見かけた。若者は同じく「跳ねる」をクッションのように使っている人が多かった。中年の人は「跳ねる」だと少し不安なので「柔らかい」くらいが快適であるという声があった。高齢者の方や体の大きな男性は「硬い」が一番安定しているという理由で選んでいるシーンもあった。

滞在時間については子供以外あまり長くなく、物珍しさで近寄り試しに利用し、気が済んだら去っていくということがよくあった。以上の点から、次の課題はより長い時間使われることであることが分かった。また、現時点でのこの街具の良さは何でも使えることであるが逆に目的を持って利用すると、少し自由度や快適さに欠けていることがわかった。

	子供	若者	中年	高齢者
跳ねる	◎	◎	△	△
柔らかい	○	○	○	○
硬い	○	○	○	◎
滞在時間	長	中	短	短

図 5. 利用者の利用状況



図 6. 実験全体の様子



図 7. 子供の利用者(左)若者の利用者(右)の様子

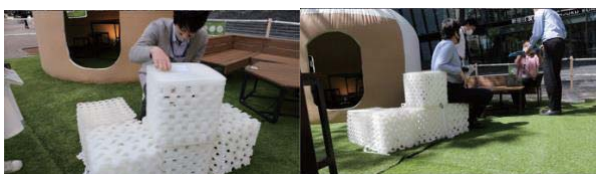


図 8. 中年の利用者(左)高齢者の利用者(右)の様子

4. 都市における多様な居方・振る舞いに対応させた進化版プロトタイプ

1 回目の実験で抽出したニーズをもとにペルソナを設定して彼ら彼女らの居方や振る舞いを整理し、他方、メタマテリアルが生み出す機能や特製を整理したうえで、両者をマッチングさせ、公園に設置する新たな街具を新たに構想しなおすことにした。

ペルソナ A: 若いカップル. 2 人で利用している。

ペルソナ B: ママ友. 子供達を眺めながら複数人で立ち話をしている。

ペルソナ C: 1 人で長時間滞在している老人・社会人

それぞれに対して望ましいと思われるメタマテリアルは次のようなものとなった。

A: Chiral pattern: 上から力を加えたとある方向に回転し、捻るような動きをする.[9]

B: Bistable pattern: 二つの安定状態を持つ構造で高さを調節できる.[10]

C: Growth ring pattern: ある場所に力をかけると決まった形に変形する構造.[11]

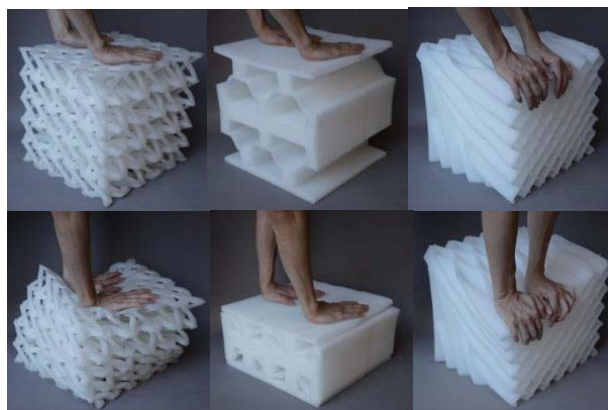


図 9. 左から A,B,C

これらは、実際には次のように使われることが想定されている。

A は座るとある方向に捻るため、正面で向き合うのは圧迫感があるが横に並ぶのは味気ない時を想定している。B は高さを自由に変えられるのでより組み合わせの自由度が上がる。人数に合わせて机にしたり椅子にしたりするなど自分で心地の良い環境が生み出せる。

C は腰を下ろすと背もたれが生まれ、体にフィットするので長時間滞在に向いている。

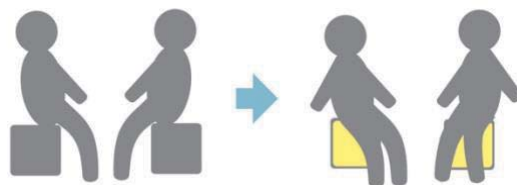


図 10. A: Chiral pattern

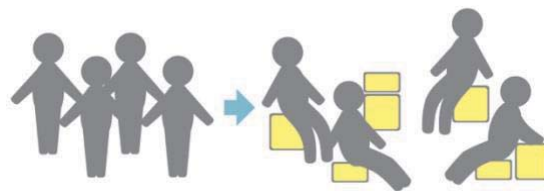


図 11. B: Bistable pattern

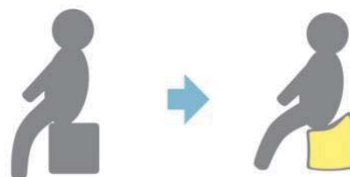


図 12. C: Growth ring



図 13. 左から A,B,C のプロトタイプの様子



図 14. 使用例 1

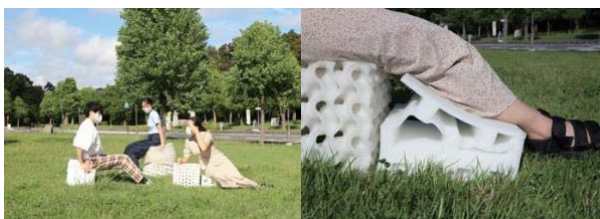


図 15. 使用例 2

5. 今後の展望

上記の新しい街具を実地検証する場として 2021 年 11 月に竹芝での屋外実験を予定している。実際の使用方を観察し、アップデートしていく予定である。



図 16. 実験予想図

また将来的には都市の利用状況に合わせてこれらの街具の種類・数・割合を変えることも考えている。都市デザインを研究しているヤン・ゲール事務所の”BENCHMARK”[7]はセンサーを中に仕込んだ街具を町に設置し、人々に使ってもらうことで公共空間の使用方をリサーチしている。そのように新たな街具というだけでなく都市全体のプラットフォームに成長させることも検討している。

謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献

1. The New Raw, Print Your City
<https://www.printyour.city/>
2. PHILIPP ADUATZ, incremental3D, Kara Mann
<https://www.philippaduat.com/portfolio-item/private-commission/>
3. 益山詠夢 “Circular Printed Furniture”
https://dmec.sfc.keio.ac.jp/assets/circular_printed_furniture_2020.pdf
4. Ion, A. Frohfen, J. Wall, L. Kovacs, R. Alistar, M. Lindsay, J. Lopes, P. Chen, H-T. Baudisch, P. “Metamaterial Mechanisms” UIST’16 pp.529–539(2016)
5. Christian Schumacher, Bernd Bickel, Jan Rys, Steve Marschner, Chiara Daraio, Markus Gross “Microstructure to control elasticity in 3D printing” ACM Transaction on Graphics, Volume 34, Issue4, No.136 pp 1–13(2015)
6. Jonas Martinez, Samuel Hornus, Haichuan Song, Sylvain Lefebvre “Polyhedral Voronoi diagrams for additive manufacturing” ACM Transaction on Graphics Volume 37 Issue4, No.129 pp 1–15(2018)
7. Xin Ren, Jianhu Shen, Arash Ghaedizadeh, Hongqi Tian and Yi Min Xie. “A simple auxetic tubular structure with tuneable mechanical properties.” Smart Materials and Structures. Volume 25, No.6.(2016)
8. Diab W. Abueidda, Mohamed Elhebeary, Cheng-Shen (Andrew) Shiang, Siyuan Pang, Rashid K. Abu Al-Rub, Iwona M. Jasiuk “Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures Experimental and finite element study” Materials&Design Volume 165, 107597(2019)
9. Liang Wang, Hai-Tao Liu “3D compression-torsion cubic mechanical metamaterial with double inclined rods” Extreme Mechanics Letters Volume 37, 100706(2020)
10. 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 小泉雄一郎 「3D プリントを活用した形状記憶・衝撃吸収メタマテリアル開発」 The Journal of 4D and Fabrication No.1 1–8(2020)
11. Thibault Tricard, Vincent Tavernier, Cedric Zanni, Jonas Martinez, Pierre-Alexandre Hugron, Fabrice neyret, Sylvain Lefebvre “Freely orientable microstructures for designing deformable 3D prints” ACM Transactions on Graphics, Volume 39, Issue6, No.211, pp1–6(2020)
12. Gehl Institute, MIT Civic Date Design Lab, BENCHMARK
<https://gehlpeople.com/shopfront/benchmark/>

ダイヤモンド格子型のジョイントシステムの提案

Diamond Lattice Joint System

木島 風沙¹, 舘 知宏¹

Nagisa KIJIMA¹, Tomohiro TACHI¹

¹ 東京大学

¹University of Tokyo

【要約】

日本の伝統的な木造建築に用いられる継手・仕口のように、幾何学的な嵌合のみで接合するブロックシステムを提案する。菱形十二面体形状をなすブロックは、四つが一点でつながる継手を持ち、全体としてダイヤモンド格子に沿って空間を二等分する多孔質な構造 (Schwartz D-Surface の離散版) を構成する。継手のデザインは、すべての部材が共通であり、オス・メスが存在しない。継手のデザインバリエーションとして、一つずつ積み木のように積んでいくもの、二つずつ組で接続するもの、四つ同時にスライドすることで組むものなどを提案し、それらの性質や一般化について論じる。

キーワード: 継手設計, 空間充填, ダイヤモンド格子, 組み立てプロセス

【Abstract】

We propose a block system that is joined only by geometric combinations, like the Japanese traditional wooden joints “tsugite” and “shiguchi.” The blocks, which have a rhombic-dodecahedral shape, have four joints that connect at a single point, and as a whole constitute a porous structure (a discrete version of the Schwartz D-Surface) that bisects space along a diamond lattice. The design of the joint is the same for all members, and there is no male or female. We propose design variations of the joints including those that are stacked one by one like building blocks, those that are connected in pairs of two, and those that are assembled by sliding four simultaneously. We discuss their properties and generalizations.

Keywords: joint design, space tessellation, diamond lattice, assembly process

1. 序論

日本の伝統的な木造建築に用いられる継手・仕口のように、部材同士が接着剤等を用いずに接合し、繰り返し分解や組み替えをできるブロックシステムは、自己組み立て[1]、玩具、プロトタイプ制作のツール、リユース可能な建築構造物などに応用可能である。本研究では、ダイヤモンド格子に沿って 4 つのブロックが一点でつながるような継手を持ったブロックを考案した。これらのブロックは一つ一つが菱形十二面体の形状をしており、接続していくと、空間を二等分する多孔質な構造を構成する。

継手のデザインは、いずれもすべての部材が共通であり特にオス・メスが存在しない特徴がある。継手のデザインバリエーションとして、一つずつ積み木のように積んでいくもの、二つずつ組で接続するもの、四つ同時にスライドすることで組むものなどを提案し、それらの性質や一般化について論じる。

2. 基本の幾何構造

本提案のブロックは、菱形十二面体がベースとなっている(図 1)。具体的には、菱形十二面体の、一組の向かい合う三価頂点の周りに集まる六面を隣り合うジョイントと共有するように接続する。この六面に互いにはまり込む凹凸の継手を設計する。

表面の凹凸により、4 つのブロックがマラルディの角で接合し、ダイヤモンド格子をなす。このブロックの特徴として、ジョイントとなる凹凸には雄雌の別がないことである。そのため、一つのブロックシステムにつき使われる

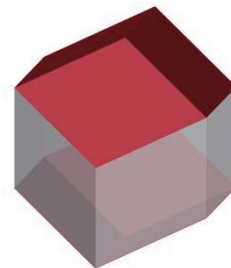


図 1: ブロックの基本をなす菱形十二面体。赤い面を隣接ブロックと共有する。

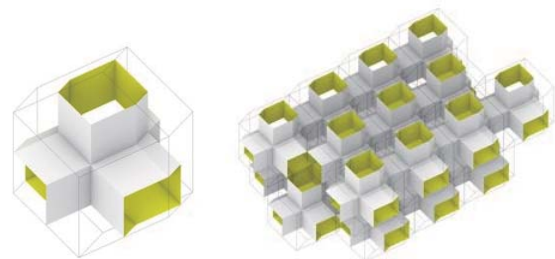


図 2: ブロックを接続した構造。表面を取り出すと、空間を二等分するスポンジ多面体となる。

ブロックの種類は単一である。

このブロックは、すべて繋げていくと、菱形十二面体で充填されたソリッド部分と、その余白とが合同なダイヤモンド格子型の立体形状になる(図 2)。つまり空間の半分を充填した構造となる。このとき境界をなす表面を取れば、それは空間を2等分するスポンジ多面体となる (Gailunas)[2, p.115]。また、これは Schwartz D-Surface[3]の離散版とも言える。

3. ジョイント設計のための軸の定義

ジョイント構造を設計するにあたって、ブロックの接合に関する軸と方向を定義する。

ブロック4つが一点で接するように接合された状態を1クラスと呼ぶ(図3(a))。1クラスタの接合部の中心と、各ブロックの接合に使っていないもうひとつの接合部の中心を結んだものを軸Aと定義する(図3(a)紫)。1つのクラスタを見たとき、軸Aの端点のうち接合部でない方の4つは、正四面体の頂点にあたる。この時にできる四面体をクラスタに内接する四面体とよぶ。この四面体の辺に当たる線分を軸Bと呼ぶ(図3(a)青)。また、クラスタに内接する四面体の、向かい合う2辺の中点同士を結んでできる3本の軸を軸Cと呼ぶ(図3(a)緑)。

これらの複数の軸に対してさらにひとつずつIDを与える。まずブロック1,2,3,4からなるクラスタに対して、軸Aはそれぞれのブロックに対応してA1,A2,A3,A4の4本ある。軸Bはブロックのペアに対応して、B1-2, B1-3, B1-4, B2-3, B2-4, B3-4の6本ある。軸Cはブロックを二つのペアに分割する組み合わせに対応しC12-34, C13-24, C14-23の3種類存在する。

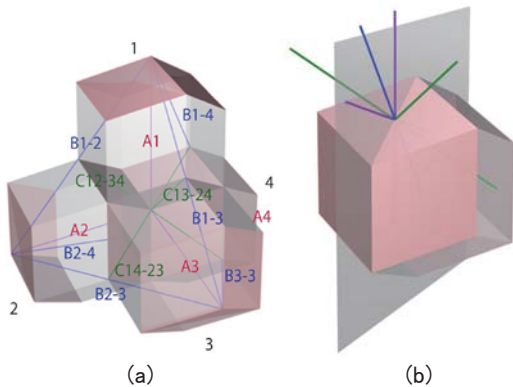


図3. (a)クラスタに内接する四面体構造と軸
紫:軸A、青:軸B、緑:軸C

(b)ブロック1におけるブロック2への接合菱形面からみた、A1,A2、B13-24、B14-23、C1-2軸の関係

4. 接合方式と軸の関係

ブロックの繋がり方(分解され方)を下記の3種類に分類すると、前節で定義した3種類の軸と対応する。ブロック1におけるブロック2との接合面において引き抜きに関係ある軸は5軸存在する。菱形の中心から法線方向に向くC1-2と、それを中心として菱形の短い対角線(単軸)方向に傾いたA1,A2と、長い対角線(長軸)方向に傾いたB13-24、B14-23とからなる(図3(b))。

1ユニットから1つのブロックが、他の3つのブロックの接合に影響を与えずに取り外される場合を3-1タイプと呼ぶ。3-1タイプでは軸Aが関連する。ブロック1と2の間の菱形面のジョイントでは、軸A1とA2に沿った引き抜きを考慮する必要がある。

1ユニットをブロック2つずつのペアに分けて、残りの接合に影響を与えずに取り外すことができる場合を2-2タイプと呼ぶ。2-2タイプは軸Cと関連し、ブロック1,3のペアと2,4のペアを取り外すとき、軸C13-24に沿った動作を考慮する必要がある。

1ユニットが分解される時、すべてのブロックを同時に対称に引き抜く場合を1-1-1-1タイプと呼ぶ。1-1-1-

1タイプは軸Bと関連し、ブロック1とブロック2の間の菱形面のジョイントでは、B1-2に沿った引き抜き動作を考慮する。

また、3-1タイプと2-2タイプや、1-1-1-1タイプと2-2タイプなど、一つの種類のブロックで複数の接合方向を組み合わせることもある。

5. ジョイント構造の基本条件

接合方向の議論を用いて、ブロックに施す凹凸がジョイントとして機能するための条件について述べる。

まずは凹凸の対称性に関する条件であるが、ブロックが雌雄の別なく繋がるために、かつ繋いだ時に凹凸同士がぴったり合わさり隙間ができない必要がある。隣り合う菱形十二面体どうしの関係は、ジョイント面となる

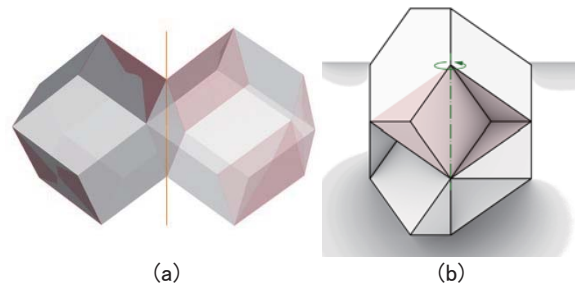


図4. (a)菱形の短軸に対する180°回転コピー (b) ジョイントを正面から見た図。凹凸が短軸に対し180°対称

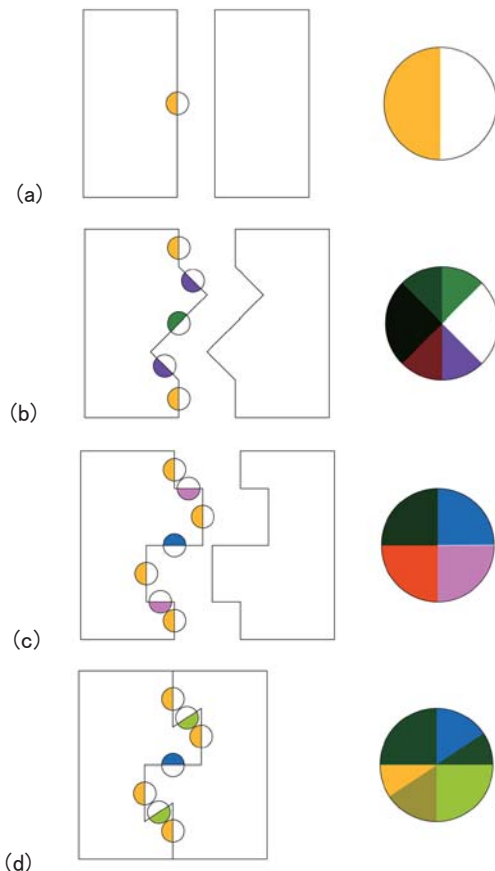


図5. (a) 単純な突合せは、半円すべての方向に引き抜き可能。(b)複数の傾きの辺を共有すると、制限される領域が拡大し、引き抜き可能方向(白)が減る。(c)引き抜き方向が半直線に制約され、1自由度の引き抜きが可能。(d) 引き抜きが不可能。

菱形の短軸を軸とした 180° の回転コピーで表されるから、ジョイント表面の凹凸が単軸周りで 180 度回転対称であることが必要条件である(図 4)。一方 6.1 節で示すように、長軸周りの 180° 回転を用いるとダイヤモンド格子ではなく、菱形十二面体の完全充填の接続関係となる。

次に、凹凸が組み外し可能な条件を考える。今回は並進によって引き抜く(組む・外す)ことを考える。すなわち方向は一定で引き抜く動作の途中で変わらないものとする。組んだ状態から引き抜くことが幾何的に可能であれば、再び組むことも可能であるはずなので、ここからは、基本的に組まれた状態から部材を引き抜く動作について述べる。ここで、引き抜く方向を制限した方が動きに遊びがなくしっかりした接合になると言える。

遊びの有無や量を理解するため、まず、2 次元平面において、2 枚の板が組み外し可能な条件について考える。図 5 のように、板に凹凸がつくと、板の引き抜き可能な向きが制限される。付き合わせたそれぞれの辺によって、引き抜き可能な方向が半円に制限される。いくつかの傾きの辺で付き合わされると、それらの制限空間の和集合が、ジョイント全体の制限を表す。図 5 の円における白い領域が制限される空間の補集合であり、ジョイント全体が引き抜き可能な方向を表す。

引き抜き可能かつ引き抜き方向を一つに制限するには、図 5(c)のように、斜線で塗られていない方向が一つだけに定まるようにすれば良い。

これを3次元平面に拡張して考える。つまり、ジョイントの辺が平面に拡張され、引き抜き可能な半円が半球になる。半球の集合を考え、引き抜き可能な範囲を最小限に設計することで組み合わせの強度や、組み合わせ時のしっくり感が生み出される。

6. ジョイント設計

ここでは、前述の条件を用いて設計した具体的なブロックを紹介する。

6.1. 1-1-1-1 タイプと 2-2 タイプ

4 ピースが同時に組み合わせる 1-1-1-1 タイプを考える。すべてのピースが対称に組み合わさる動きを仮定すると、引き抜き方向は B 軸に平行なベクトルとなる。ブロック 1,2 の間では軸 B1-2 となる(図 6(a))。

ブロック 1-2 間の菱形を垂直な B1-2 軸から見る。5 節で述べた対称性の条件に基づき、菱形に短軸に対して左右対称な図形を描き、この図形を引き抜き方向に前後に押し出すことでジョイント形状を得た。本設計では、さらに長軸に沿っても対称な図形としている(図 6(b))。

ただし、この立体は、ソリッドが稜線で接する部分が現れる。これは、3D プリントなどの製作機械での製造性や強度などを考慮すると望ましくない。そこで、線で接するソリッドを解消するように凹凸を適切にトリムしたものが図 6(c)のジョイントである。なお、3D プリント時はこのモデルに嵌合用の適切なオフセットを加える。

このジョイントは長軸に沿った対称性も持つため、図 6(d)の標準的な組み方のほか図 6(e)のようにも組むことができる。図 6(e)の組み方をした場合、空隙が生まれず、空間すべてが充填する。このように複数の回転対称性を持つことで組み換え可能となる性質は河合継手[4]と同等の性質である。

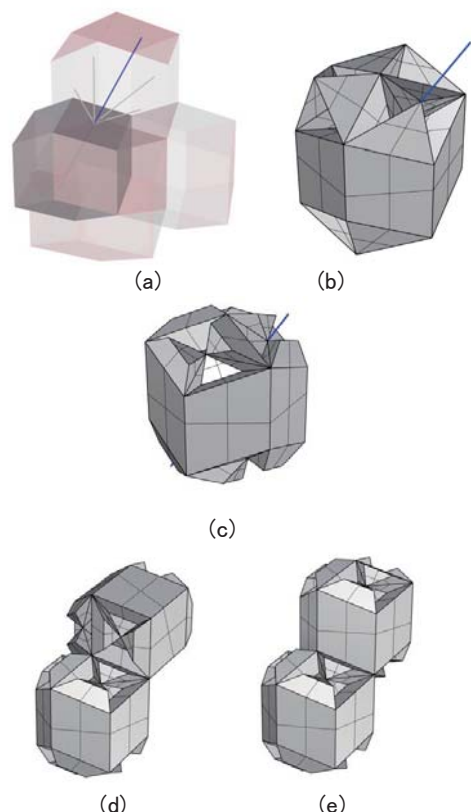


図 6. 1-1-1-1 タイプの設計。(a)軸 B を用いた引き抜きを考える。(b)ジョイントの形状。短軸周り 180 度の回転対称性をもつ。(c)立体が接する稜線を取り除いたもの(d)通常の組み方(ダイヤモンド)(e)異なる組み方(完全充填)

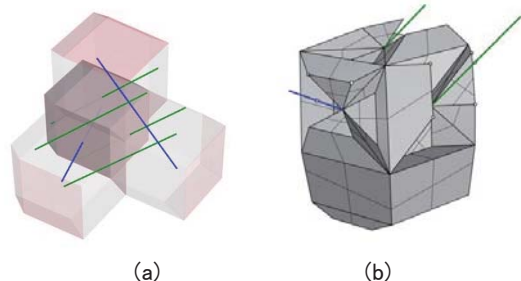


図 7. 2-2 タイプへの改良。(a)引き抜きに用いる軸 B と軸 C (b)実際のジョイント形状。

しかし、7 節に述べるように、この組み方だと多数のブロックを組み合わせるときに不便である。そこで、このモデルを改良して 2-2 タイプを設計した。ペアに分離するために、引き抜き方向の軸を図 7(a)のように変更する。すなわち、クラスタをブロック 1,2 のペアと 3,4 のペアに分け、それぞれのペア内のジョイントは従来通りの軸 B 1-2, B3-4 で接続し、ペア同士のジョイントには軸 C 12-34 での接続となるように押し出し方向を設計する(図 7)。このようにすると、ひとつの点に集まる 3 つのジョイント面の形が全て異なるが、1-1-1-1 タイプに比べて組むのが容易なブロックができる。

6.2. 3-1 タイプ

3-1 のジョイントでは、1 クラスタから 1 つブロックを引き抜くことができる。この時のジョイント面に対する引き抜きベクトルは、そのブロックが引き抜かれた方であった場合とそうでない場合を考える。すなわち、ブロック 1 と 2

の間であれば、A1,A2 に沿ったベクトルの双方で引き抜きが可能でなければならない(図 8(a))。そこで、引き抜き方向をこの 2 本のベクトルの間に張られる平面内に制限したブロックを考える。これが図 8(b)のブロックである。紫色の範囲がブロックの引き抜き可能な方向となる。しかし、これは図のブロックと同様に、線で接する面が存在してしまうため、ファブリケーションには向かない。このブロックを、条件を緩めてファブリケーションしやすくしたものが図 9 である。これは、2 つを組み合わせるときに引き抜き方向が平面に制限されない。オレンジ色の空間が引き抜き可能な範囲である。

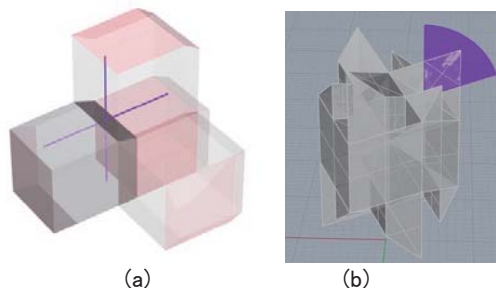


図 8. 3-1 タイプ (a)2 つの引き抜き方向 A1,A2 と(b)A1,A2 で張られる平面でのみ引き抜き可能なジョイント(3)条件を緩めた 3-1 タイプ

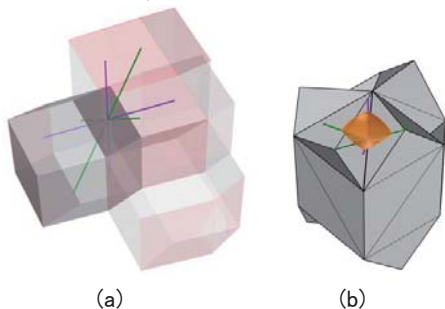


図 9. 3-1/2-2 タイプ (a)引き抜き方向。(b)ブロック

6.3. 3-1/2-2 タイプ

最後に、3-1 タイプ、2-2 タイプどちらでも組み外しできるブロックを考える。この時、ブロック 1,2 に対して引き抜きベクトルは、A1,A2,C13-24,C14-23 の 4 つになる(図 9(a))。これにより設計されたのが図 9(b)のブロックである。引き抜き方向の制限が緩いため、安定感は少ないが、積み木のように積んでいくことができる。

7. 全体組み立てプロセス

これらの 3 種類のブロックで、全体を組み立てるプロセスを考える。1-1-1-1 タイプでスポンジ多面体を構成するには、すべてのブロックを同時にはめ込む必要があり、非現実的である。しかし、4 つ同時にはめ込む操作を再帰的に行うことで、シェルピンスキー四面体のようなフラクタル構造を構成することが可能である(図 10)。

2-2 タイプは、1-1-1-1 タイプでのジョイントを用いて線材を構築し、それらの線材を 2-2 タイプのジョイントで縦横縦横と交互に組むことでスポンジ多面体を構成することができる(図 11)。

3-1 タイプは、緩い組み方であるが、一つずつ積むことができる。重力と引き抜き方向の関係から、最下段の摩擦が十分にあれば安定し、高い自己整列性[5]を持つ(図 11)。

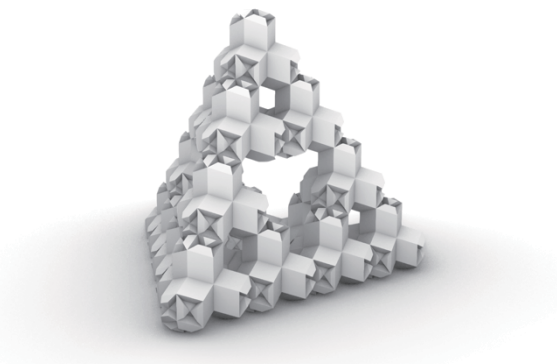


図 10. 1-1-1-1 タイプを再帰的に組んだ形状



図 11. 2-2 タイプを直線状に接続して、縦横に組んだ形状

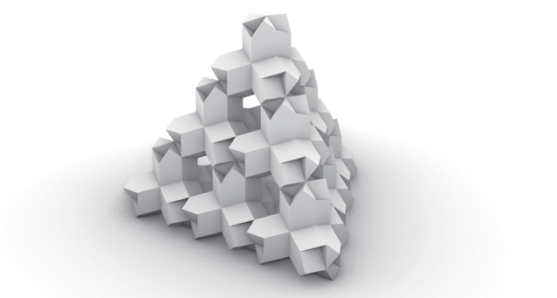


図 12. 3-1 タイプを積み重ねた形状

参考文献

1. A. Papadopoulou, J. Laucks, S. Tibbits, From Self-Assembly to Evolutionary Structures, Architectural design, 87(4), pp.28-37, 2017
2. 宮崎興二, “多面体百科”, 丸善出版, 2016
3. H. A. Schwarz, Gesammelte Mathematische Abhandlungen, Springer, Berlin, 1933.
4. 河合直人, “3 方向に継げる継手 : 河合継手の発想と概要”, 建築の研究 (248), pp. 7-11, 2019
5. 関島慶太「Fab3.0 素材のデジタル化へ向けてー Kelvin Block の組み立て分解による三次元造形システムの開発」慶応義塾大学修士論文, 2016

食品 3D プリンタの材料押し出しスクリューの形状最適化

Optimization of Material Extrusion Screw Shape for Food 3D Printer

一森 湧¹, 渡邊 洋輔², エムディ ナヒン イスラム ジブリ², アジット コースラ²,
小川 純², 川上 勝², 古川 英光²

Izumi ICHIMORI¹, Yosuke WATANABE², MD Nahin Islam SHIBLEE², Ajit KHOSLA²,
Jun OGAWA², Masaru KAWAKAMI², 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】

近年,食品の 3D プリンティングに関する研究が数多く報告されているが,殆どの場合,シリンジポンプ方式が用いられており,吐出の細かい制御や,高粘度食材の吐出には向いていない.その点でスクリュー押し出し方式が吐出法としては優れているが,それでも食品の粘度によっては,吐出できなかったり,吐出性能に差が生じたりする可能性がある.

スクリュー方式の吐出において,吐出可能な材料粘度範囲や,材料粘度がおよぼす吐出性能への影響は,スクリューの形状が深く関係していると思われる.本研究では,スクリューの最適な形状を検討し,幅広い粘度の食材の吐出を可能とし,粘度による吐出量の影響が少ないスクリューを設計することを目的とする.本発表では,食品の粘度とスクリューのピッチ幅の関係に焦点を当て,3D プリンタで作成した様々なピッチ幅のスクリューで,様々な粘度の食品材料の吐出試験を行い,スクリューの形状と材料の粘度,吐出量の関係を調べたので報告する.

キーワード: 食品 3D プリンタ, スクリュー, 流体シミュレーション, 押し出し装置

【Abstract】

In recent years, many studies on 3D printing of food have been reported, but in most cases, the syringe pump method is used, which is not suitable for fine control of ejection or ejection of high-viscosity food materials. In this respect, the screw extrusion method is superior as a dispensing method, but even so, depending on the viscosity of the food, it may not be possible to extrude or there may be a difference in extrusion performance.

In the screw type extrusion, the range of material viscosity that can be dispensed and the effect of material viscosity on the dispensing performance are thought to be deeply related to the shape of the screw. The purpose of this study is to investigate the optimum shape of the screw and to design a screw that can dispense food materials with a wide range of viscosities and that is less affected by viscosity. In this presentation, we focus on the relationship between the viscosity of food and the pitch width of the screw. We report on the relationship between the shape of the screw, the viscosity of the material, and the discharge volume by conducting discharge tests of food materials of various viscosities with screws of various pitch widths created with a 3D printer.

Keywords: 3D, food 3D printer, screw, Fluid Simulation, extruder

1. 序論

近年,食品 3D プリンタへの関心が高まっており,様々な食品を造形できる食品 3D プリンタの研究が盛んに行われている.我々の研究室ではスクリュー方式の食品 3D プリンタを利用しているが,食品によっては吐出が難しかったり,安定しなかったりすることがあり,これがスクリュー方式の課題と感じている.造形される食品はそれぞれ粘度などの物性が異なるため,スクリューの吐出性能は食品の性質に影響を受けていると考えられる.様々な食品の造形を可能にするためには,食品の物性とスクリュー形状の関係を調査し,適切なスクリュー形状を見つけることが必要と考えた.

本研究ではスクリュー方式の食品 3D プリンタと 3D プリンタで試作したスクリューを用いて様々な粘度の食品の吐出試験を行うとともに,ANSYS Fluent を利用して流体シミュレーションを行い,食品粘度と吐出量の関係を

検証する.

2. 実験

2-1. 実験装置

本実験では,世紀株式会社製の 3D フードプリンター FP-2500(図 1)を使用した.このスクリューの制御には制御ソフト(pronterface)を使用した.

吐出試験は,ピッチの異なる 3 種類のスクリューを作成し,FP-2500 に取り付けて吐出試験を行った(図 2).各スクリューのパラメーターを表 1 に示す.ピッチ以外の外径などのパラメーターはすべて同じである.このスクリューはナノダックス社製のガラス繊維強化フィラメント(図 3)を用いて,3D プリンタ(Ender3-pro)で作成した.試料の粘度測定には Anton Paar 社の MCR302 を使用した.

表 1 各スクリューのパラメーター

スクリュー名	ピッチ
スクリュー1	14mm
スクリュー2	10mm
スクリュー3	7mm
付属スクリュー	10mm



図 1 食品 3D プリンタ FP-2500



図 2 作成したスクリュー



図 3 ナノダックス製 ガラス繊維強化 PP フィラメントと 3D プリンタ(Ender3-pro)

2-2. 試料

本研究では、これまでに吐出したことのある試料の中から粘度の異なる 3 種類の試料(表 2)を用いて吐出試験を行った。レオメーターによる各試料の粘度測定結果は図 4 のようになった。

表 2 試料

試料番号	材料
1	ムースアップ 9g, 精製水 100ml
2	α 米粉 50g, 精製水 125ml
3	米粉 22.5g, 寒天 3g, 精製水 220ml

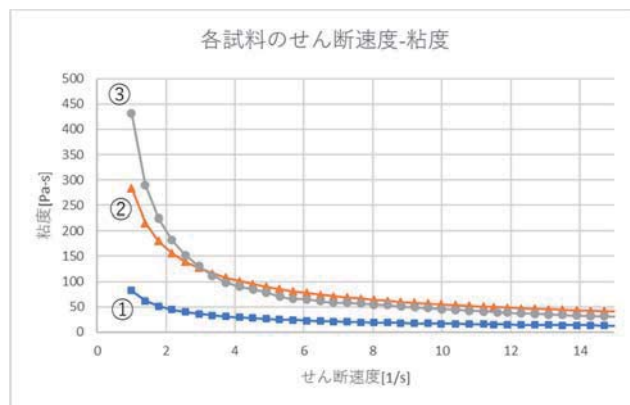


図 4 試料の粘度測定結果

2-2. 実験方法

はじめに、3D プリントしたスクリューが吐出試験に適しているか確認するため、FP2500 付属の金属製スクリューと 3D プリントしたスクリューで吐出量の比較を行った。付属のスクリューと同じ寸法でスクリューを印刷し、試料②を用いて吐出試験を行った。金属と 3D プリントスクリューを 60rpm で 20 回転させ、それぞれ 12 回吐出量測定を行い、平均と標準偏差を算出した。吐出試験の結果を表 3 に示す。この結果より、3D プリンタで作成したスクリューは吐出試験に使用できると判断した。



図 5 金属スクリューと 3D プリントスクリュー

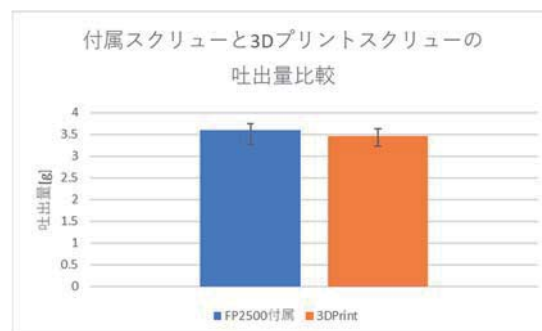


図 6 金属スクリュー(左)と 3D プリントスクリュー(右)の吐出量比較

吐出試験は、3D プリンタで作成したピッチの異なる 3 種類のスクリューを FP2500 に取り付け、回転速度 6, 12, 60rpm でスクリューを 20 回転させ、吐出量を測定した。吐出量は各条件で 5 回測定し平均を算出した。

3. 結果と考察

吐出試験の結果を以下の図に示す。

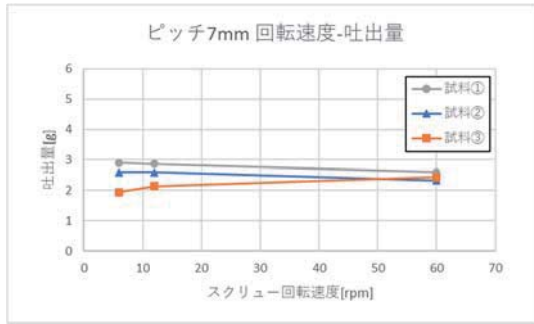


図 7 ピッチ 7mm での吐出試験結果

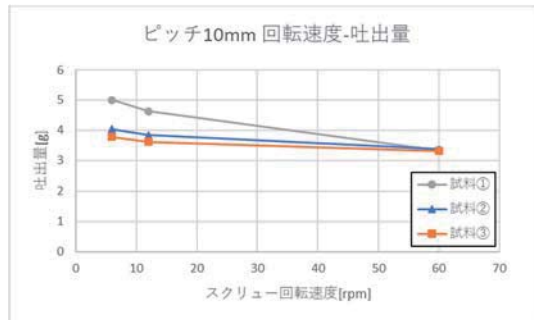


図 8 ピッチ 10mm での吐出試験結果

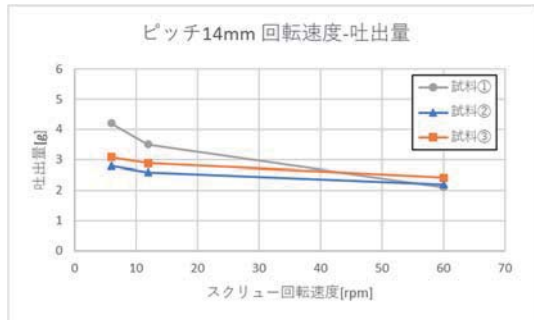


図 9 ピッチ 14mm での吐出試験結果

各スクリーを比較すると、図 7.8.9 より、ピッチ 10mm での吐出量がいずれの条件においても多いという結果となった。

スクリー回転速度と吐出量の関係を見ると、スクリー回転速度が速くなるほど吐出量が減少する傾向がみられる。これは、回転によりスクリーと壁の間でせん断速度が高くなることで、隙間から逆流してしまうことが原因と考えられる[1]。特にピッチ 10mm と 14mm で吐出した際の試料①で吐出量の減少が大きい。

ピッチ 7mm の場合は、回転速度による影響が少ないといえる。逆にスクリーのピッチが大きいくほど、吐出量が回転速度の影響を受けやすいといえる。

次に、粘度と吐出量の関係を見るため、スクリー部におけるせん断速度を求める。シリンダー直径 D 、スクリー回転速度 N 、スクリーの溝深さ H とすると、スクリー部において試料に与えられるせん断速度は次式で表さ

れる[2]。

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{H}$$

この式にスクリー外径 D 19.7mm、回転数 N 、溝深さ H 5.85mm を当てはめるとそれぞれの回転速度におけるスクリー部のせん断速度が求められる。以下の表にスクリー回転速度とせん断速度の関係を示す。

表 3 スクリュー回転速度とせん断速度

回転速度	6rpm	12rpm	60rpm
せん断速度	1.06	2.12	10.6

表 3 より、スクリー回転速度と粘度の関係を求めると表 4 となる。

表 4 スクリュー回転速度と粘度

	6rpm	12rpm	60rpm
試料①	77.78	48.65	16.36
試料②	273.9	166.1	51.95
試料③	402.9	200.6	39.73

表 4 の値を用いると、各スクリーにおける粘度と吐出量の関係は図 10, 11, 12 のようになる。

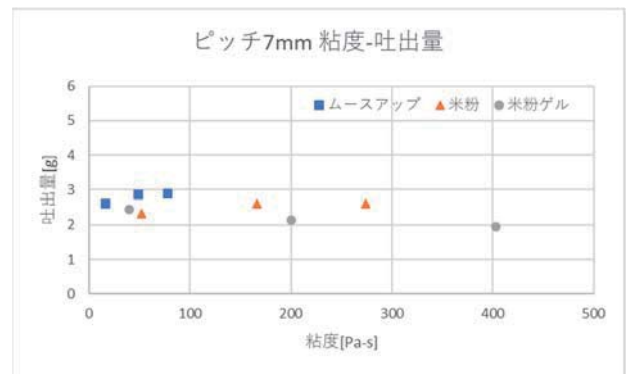


図 10 ピッチ 7mm スクリューの粘度-吐出量の関係

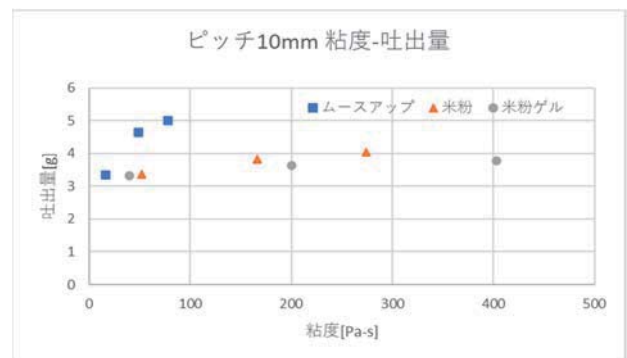


図 11 ピッチ 10mm スクリューの粘度-吐出量の関係

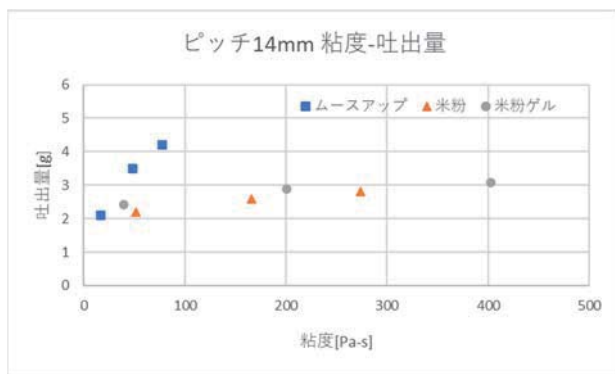


図 12 ピッチ 14mm スクリューの粘度-吐出量の関係

図 10,11,12 を比較するとピッチ 7mm では粘度が変化しても吐出量は大きく変化しないことが分かる。

今回使用したスクリューの中で最もピッチが小さいピッチ 7mm のスクリューでは、吐出量が回転速度や試料の粘度に左右されにくく、安定した吐出ができることが分かった。

4. 結言

今回の結果より、ピッチが小さいスクリューでは吐出が安定することが分かったが、吐出量がピッチ 10mm の結果と比較して少ないため、実際の造形に利用できるか確認する必要があると感じた。

今回は、これまでに吐出したことのある材料の中から粘度の異なる 3 種類の試料を選択し、主に吐出の安定性について調査した。今後は、これまでに吐出できなかった試料等を用いて、スクリューの吐出可能な粘度の範囲を調査し、より幅広い粘度の試料を吐出できるスクリューの設計に繋がたいと考えている。

参考文献

1. Chao-Fan Guo, Min Zhang, “A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation”, Computers and Electronics in Agriculture (2019), pp.397-404.
2. <https://www.hasl.co.jp/kajiwara2015.pdf>(accessed 2021/9/17)

造形可能な溶液粘度領域の拡張を目指した 3D ゲルプリンタの開発

Development of a 3D gel printer to extend the range of solution viscosities that can be printed

櫻井 佑真¹, 渡邊洋輔², 川上 勝², エムディナヒン イスラム シブリ², 小川 純²,
アジット コースラ², 古川 英光²

Yuma SAKURAI¹, Yosuke Watanabe², Masaru KAWAKAMI², MD Nahin Islam SHIBLEE², Jun OGAWA²,
Ajit KHOSLA², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部

²山形大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University

²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

これまで、高分子ゲルを造形するためには、主に型を用いたプロセスが必要であった。型の利用は、造形物の形状に制限を与える。我々は高分子ゲルの自由な形状を造形可能にするために、光硬化型の3D ゲルプリンタを開発した。本研究では、造形可能なゲルの溶液粘度領域を拡張した 3D ゲルプリンタを開発する。装置の振動の影響が大きい低粘度溶液においては、振動を抑制するためモータの静音化、防振対策、及び造形条件の検討を行った。高粘度溶液においては、遅い溶液の流れを考慮した造形ステージの動作を検討した。

キーワード: 3D ゲルプリンタ, 振動, 溶液粘度

【Abstract】

To form polymer gels, a mold-based process is mainly required. The use of molds limits the shapes of the objects. We developed a light-curing 3D gel printer to enable the fabrication of polymer gels in any shape. In this study, we develop a 3D gel printer that extends the solution viscosity range of the moldable gel. In the case of low-viscosity solution, where the vibration of the machine has a large influence, we investigated the quietness of the motor, the anti-vibration measures, and the molding conditions in order to suppress the vibration. In the case of high viscosity solution, the motion of the modeling stage was examined considering the slow flow of the solution.

Keywords: 3D Gel Printer, Vibration, Solution Viscosity

1. 序論

高分子ゲルは、高分子鎖のネットワーク内に溶媒をため込んだ物体や状態のことを指す。高分子ゲルは、広範な弾性率の調整が可能であり、生物のような柔らかい動きや表面を模倣するソフトロボットに適した材料といえる。

高分子ゲル材料は、硬化前の溶液(プレゲル溶液)の組成や硬化手法によって、硬化後の物性を調整することができる。より柔らかいゲルを造形するには、プレゲル溶液において、溶媒の量と比較してゲルの骨格となる成分の量を少なくするとよい。水を溶媒としたハイドロゲルにおいては、骨格成分の減少とともに、プレゲル溶液の粘度も減少する。

硬化後のゲルの物性を調整しやすい硬化手法としては、光硬化が挙げられる。光硬化では、光を照射すると重合反応を開始する光開始剤を使用する。光開始剤が含まれたプレゲル溶液に対して光の照射強度を調整することで、硬化後の弾性率を制御できる。この仕組みを利用して、我々は 3D ゲルプリンタを開発した。3D ゲルプリンタは、プレゲル溶液の液面に対して、レーザー光

源を走査し、任意の位置で硬化させることで、三次元の構造体を造形することができる。

これまで、高粘度のプレゲル溶液を用いると、硬化後の弾性率が大きくなるものの、3D ゲルプリンタの造形精度が低下することを報告している。一方で、低粘度のプレゲル溶液を用いた際は、どのような因子が重要であるか未検討であった。

本研究では、造形可能なゲルの溶液粘度領域を拡張した 3D ゲルプリンタの開発を行う。特に、低粘度の溶液では、装置の振動の振動による液面の揺れが造形精度に影響を与えることが推察される。そこで、振動を抑制するためモータの静音化、防振対策、及び造形条件の検討を行った。一方で、高粘度溶液においては、造形する液面に、安定してゲル溶液を供給できるかということが、造形成功の鍵となっている。そこで、高粘度溶液を考慮したステージの動作方法としてオーバーディップを採用した。オーバーディップと造形精度の関係について報告する。

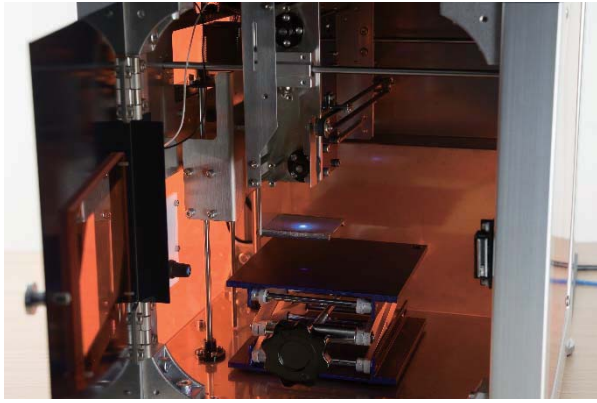


Fig.1 3D Gel Printer "Gel PiPer"

2. 装置の説明

本研究では、我々が開発した Gel PiPer という 3D ゲルプリンタを用いた。図 1 に示すように、プレゲル溶液に対して任意の位置で 405nm の光を照射し、3 次元構造を造形する。スポット径は 0.3mm である。造形ステージはステンレス製の金網を用いている。

図 1 に Gel PiPer の外観を示す。

3. 振動実験と造形

本研究では、デジタル表示式振動計デジバイプロ Model-1332A を用いて振動を計測した。図 2 のように振動計のセンサー部分を両面テープでステージ部分に取り付けて変位 DISP[mm(P-P)]を計測した。計測の際、コネクタアクセサリ BNC-2120 を用いて PC に接続し、Igor.pro の wave scan 機能を用いて振幅を求め、フーリエ変換を用いて振動数を求めた。今回は、3D プリンタで広く用いられている安価なモータドライバである A4988 (HiLetgo 製)と、静音化モードを有するモータドライバ TMC2208 (BIGTREETECH 製)における振動を比較した。造形スピードは、5mm/s, 10mm/s, 20mm/s とした。

造形する材料は、ICN(Inter-crosslinking Network structure)ゲルを用いた。表 1 に ICN ゲルの組成を示す。モノマーとして DMAAm(N,N-Dimethyl acrylamide)、ポリマーとして HPC(Hydroxypropyl Cellulose)、架橋剤として KarenzMOI-EG (2-(2-methacryloyloxyethoxy)ethylisocyanate)、光重合開始材として波長 405nm に吸収ピーク波長を持つ TPO (Diphenyl (2,4,6-trimethyl benzoyl) phosphine Oxide)、印刷精度向上のための吸収剤として AS-150(Benzenesulfonic acid, 2, 2'-(1,2-ethenediyl)bis[5-[4-methoxy-6-(phenylamino)-1, 3, 5-triazin-2-yl]amino]-, sodium salt(1:2)), 溶媒として精製

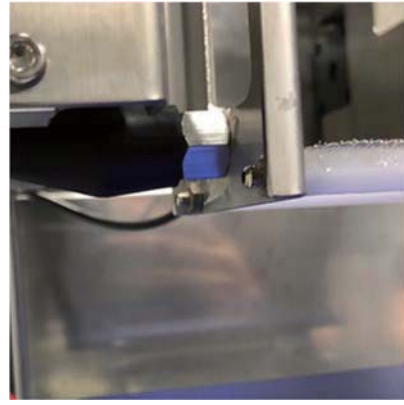


Fig.2 Mounting vibrometer sensor

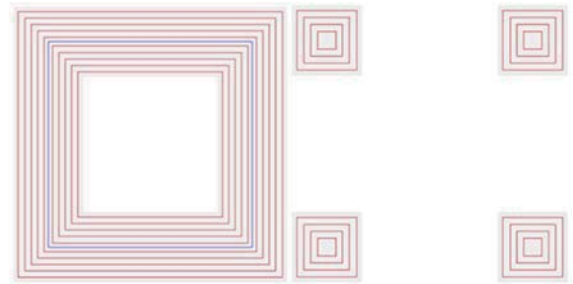


Fig.3 Moulding Path

水を使用した

また、ICN ゲル溶液調整後に、HPC を再度加えることでプレゲル溶液の粘度を調整した。表 1 に示した組成に HPC を加えて粘度を変更した溶液を作成し、0wt%, +0.1wt% で造形物の比較を行った。粘度は EMS-1000 で測定を行った。0wt%, 0.1wt% を加えた際のプレゲル溶液の粘度はそれぞれ 25.2mPa・s, 40.0mPa・s であった。

また、本研究では、オーバーディップ動作が造形物に与える影響について調査した。高粘度溶液の場合、溶液が流れないことで造形ステージに溶液が供給されないことがある。オーバーディップ動作は、次の層を造形する前に余分にステージを沈ませ、ステージの上に溶液を満たす動作を指す。実際には、各層が造形される前にオーバーディップの動作となる G-code を差し込むことで、動作を実現させた。これまでの実験と同様に各スピードでの造形と、溶液の粘度を変更した際の造形物の評価を行った。この時、モータドライバを A4988 とした。

4. 造形物の評価方法

本研究では、10mm x 10mm x 10mm の立方体の中を

Table 1 Composition of ICN gel

Monomer [Mol/L]	Polymer [Mol/L]	Cross-linker [Mol/L]	Initiator [Mol/L]	Absorber [wt%]
DMAAm	HPC	Karenz	TPO	AS-150
4.0	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-1}

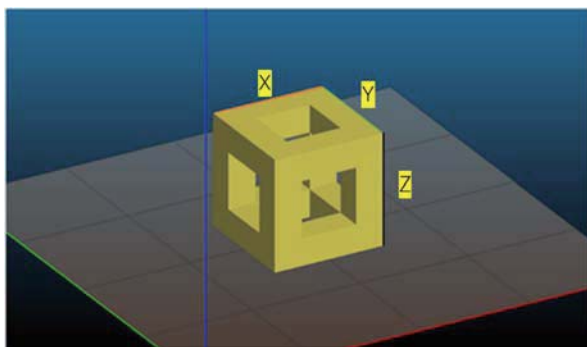


Fig.4 Hollow cube

くり抜いた格子状の構造体を造形した。中の中空部分は、5mm x 5mm である。形パステータを図 3 に示す。造形物は顕微鏡 (OLYMPUS 社 SZ2-ILST) で撮影し、その後、ImageJ を用いて造形物の大きさを確認した。図 4 に造形物と、造形物内で測定した三箇所を示す。また、STL ファイルで作成した設計データとの差分率を理論値 X_i 、実験値 X_e とした時の差分率 $a_0 = (X_e - X_i) / X_i * 100$ により求め、グラフ化した。今回は一部の造形条件でステージの下部に硬化したゲルが見られた。今回はそのような光の突抜による余分なゲルの効果についての測定は考慮していない。

5. 結果及び考察

まず、モータドライバによる振動数の比較を行った。モータドライバ A4988 において、造形スピードを 5mm/s, 10mm/s, 20mm/s として振動を測定した。造形スピードが大きくなるにつれて、縦軸の振幅の最大値は大きくなる傾向が見られた。これは TMC2208 でも同様の傾向が見られた。また、TMC2208 と A4988 における振動測定の結果を図 5 に示す。図 5 の縦軸は振幅を示し、横軸は周波数を示しており、赤色が TMC2208、黒色が A4988 を示している。TMC2208 と A4988 を比較したところ、振幅が最大となる振動数及び振幅の最大値はほぼ同じ値であった。以上よりモータドライバの変更による振動の影響は小さいことが分かった。

各条件における造形物の差分率についてのグラフを図 6 に示す。モータドライバを変更した際の造形物の差分率は大きく変化しなかった。X 方向と Y 方向は造形スピードが速くなるにつれて差分率は減少した。これはスピードが速くなるにつれて、造形に適した照射光量になっていることがわかる。なお、Z 軸の差分率はスピードの変化によらず、ほぼ一定の値だったので、図 6 に示していない。

次に、粘度と造形精度の影響について調査した。HPC を 0.1wt% 加えて粘度を増加させた溶液での各条件における造形物の差分率を図 7 に示す。HPC を加えて粘度を変更する前後で差分率の大きな変化は見られ

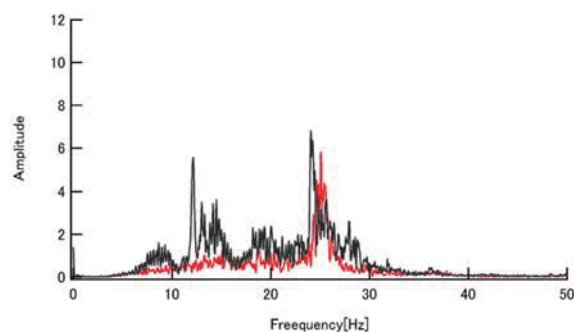


Fig.5 Vibration at Print speed 10mm/s

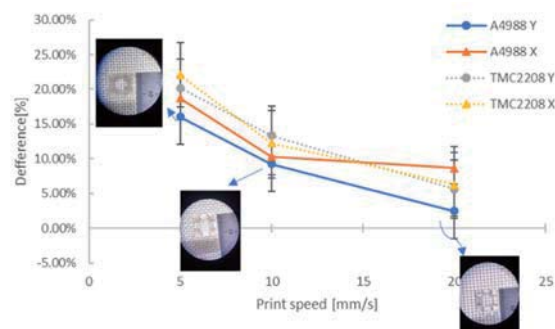


Fig.6 Evaluation of objects (HPC+0wt%)

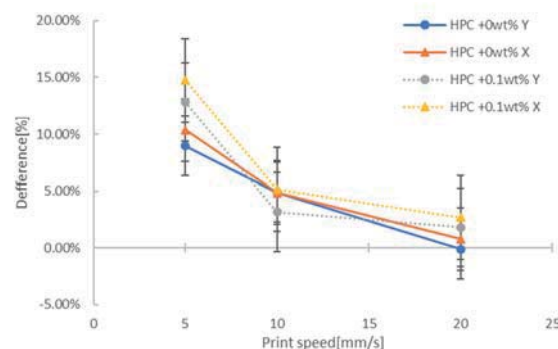


Fig.7 Evaluation of objects (A4988)

なかった。HPC 添加なしの溶液と、0.1wt% 加えた溶液の粘度は 25.2mPa・s, 40.0mPa・s であり、造形精度に影響を与えるほどの粘度の差がなかったことためである。

最後に、オーバーディップ動作造形精度に与える影響について調査した。HPC 添加なしの溶液と 0.1wt% 加えた溶液の差分率の結果を図 8, 図 9 (次項) にそれぞれ示す。HPC を 0.1wt% 加えた溶液ではオーバーディップによる差分率は大きく変化が見られなかった。HPC 添加なしの溶液では、オーバーディップによる差分率は減少した。また、造形物を観察したところ、オーバーディップの有無によって造形物に変化が現れた。HPC 添加なしの溶液を用いた造形物の上面の写真を図 10 (次項) に示す。オーバーディップを実施した場合、各辺は直線的に造形されているが、オーバーディップ動作がない場合、波打っているような構造が見られた。低粘度帯特有の液面の揺れが、オーバーディップの動作時間によって緩和され、直線的に造形できた可能性がある。

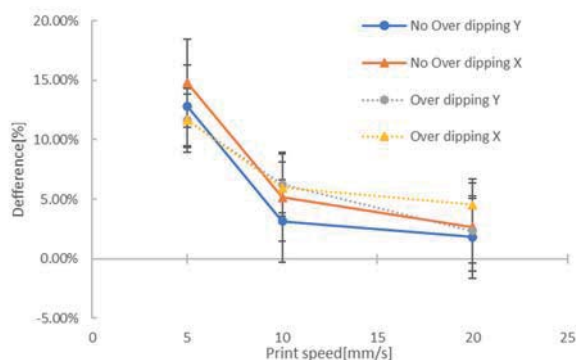


Fig.8 Evaluation of Over dipping (HPC+0.1wt%)

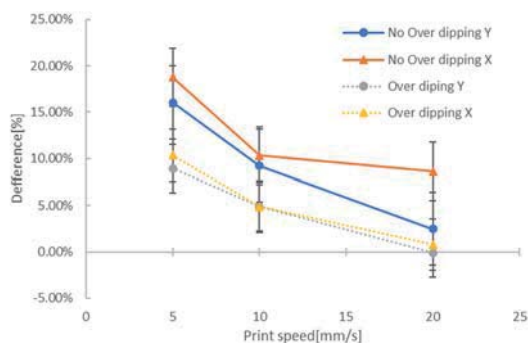


Fig.9 Evaluation of Over dipping (HPC+0wt%)

6. 結論

我々が独自に開発した 3D ゲルプリンタである Gel PiPer の溶液粘度領域を拡張すべく、25-40mPa・s 程度の低粘度 ICN ゲル溶液の造形を行った。低粘度溶液特有の液面の揺れが造形精度に影響を与えると仮定し、揺れの因子として、モータドライバや造形スピードを検討した。造形物は、設計値との差分率で評価した。造形スピードを増加させたところ、差分率が減少することが確認された。一方で、モータドライバを変更した際の差分率は大きくは変化しなかった。

また、ICN ゲル溶液に対して HPC を加えることで粘度を調整し、粘度と造形精度の影響を調査した。今回用意した溶液粘度の差は 15mPa・s 程度であり、大きな粘度の差がなかったため粘度と造形精度の影響は見られなかった。

さらに、Gel PiPer が高粘度溶液の造形を可能にするために、オーバーディップ動作について造形精度との影響を調査した。今回の調整したゲル溶液は低粘度だったため、オーバーディップによる造形精度の改善は見られないと予測していたが、オーバーディップ動作の有無によって造形精度に変化が見られた。オーバーディップ動作をする G-code は各層への造形が始まる前に行うため、オーバーディップ動作の時間が液面の揺れを低減した可能性がある。

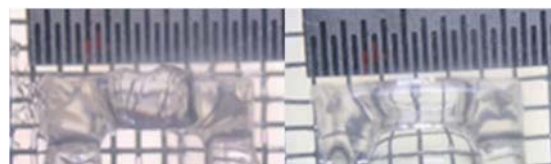


Fig.10 Over dipping or not (20mm/s)

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224、JP18H05471、JP19H01122、JP21H04936、JP21K14040、JST COI JPMJCE1314、JST OPERA JPMJOP1844、JST OPERA JPMJOP1614、ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237)、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」、「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人: NEDO) によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Ultrahigh Ductile Gels Having Inter-Crosslinking Network (ICN) Structure (2012) Go TAKADA, Ruri HIDEMA, Hidemitsu FURUKAWA
2. Development of low viscosity gel material suitable for modeling with 3D gel printer and evaluation of mechanical properties (2018) Taishi TASE, Azusa SAITO, Takafumi OTA, Kei SATO, Kyuichiro TAKAMATSU, Kazunari YOSHIDA, Masaru KAWAKAMI, Hidemitsu FURUKAWA

イオン液体ゲルを用いたキャパシタの 3D プリンティング

Capacitor of 3D Printing Used Ionic Liquid Gel

小林 竜也¹, 渡邊 洋輔², アジット コースラ², 川上 勝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

Tatsuya KOBAYASHI¹, Yosuke WATANABE², Ajit KHOSLA², Masaru KAWAKAMI²

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】

近年, 人に近い作業環境で働く, 軟らかい筐体を持った, 安全性の高いソフトロボットの需要が高まっており, ソフトロボットに用いられる電子部品自体も軟らかい材料であることが求められている. ソフトロボットの筐体の製造を3D プリンティングによって行い, 同時に, 柔らかい電子部品の製作や配線工程に 3D プリンティング技術を用いることができれば, ロボット製造の効率化, ロボットの小型化につながると期待される.

本研究では, 不揮発性, 難燃性, 優れた導電性といった特徴を持つイオン液体をベースとしたゲルを, キャパシタの電解質部材料として応用することを目的とする. 紫外光照射により硬化し, 硬化後に柔軟性や導電性を保有するイオン液体ベースの溶液を選定し, 硬化後のイオン液体ゲルの電気特性を測定し, キャパシタの電解質材料としての性能を議論する. 最後に, 光硬化型 3D ゲルプリンタを用いたイオン液体ゲルの造形の可否について検討した.

キーワード: キャパシタ, イオン液体ゲル, 電解質, 3D ゲルプリンタ

【Abstract】

In recent years, there has been a growing demand for highly safe soft robots having soft cabinet and working in a work environment close to humans, and the electronic components used in soft robots must also be made of soft materials. If the soft robot chassis can be manufactured by 3D printing, and at the same time, 3D printing technology can be used for the fabrication of the soft electronic components and the wiring process, it is expected to improve the efficiency of robot manufacturing and reduce the size of the robot.

In this study, we aim to apply ionic liquid-based gels, which have characteristics such as non-volatility, flame retardance, and great conductivity, as electrolyte materials for capacitors. An ionic-liquid-based solution that is cured by ultraviolet light irradiation and possesses flexibility and conductivity after curing is selected, and the ionic-liquid gel is fabricated. The electrical properties of the fabricated ionic liquid gels will be measured and their performance as electrolyte materials for capacitors will be discussed. Finally, we investigated the possibility of molding ionic liquid gels using a light-curing 3D gel printer.

Keywords: capacitor, ionic liquid gel, electrolyte, 3D gel printer

1. 序論

近年, サービス業, 介護といった人と触れ合う場面や人に近い環境で働く, 軟らかい筐体を持った, 安全性の高いソフトロボットの需要が高まっている. 従来のロボットは基本的には電子部品も含めて硬い材料でできている. そのため, ソフトロボットに用いられる電子部品自体も軟らかい材料で作ることが必要であり, ソフトロボットの筐体の製造を3D プリンティング技術を用いることによって, 柔らかい電子部品の製作や配線工程にも 3D プリンティング技術を用いることができれば, ロボット製造の効率化, ロボットの小型化につながると期待される.

本研究では, イオン液体をベースとしたゲルを作製する. 作成手法として, まずは型を用いた造形を検討した. イオン液体を電解質の材料として用いることは, 安

全性に優れているため電気化学デバイスとして期待されている. イオン液体の特徴として, 蒸気圧が極めて低く難燃性であり, 熱安定性が極めて高く広い液体範囲を持っている. また, イオン伝導性が高く, 極めて高いイオン雰囲気を提供し, ナノスケールで構造をつくりやすい液体である[1]. そのため, 電子部品であるキャパシタの電解質材料として用いることが可能である. イオン液体ゲルの内部抵抗値, 導電率, 静電容量といった電気特性を明らかにすることによって, キャパシタの電解質材料としての性能を議論する. 最後に, 光硬化型 3D ゲルプリンタを用いたイオン液体ゲルの造形の可否について検討した結果を報告する.

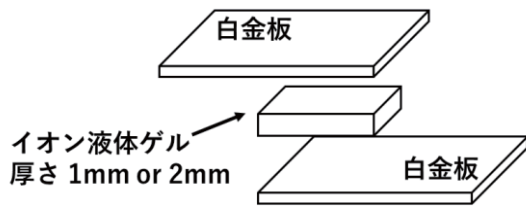


図1. インピーダンス測定及び定電流充放電測定のためのセルの構成

表1. イオン液体ゲルの組成

	materials	usage
Monomer	NDDA	0.8 mmol
Crosslinker	PTMB	0.4 mmol
Initiator	TPO	0.016 mmol
Solvent	BMImFSI	70 wt%

2. イオン液体ゲルの材料

本実験で使用したイオン液体ゲルは、チオールエン反応を用いて網目構造を構成し、内部にイオン液体を含ませて作製した[2]。イオン液体ゲルを作製するために用いた試薬は、モノマーとして 1,9-Nonanediol diacrylate(NDDA)、架橋剤として Pentaerythritol tetrakis(3-mercaptopropylate)(PTMB)、重合開始剤として Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide(TPO)、溶媒として 1-butyl-3-methylimidazolium bis(fluorosulfonyl)imide(BMImFSI)を使用した。表1にイオン液体ゲルの組成を示す。モノマーである NDDA のアクリレート基と架橋剤である PTMB のチオール基のモル比が 1:1 になるように作製した。モノマー及び架橋剤の含有量を 30 wt%とし、溶媒であるイオン液体の含有量は 70 wt%とした。

3. 電解質材料としての評価

本研究で作製した前駆体溶液を用いて 10 mm×10 mm×1 mm と 10 mm×10 mm×2 mm の大きさの穴の開いたスペーサーをスライドガラスと PET フィルムで挟み、型によってゲル電解質を作製した。このゲル電解質を白金板で挟んだセルを構成し、インピーダンス測定及び定電流充放電試験を行った。インピーダンス測定の実験条件として、2 端子法で行い、交流電流の振幅は 10 mV、測定した周波数領域は 360 kHz から 0.1 Hz である。インピーダンス測定から、各ゲル電解質のイオン液体ゲル内における等価回路をインピーダンススペクトルから予測し、導電率を算出した。今回インピーダンス測定に使用した装置は東陽テクニカ社製の solartron SI 1287 と SI 1260 である。インピーダンス測定のためのセルの構成を図1に示す。

キャパシタとしての挙動を確認するために、作製したセルを用いて定電流充放電測定を行った。また、各サンプルでの静電容量を比較し、厚さによる性能の変化を議論した。実験条件として、0.5 μ A, 1 μ A, 2 μ A

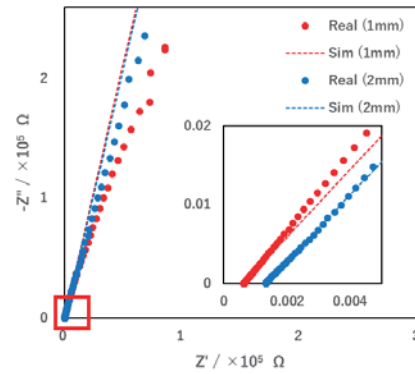


図2. 厚さ1mmと2mmのナイキスト線図

の定電流を流し、限界電圧は 0.8 V とした。今回、定電流充放電測定で使用した装置は北斗電工株式会社製の HZ-7000 である。定電流充放電測定のためのセルの構成は図1と同じである。

4. 結果及び考察

4.1 インピーダンス測定

10 mm×10 mm×1 mm と 10 mm×10 mm×2 mm のインピーダンス測定によって得られたナイキスト線図の結果を図2に示す。図中の厚さ1mmの赤線、厚さ2mmの青線は想定した等価回路を用いてフィッティングした結果を表している。図2、図3(次項)、図4(次項)から厚さ1mmと2mmのナイキスト線図とボード線図から得られるインピーダンススペクトルは似たような挙動を示していることが分かる。すなわち、図3、図4のボード線図より、高周波側では $|Z|$ は周波数に依存せずRの値は一定を示し、位相差は0であることから高周波側では抵抗のみの回路と予測できる。一方、低周波側では $|Z|$ は周波数に対して傾きが-1に近い値で減少し、位相差は-90°であることから低周波側ではキャパシタのみの回路と予測できる。低周波側と高周波側の挙動を組み合わせることにより、イオン液体ゲルの等価回路はRC直列回路であると予測できる。想定した等価回路を図5に示す。図5を下に図2のナイキスト線図から、インピーダンススペクトルの実数軸との交点が内部抵抗値Rであることが推察できる。

以上のことから、イオン液体ゲルの内部抵抗をナイキスト線図から求め、その値から導電率を算出したものを表2(次項)に示す。表2より、内部抵抗値の値は厚さに比例すると考えられる。また、同じ固体電解質である PIL-PEO の導電率と比較すると導電率のオーダーが小さく、 0.42×10^{-4} S/cm[3]であることから本実験で算出した導電率は固体電解質として使用することは可能であると推測できる。

4.2 定電流充放電測定

10 mm×10 mm×1 mm と 10 mm×10 mm×2 mm のサンプルの充放電測定の結果を図6、図7にそれぞれ示す。

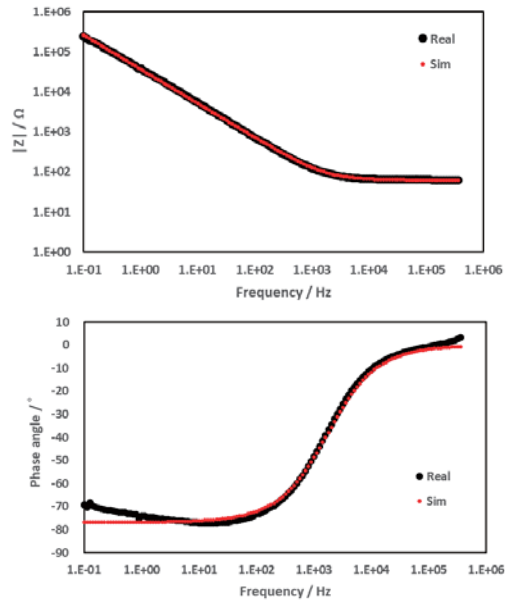


図 3. 10 mm × 10 mm × 1 mm のボード線図

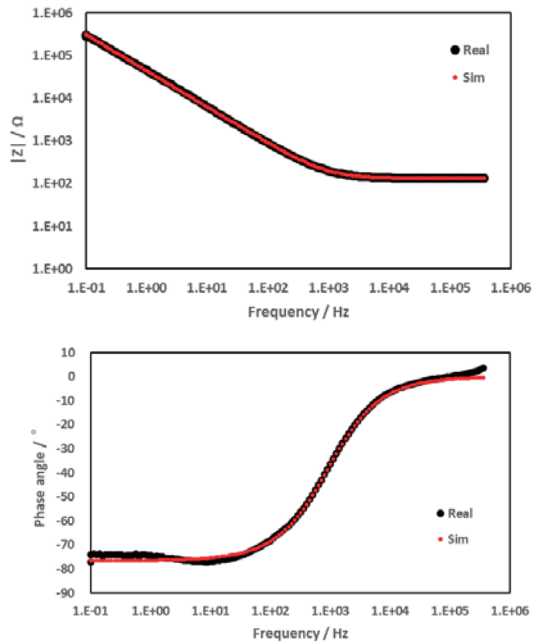


図 4. 10 mm × 10 mm × 2 mm のボード線図

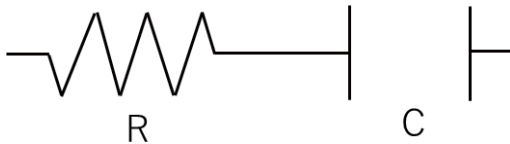


図 5. 想定した等価回路

表 2. 抵抗値と導電率

厚さ	抵抗値 [Ω]	導電率 [S/cm]
1mm	62.7	1.59×10^{-3}
2mm	132.2	1.51×10^{-3}

表 3. 厚さ 1mm の静電容量

	$0.5 \mu A$	$1 \mu A$	$2 \mu A$
充電	$28.5 \times 10^{-6} F$	$16.3 \times 10^{-6} F$	$11.7 \times 10^{-6} F$
放電	$12.6 \times 10^{-6} F$	$10.8 \times 10^{-6} F$	$9.24 \times 10^{-6} F$
クーロン効率	44.2%	66.3%	78.9%

表 4. 厚さ 2mm の静電容量

	$0.5 \mu A$	$1 \mu A$	$2 \mu A$
充電	$10.3 \times 10^{-6} F$	$6.11 \times 10^{-6} F$	$4.69 \times 10^{-6} F$
放電	$5.45 \times 10^{-6} F$	$4.58 \times 10^{-6} F$	$3.92 \times 10^{-6} F$
クーロン効率	52.9%	75.0%	83.6%

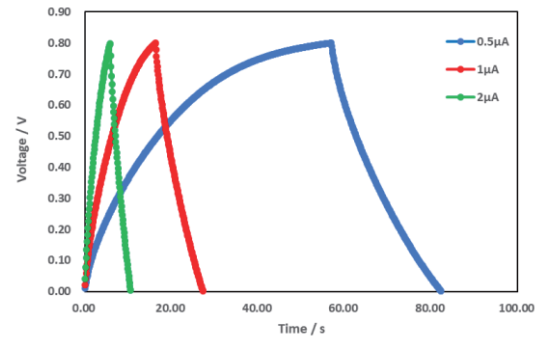


図 6. 10 mm × 10 mm × 1 mm の定電流充放電測定結果

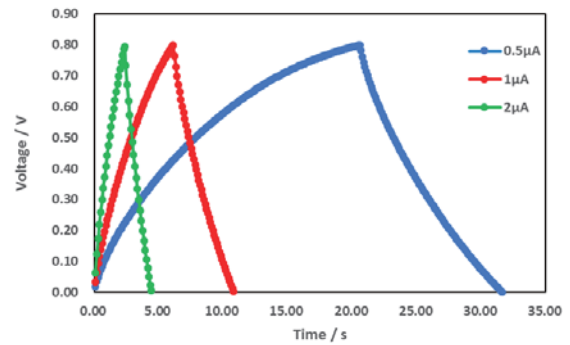


図 7. 10 mm × 10 mm × 2 mm の定電流充放電測定結果

す。また、厚さ 1 mm の各電流における充電時と放電時の静電容量についてまとめたものを表 3 に示す。同様に厚さ 2 mm についてまとめたものを表 4 に示す。図 6、図 7 から電流の値が小さくなるほど充電時の時間と放電時の時間に差が生じていることが分かる。つまり、充電時の静電容量と放電時の静電容量に大きな差異が生まれていることが分かる。表 3、表 4 から分かるように、電荷を貯める時間が長くなると限界電圧に達する前にイオン液体内の二重層を形成するイオンの数が少なくなっていると考えられる。また、厚さ 1 mm と 2 mm の静電容量を比較すると、厚さ 1 mm の方が充電時、放電時の静電容量共に値が大きいことが分かる。これは、厚さが大

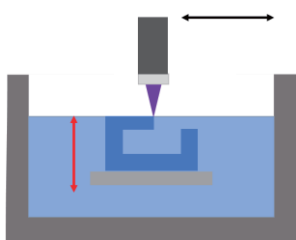


図 8. 3D ゲルプリンタの模式図



図 9. 造形結果

きいとイオン液体ゲル内のイオンの泳動がうまく行えず、二重層を形成することが難しいと考えられる。静電容量はキャパシタの性能に大きく関係するため、イオン液体ゲルを電解質として使用する場合には厚さを小さく作製することが重要であると推測できる。

4.3 3D プリント

最後に、光硬化型 3D ゲルプリンタを用いたイオン液体ゲルの造形の可否について検討した。今回造形に用いた 3D プリンタの模式図を図 8 に示す。本研究で使用した 3D ゲルプリンタは自由液面方式と呼ばれる手法を採用しており、液槽にイオン液体ゲル溶液を貯め、そのゲル溶液に対して上部から紫外線を照射し、それを走査することにより任意の位置で局所的に重合を促し、ゲルの三次元造形を可能にする。実験条件として、10 mm × 10 mm × 0.5 mm の造形データを使用した。また、3D ゲルプリンタの光量は 28 mW、造形スピードは 180 mm/min とした。造形後のイオン液体ゲルを図に示す。造形物がデータより大きくなっており、余分な部分で硬化している。今回は 3D 造形用に材料を調整せず、型で用いた組成のまま造形したことが、造形物を大きくした原因であると推察される。光を用いて 3D 造形する場合は、光に反応する開始剤の含有量及び硬化を阻害する光吸収剤の量が非常に重要である。今後それらのパラメータを調整し、3D 造形に適した組成を見つける。

5. 結論

型を用いてイオン液体ゲルを造形し、その導電率が厚さ 1 mm と 2 mm で一致することから、イオン液体ゲルの性質は変化せず、厚さに依存しないことが確認できた。イオン液体ゲルの厚さが大きくなると静電容量が小さくなるため、厚さは薄く作製することで電解質としての性能は良くなると期待できる。

さらに、イオン液体ゲル 3D プリントについて検討した。3D プリント用に材料を調整しないまま造形したため、設計データよりも大きな造形物になった。今後は、光開始剤や光吸収剤について、3D 造形に適した添加量を調査する。また、電極部に当たる材料を選定することで、すべての材料がゲルでできたキャパシタを作製することを目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237), 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人: NEDO) によって支援を受けたものである。

本研究のインピーダンス測定及び定電流充放電測定は、山形大学大学院有機材料システム研究科吉田司教授並びに博士後期課程の中村天彰氏、原田祐弥氏にご指導いただきました。ご協力いただき心から感謝と御礼申し上げます。

参考文献

1. 中野義夫, “ゲルテクノロジーハンドブック”, エヌ・ティー・エス, (2014), pp152
2. Yuta Hara, Kazunari Yoshida, Ajit Khosla, Masaru Kawakami, Koh Hosoda, and Hidemitsu Furukawa, “Very Wide Sensing Range and Hysteresis Behaviors of Tactile Sensor Developed by Embedding Soft Ionic Gels in Soft Silicone Elastomers”, ECS Journal of Solid State Science and Technology Volume 9 (2020)
3. Yuhua Li, Zongjie Sun, Lei Shi, Shiyao Lu, Zehui Sun, Yuchuan Shi, Hu Wu, Yanfeng Zhang, “Poly(ionic liquid)-polyethylene oxide semi-interpenetrating polymer network solid electrolyte for safe lithium metal batteries”, Chemical Engineering Journal Volume 375 (2019)

ExpandFabric:熱膨張素材の添付による布の形状加工の基礎検討

ExpandFabric: A Basic Study on Fabric Shape Change with a Thermal Expandable Material

開元 宏樹¹, 笥 康明¹

Hiroki KAIMOTO¹, Yasuaki KAKEHI¹

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

【要約】

本研究は、熱膨張性材料を用いて布地の形状をプログラマブルに書き換えるファブリケーション技術を提案するものである。本研究では、材料の膨張現象に着目し、膨張材料を布に添付することで、加熱と共に 2.5 次元的な形状へと布の形状加工を施すことを狙う。本研究で用いる熱膨張素材は熱を加えることで約 2 倍の膨張率を作成することができ、その膨張率を任意に設定することができる。膨張率、布への添付の形状、添付する位置の組み合わせを設計することで、材料の添付後の布を熱をトリガとして、任意の形状に加工することができる。本発表では、手法の原理提案および素材添付のための装置の実装を行い、作成したサンプルの変形結果についてまとめると共に、今後の展望について述べる。

キーワード: 熱膨張, デジタルファブリケーション, 布加工, 形状変化

【Abstract】

In this study, we propose a fabrication technology that rewrites the shape of a fabric using a thermally expandable material printed on it. We focus on the expansion phenomenon of the material and attach the expanding material to the fabric, which enables the fabric surface to be bent or swelled. The thermal expansion material used in this research can create an expansion rate of about twice as large as that of the original material by applying heat, and the expansion rate can be set in advance. By designing the combination of the expansion rate, the shape of the attachment to the cloth, and the position of the attachment, the cloth after the material is attached can be processed into a 2.5D shape using heat as a trigger. In this presentation, we propose the basic principle of the method, implement the device for attaching the material, describe the deformation results of the sample, and summarize the future work.

Keywords: Thermal Expansion, Digital Fabrication, Fabric Processing, Shape Changing

1. はじめに

デジタルファブリケーション技術の発達と普及に伴い、さまざまな形状の物体を制作することが可能になった。特に、製造後に外部からの刺激等に応じてモノの形状を含めた特性を変える 4D プリンティングへの注目が高まり、HCI (Human Computer Interaction) 領域においてもその設計を支援するためのツールや、モノの変形 [1]・変色 [2]・硬度変化 [3] などを取り込むインタラクションや応用が提案されている。

これらの技術領域は、布あるいはファッション応用との親和性も高い。これまでに、布の形状変化 [4]、変色・発光 [5]、硬度変化 [6] などの機能がデザインと結びついて先進的な提案がなされてきた。特に変形に注目すると、布に機械的なアクチュエータを組み込むものから、糸など布を構成する素材の特性を利用して変形を引き起こすものまでその手法も幅広い。特に後者の素材特性に注目するアプローチの既存の代表的な取り組みとして、bioLogic は納豆菌を含むバイオフィルムを布上に印刷することにより、装着者の汗等に起因する湿度変化に反応して素材が収縮し衣服の開口形状を変化さ

せる [7]。また、ISSEY MIYAKE の Steam Stretch は、熱で収縮する糸を他の糸と共に織り込むことにより、加熱時にさまざまな形状やパターンの表出を可能にする [8]。

これまでの多くは外部刺激に応じて収縮する素材を用いて変形を起こす手法が採られていた。これに対して、今回筆者らは、加熱による素材の膨張に注目して、新たな布の変形手法 ExpandFabric を提案する。これまでに、筆者らは発泡素材を 3D プリントの材料に混練し、造

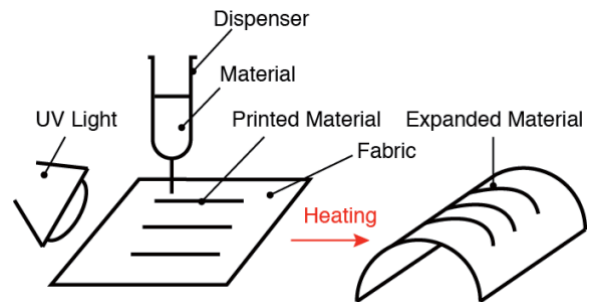


図 1. ExpandFabric の装置概要

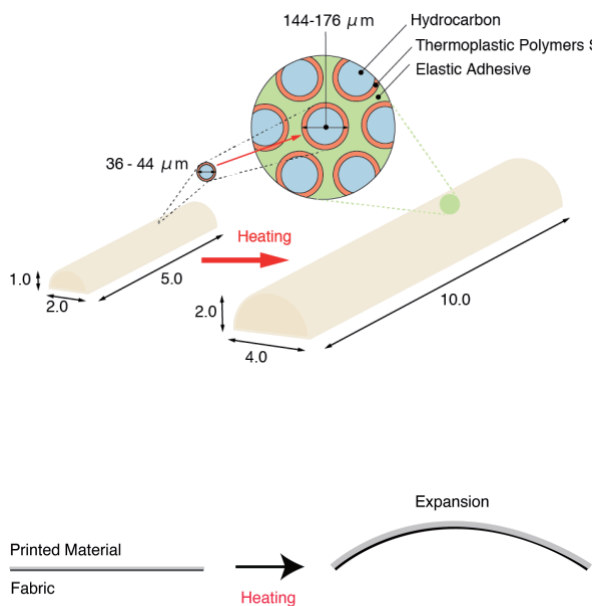


図 2. ExpandFabric の変形基本原理

形後に加熱・膨張して変形させるデジタルファブリケーション ExpandFab の研究を行ってきた[9]. この手法をベースに今回は布上に膨張性のある素材をプリントすることにより布の変形を起こす(図 1).

本手法は、収縮性の素材に対しても変形率が高く、また局所的な膨張率の制御が可能であること、既存の布の上に適用可能なことなどが特徴として挙げられる。本稿では、以下にその基礎原理と設計について述べ、実装したサンプルの変形結果、および展望についてまとめる。

2. ExpandFabric の提案と基本原理

本手法は図 2 のように熱膨張性マテリアルを布表面にプリントし、加熱によるプリント部分の膨張に伴う生地形状変化を制御する。今回使用するマテリアルは、

ExpandFab と同様に熱膨張性マイクロカプセルと UV 硬化型粘着剤を混合した粘性液体である。このマイクロカプセルは 160℃から 180℃の温度帯で膨張する。UV 硬化粘着剤は、プリント時に紫外線を照射することにより硬化するもので、布上での素材の定着を促進するために用いる。液体中での熱膨張性マイクロカプセルの含有量を変更することで、膨張率を設定することができる。

粘性のあるマテリアルを空気圧を用いたディスペンサを用いて布表面に添付し、UV による硬化を行うことで、布表面に定着させる。布表面に定着させたマテリアルの熱膨張変化に伴い、添付されたマテリアルの体積変化と添付の土台となった布の伸長率の差により、布全体の形状が変化し、曲げやシワなどの形状変化を起こすことが可能となる(図 2 下)。

3. 実装と試作結果

3.1 装置構成

まず、布へのマテリアルのプリントは、ヘッドの水平位置をコンピュータから制御できる XY プロッタ(X-Carve 750mm RailKit)にディスペンサノズル(Nordson Ultimius V, シリンジ 55cc, ノズル内径 0.58mm)を取り付けたものを用いた。ステージ上に布を固定し、その上にディスペンサからマテリアルを吐出する。ディスペンサの空気吐出量およびヘッド部分の移動速度の調整により、その位置に配置されるマテリアルの吐出量を調整することができる。また、造形後の加熱には定温乾燥機(DVS402)を用い、温度を 180℃に設定して後述する試作を行った。

3.2 生地の種類と熱膨張性マテリアル

変形の様子を確認するために、マテリアルの膨張率を 5 種類、添付する布の種類を 2 種類、合計 10 種類の条件で加熱膨張を施した。

膨張率は、マテリアル全体に対する熱膨張性マイクロカプセルの含有率が 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % の 5 種

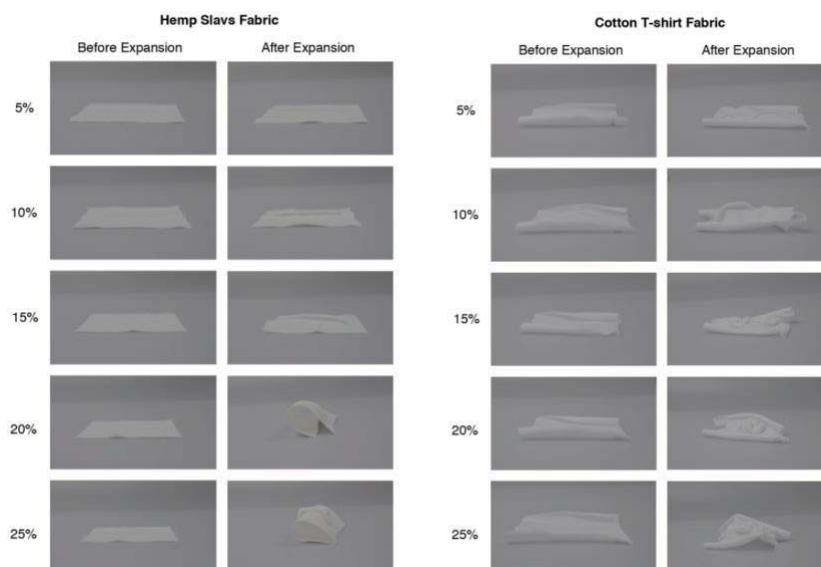


図 3. 試作の結果(左:麻スラブ生地, 右: 綿 T シャツ生地でそれぞれ膨張率の異なるマテリアルを添付した結果)

類を用意した。布は今回は伸縮率の異なる2種類の布を用いた。一つは麻スラブ生地、もう一つは綿 T シャツ生地である。それぞれ 100mm 四方に成形して用いた。

今回の試作では、それぞれ布の中央に熱膨張性マテリアルを 1 本の直線状(太さ約 2.75mm, 長さ 70mm)に添付した。加熱時間はそれぞれ約 1 分間とした。

3.3 試作の結果

図 3 に示すように、麻スラブ生地では、含有率 5%, 10%, 15%では布の形状に与える効果が薄かった。一方、20%, 25%では、布を折り曲げるように変形させることが出来た。綿 T シャツ生地では、含有率が 10%を越えると布の形状に大きく影響する様子がみられた。麻スラブを使った実験とは異なり、綿 T シャツ生地では、布表面上でマテリアルが布を巻き込むような変形となった。含有率に応じて変形の度合いを制御できる可能性が示唆され、また生地の素材や伸縮性によっても影響を受ける可能性がある点が確認できた。

4. T シャツへの添付によるテクスチャ付与

本手法を用いた応用の一つとして、市販の綿素材の T シャツの上に、熱膨張性マテリアルで矩形パターンを縦横にアレイ状に描くことで、表面に 2.5 次元的なテクスチャを付与することを試した。

図 4 にその結果を示す。本例では、膨張率 160%のマテリアルを使用し、10mm 四方の四角形を上下左右 10mm の等間隔に配置した。添付面を裏返すことで、布の表面にテクスチャを施すことができた。



図 4. T シャツにテクスチャを施した例

5. むすびと今後の課題

本稿では、熱膨張性マテリアルを布上に添付することによる布の変形制御手法 ExpandFabric の基本原理の提案と試作を行なった。基礎的な試作を通してマテリアルの膨張による布の変形を確認することができた。

今後の課題として、まず変形に適した膨張率や描画パターンを今後、理論・実践の両面から調査していく必要がある。安定した変形を起こすための加熱手法・環境

のさらなる探索も必要になる。なお、今回実験で用いた膨張後の布のサンプル(膨張率 160%)は、家庭用洗濯機で洗濯後も素材の剥離は見られず形状を保っていた。耐久性や経時変化についても今後より詳しく評価していきたい。

これらに加えた課題として、応用領域のさらなる開拓が挙げられる。本手法は一度膨張すると元に戻ることはない不可逆な変化である。この点も考慮して応用領域を見出したい。

謝辞 本研究は JSPS 科学研究費補助金(科研費)JP20K20432 の支援を受けた。また、多くの助言をいただいた早稲田大学の岩瀬英治教授に感謝する。

参考文献

1. Byoungkwon An, Ye Tao, Jianzhe Gu, Tingyu Cheng, Xiang 'Anthony' Chen, Xiaoxiao Zhang, Wei Zhao, Youngwook Do, Shigeo Takahashi, Hsiang-Yun Wu, Teng Zhang, Lining Yao. Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces. CHI.2018
2. Yuhua Jin, Isabel Qamar, Michael Wessely, Aradhana Adhikari, Katarina Bulovic, Parinya Punpongsanon, Stefanie Mueller. Photo-Chromeleon: Re-Programmable Multi-Color Textures Using Photochromic Dyes. UIST 2019.
3. Daniel Groeger, Elena Chong Loo, Jürgen Steimle. HotFlex: Post-print Customization of 3D Prints Using Embedded State Change. CHI.2016
4. Hussein Chalayan. <https://chalayan.com/> (最終閲覧日 2021.09.25)
5. ANREALAGE.A LIVE UN LIVE. Mori Art Museum 15th Anniversary Exhibition Roppongi Crossing. 2019
6. 中丸 啓, 西原 由美, 藤井 樹里, 武井 祥平, 加治 洋紀, 笥 康明. Heteroweave: 伝統技法に基づく材料の織り込みによる西陣織への機能付与と表現. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 24(3). 283-291.2019
7. Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, Hiroshi Ishii. bioLogic: Natto Cells as Nanoactuators for Shape Changing Interfaces. CHI. 2015
8. ISSEY MIYAKE. 3D Steam Stretch. 2014. <https://www.wwdjapan.com/articles/5456> (最終閲覧日 2021.09.25)
9. Hiroki Kaimoto, Junichi Yamaoka, Satoshi Nakamaru, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. ExpandFab: Fabricating Objects Expanding and Changing Shape with Heat. TEI .2020

泡構造 3D プリンティングによる触感と光の同時制御

Simultaneous Control of Tactile and Lights by 3D Printing Foam Structures

中村 亮太¹, 大平 麻以², 田中 浩也³

Ryota NAKAMURA¹, Mai OHIRA², Hiroya TANAKA²

¹慶應義塾大学 総合政策学部, ²慶應義塾大学 環境情報学部, ³慶應義塾大学 環境情報学部

¹Faculty of Policy Management, Keio University, ²Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

³Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

【要約】

本研究では、泡構造と呼ばれる空間充填に優れた主な 5 種類の構造体(球形、ケルビンの 14 面体、ボロノイ 3D、ウィア＝フェラン構造、ウィリアムズの 14 面体の中から、熱溶解積層型 3D プリンタによる造形が可能な構造体の出力を行い、出力できた構造体の柔らかさの計測を行った。加えて造形途中に構造体内部に LED ライトや吸水ポリマーといった機能性部品の挿入を行い、新たな特性を付与する方法を検討した。これらを組み合わせることで、触感と光を同時に設計する方法を提案する。プロダクトスケールとして 3×3×3 の泡構造材の製作を行った。これらは新たなプロダクトデザインへの応用として期待される。

キーワード: FFF 3D プリンタ, 泡構造, 触感, 光

【Abstract】

In this study, from among the five main types of structures called foam structures (sphere, Kelvin tetradecahedron, Boronoi 3D, Weaire-Phelan structure, Williams tetradecahedron), which are excellent in space filling, we tried to find which structures could be printed by a FFF 3D printer, and the tactile characteristics such as softness were investigated. We also developed a method to add new characteristics by inserting parts such as LED lights and water-absorbing polymers inside the structure during modeling. By combining these, we will organize methods for controlling tactile sensation and light at the same time, and apply them to new product design.

Keywords: FFF 3D Printer, Foam Structure, Tactile, Light

1. 序論

近年、様々な分野における応用可能性を秘めた構造として泡構造への関心が高まっている。そんな中、泡構造の 3D プリンタによる造形も数多く行われているが、オーバーハング等の制約を踏まえ、その多くが造形制限の少ない光造形 3D プリンタを用いて行われている¹⁻³。他にも、FFF3D プリンタを用いて泡の造形を行う試み⁴は見られるが、泡構造の、構造の造形を FFF3D プリンタにより試みた事例はほとんど見られない。そこで今回、FFF3D プリンタで造形可能な泡構造の種類を明らかにすることを検討した。

また、近年機能性材料や電子部品を内部構造に挿入することで新たな特性を物質に付与する試みは多く行われている。内部構造の充填剤の量やパターンを変えることで機械特性を部分的に制御する研究⁵や、複数の機能性のあるエクストルーダーを取り付けることによって形状に加えて内部に電子基板を埋め込むことができる。⁶Patrick 氏らの研究⁷では、3D プリント物の内部構造に電子基板を挿入し多機能化を図る取り組みが行われており、内部構造に機能を付与する検討は数多く行われている。これらの研究では内部に挿入する部品とモデルの形状を操作することで一体型の造形物にはできない機能特性を持たせることを可能としている。

このような背景を基に本研究では、各ユニットが独立に内部空間を持つ泡構造の幾何学的特徴を応用することで、ユニットごとの内部に LED ライトや吸水ポリマーなどの部品を個別に挿入し、またそのユニットのパターンを変えることでモデル全体に新たな特性を付与する手法を提案する。

その応用先の提案として触覚の可視化体験を提案する。触覚の研究分野の抱える課題の 1 つに、触感が体験者の中のみで完結してしまい第 3 者と共有することが難しいことが挙げられる。それを解決する為触感のパラメーター化⁸やセンシング技術を用いたジェスチャー検出技術⁹などの、体験者が体感した触感を外部と共有できる技術が研究されている。しかし触感の可視化に光を用いた例はほぼ見られず研究の余地がある。

そこで今回、我々は上記の手法を用い、光による感触の表現方法を模索した。

2. 泡構造の設計と出力の検討

泡構造とは、ケルビン 14 面体、ウィリアムズの 14 面体、ウィア＝フェラン構造などの 1 種類もしくは 1 組のパターンだけで空間を充填できる構造体のことを指す。特徴として、優れた空間充填性能とユニットの積み重ねによってモデル形成を行うことが挙げられる。また類似する幾何構造のユニットである球形状と類似する空間

充填手法であるボロノイ 3D 構造も加えた 5 種類を対象に検討を行なった。

5 種類の構造体(球形、ケルビンの 14 面体、ボロノイ 3D、ウィア=フェラン構造、ウィリアムズの 14 面体)のうち、直線のみでモデルの生成が可能であった 4 種類(ボロノイ 3D、球形、ケルビンの 14 面体、ウィア=フェラン構造)の出力を行った。出力には熱溶解積層型の 3D プリンタ(Creality Ender 5)を用い、出力素材は TPU(eSUN TPU)を用いた。

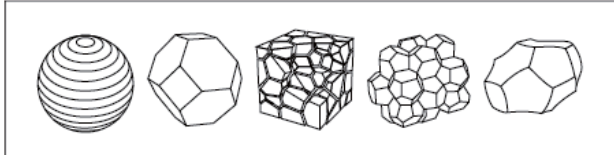


図 1. 主な泡構造 5 種類

2.1. 出力結果

出力試験の結果、サポート材を付けず柔軟性を担保した状態で球形とケルビン 14 面体の 2 種類が出力可能であることがわかった。ボロノイ 3D は支柱の太さを 3mm に太く設定することで柔軟性がない状態ではあるが造形可能であることがわかった。ウィア=フェラン構造はオーバーハングが問題となり、サポート材ありの状態でのみ出力が可能であることがわかった。



図 2. FFF 3D プリンタで出力可能な構造体 2 種

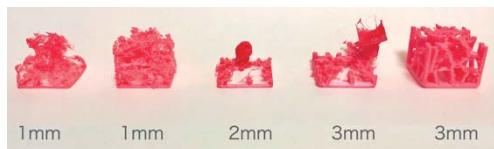


図 3. ボロノイ 3D の出力実験結果



図 4. ウィア=フェラン構造の出力実験結果

3. 試験体作成

FFF 方式で出力可能な球形とケルビン 14 面体と、それぞれの内部に充填剤を加えた機械特性の計測を行うため試験体の設計を行った。

3.1 モデリング

試験片のモデルサイズは、使用する部品が内部に収まる最小サイズ(26.6mm X 26.6mm X 26.6mm)の大きさを基本にした。またモデルの壁の厚さとは、それぞれ造形が可能な最小値を用いた。(球形)壁の厚さ 0.6mm

(Kelvin)壁の厚さ 0.6mm, 柱の太さ 0.8mm.

4.2 構造体と構造内部に入れる既製品の選定

柔軟性を担保した状態で、安定して FFF 3D プリンタで出力が可能だった球形とケルビン 14 面体を構造体として採用した。また構造内部に入れる部品は LED ライト(DiCUNO 5MM LED, Panasonic CR1616 3V)と吸水ポリマー(DAISO, 虫除けビーズ No.166)を採用した。

4.3 出力

出力には熱溶解積層型の 3D プリンタ(Creality Ender 5)を用い、出力素材は TPU(eSUN TPU)を用いた。また出力はサポート材無しでの出力を行なった。



図 5. モデル出力に用いた 3D プリンタと出力素材

5. 荷重-変位計測

本研究で出力した泡構造のユニットセルであるケルビン 14 面体と球形構造の幾何構造が異なることによって表面の柔らかさの違いや少し押し込んだだけで座屈現象といった機械特性の違いが観察できることから押し込み型試験機を使い荷重-変位の計測を行い構造体の変形について考察を行った。

5.1 計測機器

計測には図 6 に示す測定装置 YAWASA MSES-5012-1-SL (テック技販、京都)を用いた。



図 6 計測に用いた機器

5.2 計測条件

計測には 4 節で出力した 3D プリントされた試験片を用いて行った。標本は定盤の上に乗せられ圧力センサーに球面上のプロープ(20mm)を取り付ける。0.5mm/sec の一定の速度で標本に対して 10N の加重に達するまで荷重をかけ、変位加重曲線を計測した。

5.3. 計測結果

計測結果を図 7,8 に示す。幾何構造を比較すると球形の方が、傾きが小さいことから柔らかいことがわかる。反対にケルビン14面体は傾きが大きいことから球形状に比べて今回の計測条件では硬いことが示された。また球形は座屈現象がわずかな押し込み量でも容易に生じることが計測された曲線が不安定になっていることから観察できる。

球形、ケルビンのそれぞれに座屈現象が見られ、使用した機器では座屈発生後の計測が難しいかった為、座屈が見られる前までの数値をそれぞれ有効とした。

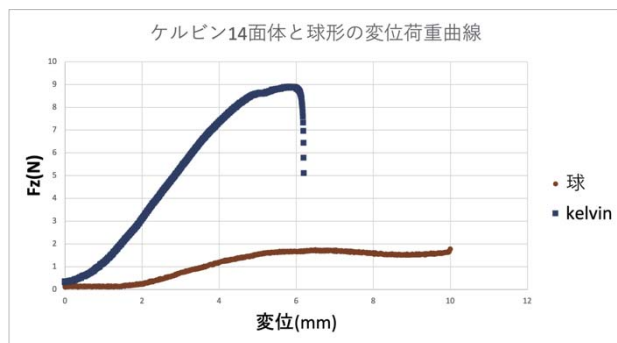


図 7. ケルビン 14 面体と球形の変位荷重曲線

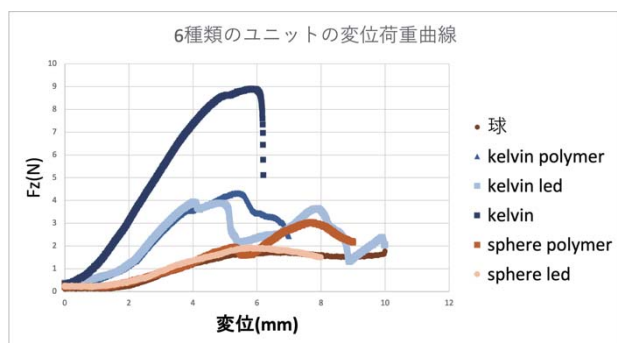


図 8. 種類のユニットの変位荷重曲線

6. 考察

図 7 の結果から、泡構造は構造体の持つ直線の数が増えることで、FFF を用いた造形の場合、より固い特性を持つと推測される。

図 8 からは、内部に挿入する充填剤の種類により泡構造の持つ機能特性が制御可能であることが示唆される。

7. モデル作成

6 節において、泡構造の構造自体に機械特性の違いがあること、またユニット内部に部品を挿入することで新たな機能特性を生むことができることが分かった。このことからユニットを複数つなげることで任意の機械特性をもつ泡構造を組み立てる手法を構築した。

7.1 パターン生成システム

今回、用意した 6 種類のユニットをランダムなパターンで配置しモデルを生成するシステムを、Grasshopper を用いて開発した。

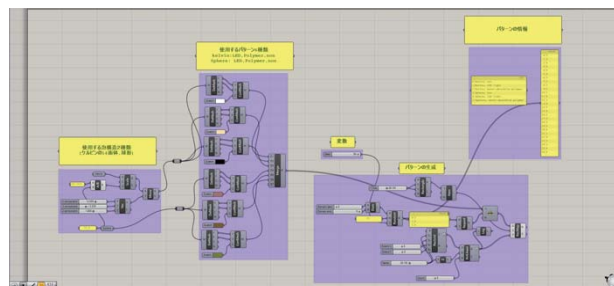


図 9. 作成したパターン生成システム

7.2 モデリング

試験片のモデルサイズは、4.2 で作成したユニットを 3x3x3 に積んだ大きさ(79.8mm X 79.8mm X 79.8mm)を基本にした。

7.3 出力

出力には 4.3 と同様のものを使用した。また 7.1 で生成したパターンの中から、特徴の異なる 3 つのモデルを出力した。

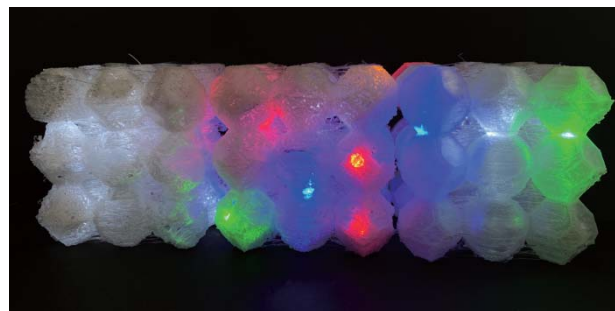


図 10. 今回出力したモデル

8. 感性評価

出力したモデルの感触と光の印象に関する感性計測を、8 人を対象に実施した。

8.1 計測条件

被験者は各モデルを 4 通りの握り方で握り、その感触と光の光量を 10 段階で評価した。また自由記述で光の色について評価を行った。

9. 感性評価結果

計測結果の一部を図 11 に示す。モデル間の感触、光の印象が異なることがわかる。また同一のモデルであっても握り方によって感触に違いがあることが示された。さらに、複数色の光を内部に挿入されたモデルの場合、握り方により感触に加え光の印象も変わることが確認された。

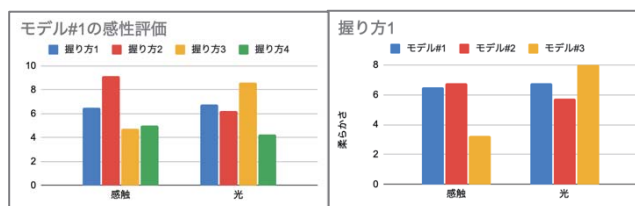


図 11. 感性評価結果の一部

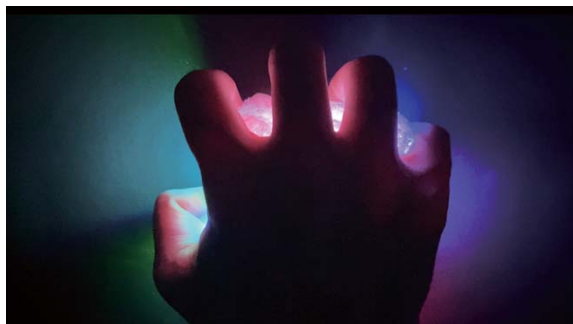


図 12. モデル#2, 握り方 1 の様子

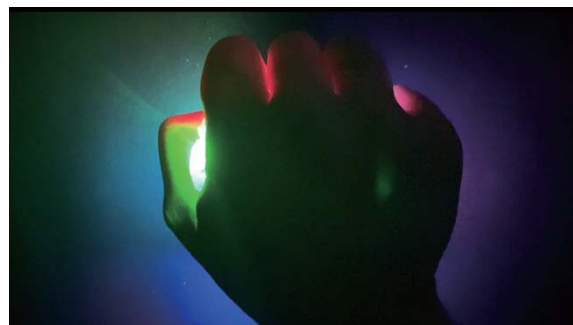


図 13. モデル#2, 握り方 2 の様子

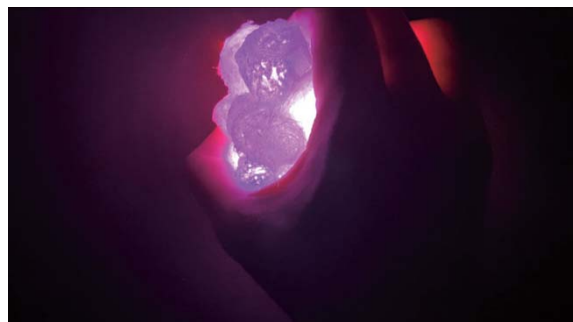


図 14. モデル#2, 握り方 3 の様子



図 15. モデル#2, 握り方 4 の様子

10. 考察

図 11 の結果、そして図 12-14 の様子から、内部に挿入する部品やモデルの柔らかさや光の印象を制御できることが示唆される。

11. 結論

今回の研究では、主な泡構造の中で球形、ケルビン 14 面体の 2 つが FFF 3D プリンタでの出力が可能であることが分かった。また構造体の内部に部品を挿入することで構造体の特性を制御できることが計測により明らかとなった。それらを組み合わせることで任意の特

性を持つモデルが作成できることが明らかとなり、今回の泡構造の 3D プリンティング手法が、感触と光の漏れ出方を同時に制御できるものであると確認できた。

今後、構造体内部に入れるモノとそれによって生まれる特性の可能性、またそれらの組み合わせ方でどのような特性の変化が現れるかを検証し、ライブラリとして活用できるようにデータ蓄積を行ってゆく。

参考文献

1. I.Capasso, B.Liguori, L.Verdolotti, D.Caputo, M.Lavorgna, E.Tervoort, “Process strategy to fabricate a hierarchical porosity gradient in diatomite-based foams by 3D printing” (2020)
2. Jonàs Martínez, Jérémie Dumas, Sylvain Lefebvre, “Procedural Voronoi Foams for Additive Manufacturing” (2016)
3. Xuan Song, Zhuofeng Zhang, Zeyu Chen, Yong Chen, “Porous Structure Fabrication Using a Stereolithography-Based Sugar Foaming Method” (2016)
4. Bonthu Dileep, Mrityunjay Doddamani, “3D Printed Lightweight Composite Foams” (2020)
5. Jonas Zehnder, Espen Knoop, Moritz Baecher, Bernhard Thomaszewski, “MetaSilicone: Design and Fabrication of Composite Silicone with Desired Mechanical Properties” (2017)
6. 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科. 相部範之, 田中浩也. FABRICATOR. 商標登録第 5884872 号. 2018-7-31.
7. Patrick F. Flowers, Christopher Reyes, Shengrong Ye, Myung Jun Kim, Benjamin J. Wiley, “3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament” (2017)
8. 藤吉賢, RFID タグを用いたものと情報をつなぐパーソナル・ファブリケーション. 慶應義塾大学, 2014, 学士 論文
9. 国立大学法人広島大学. 栗田雄一, 辻敏夫, 荒剛, “触覚評価方法および触覚評価システム. 2018-004585. 2018-1-11.
9. “A Deformable Sensor for Multimodal Inputs Based on Conductive Foam with a Single Wire” (2021)

Crystal Deposition Printing : 結晶析出を用いた 3D プリント造形物 の ポストプロセスの探求

Crystal Deposition Printing: exploration of the post-processing of 3D printed objects using crystal deposition

大村 まゆ記¹, 荒井 将来², 田中 浩也³

Mayuki OMURA¹, Masaki ARAI², Hiroya TANAKA³

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

¹Faculty of Policy Management Keio University, ²Graduate School of Media and Governance Keio University, ³Faculty of Environment and information Studies Keio University

【要約】

本研究では、FFF 式の 3D プリントを利用し、塩の結晶が析出しやすい密度の構造を出力することで、湿度調節作用や抗菌作用、軽量性といった特徴を持った塩の特性を活かした壁パネルを提案する。このパネルは、現在再利用方法が確立していない「副生塩」の将来的な活用法の提案でもある。塩を析出させる部分から明かりを取り入れ、需要の減少している障子と障子紙の役割を、樹脂と塩の結晶が果たす可能性について考察した。パネルから効果的に塩の結晶を析出させるために、グリッドの密度の異なる構造を 3D プリントで出力し、結晶の析出の程度を実験した。3D プリントを結晶析出の母体として使用することで、より自由な造形も可能となる。

キーワード: 3D プリント, 副生塩, SDGs

【Abstract】

In this research, we propose a wall panel that utilizes the characteristics of salt, such as humidity control, antibacterial effect, and light weight, by using an FDM 3D printer to output a structure where salt crystals easily precipitate. This panel is also a proposal for the future utilization of "byproduct salt," for which a method of reuse has not yet been established. We have considered the possibility that resin and salt crystals could play a role in the declining demand for shoji screens and shoji paper by bringing in light through the area where the salt is deposited. In order to effectively deposit salt crystals from the panel, we used a 3D printer to print out structures with different grid densities, and experimented with the degree of crystal deposition. using the 3D printer as the matrix for crystal deposition allows for more flexible modeling.

Keywords: 3D printer, by-product salt, SDGs

1. はじめに

本研究の目的は、3D プリントと組み合わせることで「塩」の新たな価値を提案することである。

塩は人間が生きる上で必要不可欠であるために、古くから人類の歴史と密接に関わってきた物質である。海洋大循環のファクターであるように、地球環境とも密接な関わりを持っているが、海水淡水化や塩害など、人間の生産活動によって塩が環境に対して悪影響を及ぼしている例もある。

日本における塩にまつわる主要な問題の一つに、ゴミの焼却処理や最終処分場などで排出される副生塩が挙げられる。副生塩は生成される段階によってさまざまな物質を含むため、そのままでは人体に直接ふれることは避ける方が望ましいとされている。副生塩は 1 年間で約 18 万トン生成されており、最終処分場に保管または産廃処理されているため、再利用の手段を探る必要性が高まっている。

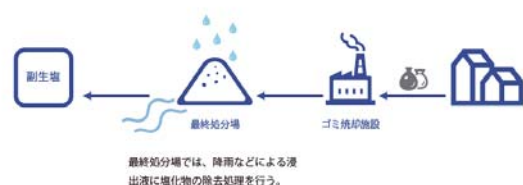


図 1. 副生塩が生成される過程

現時点での副生塩のリサイクル先としては、道路の凍結防止剤や、除草剤があるものの、十分な再利用方法は確立されていない。現在、福岡大学の樋口壮太郎氏らが、副生塩を加工して消毒剤として再利用するという研究を行っており[1]、副生塩を今後生活に身近なシチュエーションで利用する可能性も検討されつつある。

本研究では、3D プリントを用い、副生塩を視覚的効果の強い結晶という形で身近なインテリアデザインに取

り入れる方法を提案し、副生塩の新たな再利用の道筋を提案する。



図 2. 塩の結晶

2. 先行研究

2.1 資源としての塩

天然資源としての塩の可能性は近年見直されてきており、世界に様々な事例が存在する。本研究では、先行事例の調査を行ったうえで、近年「塩」に見出されている新たな価値を4つに整理した。



図 3. 塩を使用した先行事例

(1) 地域性

先行事例の多くが、一般的な海洋の10倍の塩分濃度をもつ死海付近の国々や、天日塩に適した温暖で雨季と乾期がはっきりした気候の土地で行われている。これらの地域では、身の回りに大量の天然資源として塩が存在し、すでにあるものをどう活用するかという視点で研究が行われている。

(2) 天然材料

Erez Nevi Pana:SALTS(2018)[3]では、動物性材料を使用しないヴィーガンデザインの実践として、植物や鉱物を組み合わせる際の接着剤として塩を使用するという試みが行われている。

(3) 環境問題

死海では、カリウム産業などから廃棄物として塩が年間2000万トン排出されるが、Erez Nevi Pana:Crystalline(2020)[4]では、それらを有効活用するために、塩を使った持続可能な建築資材を提案している。

(4) マテリアルとしての特性

塩は触れても人体への有毒性が比較的少なく、安価で持続可能性のあるマテリアルとして注目されている。さらに、湿度調整や抗菌作用を持つことが多くの事例で述べられている。

Mále Uribe Forés : Salt Imaginaries(2020)[5]では、チリのアタカマ砂漠から採取した塩を石膏と混ぜたタイルを制作し、部屋の湿度調節機能が期待されている。

以上のように、先行事例では、マテリアルとしての塩の可能性もさることながら、地域性や環境問題が意識されているものが多かった。しかし最終廃棄物としての副生塩を意識したものはなかった。身の回りに大量の天然資源として塩が存在しているわけではない日本において、塩にまつわる研究を行うにあたっては、副生塩を前提とすることが重要な社会的背景であることが改めて確認できた。

2.2 3D プリンティング

Emerging Objects:Saltygloo(2013)[6]では、粉末固着方式の3Dプリントに塩を用い、モジュール式のドームを制作するというものであるが、塩をマテリアルとして使用するメリットとして、湿度調整や抗菌作用に加えて堅牢さ、防水性、軽量性、半透明であることが挙げられている。

また塩の融点を利用し、型として利用する事例もある。Nicole Kleger:3D printed salt template for bioresorbable bone implants(2019)[5]では、生分解性マグネシウムを使用したインプラントの製造手法として塩が用いられているが、これは塩の融点がマグネシウムよりも低いことを利用して、塩で生成した型にマグネシウムを流し込み、塩だけを融解することで多孔質構造を実現している。

また、先行事例における塩の結晶の析出手法としては、Karlijn Sibbel:SEAt(2016)[8]のように重りを吊り下げることで形状を制御した綿糸や、吉岡徳仁:VENUS-結晶の椅子(2006)[9]のようにポリエステル繊維をフレームとして用いているものがある。ただしこれらは総じてフレームの形状を手で加工する必要があった。対して本研究では、3Dプリンタの特性である、造形の自由度の高さとラピッドプロトタイピングを利用して結晶の析出をより複雑で自由な造形で実現したパネルを制作することで、副生塩の将来的な再利用可能性を提案する。

3. 実験

ラティス構造の目の粗さに応じて塩の析出の程度が変化するのはないかとの仮説を持ち、実験を行った。ラティス構造の(1)格子の大きさ(2)各格子の柱の数と析出の関係を観察するため、FDMで出力できる構造である体心立方格子の、立方体の辺を含むものと含まないものを、それぞれ格子の大きさ2mm, 4mm, 6mmの計6つPLAフィラメントで出力した。比較する既存物として目の非常に細かい(ミクロン単位)メラミンフォームも用意した。



図 4. 析出の母体として使用した構造

結晶の析出の手順としては、80 度の飽和食塩水に、6 つのラティス構造とメラミンスポンジを容器に触れないように浸し、結晶が成長する過程を観察した。

試験片を個別の容器に入れたのは、溶液中の塩の量が限られているため、試験片どうしが相互に影響を与えてしまう恐れがあるためである。

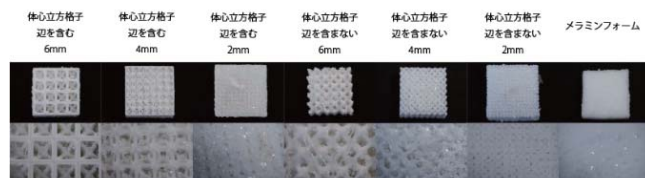


図 5. 結晶の析出の様子

7 つの試験片を 100 時間食塩水に浸したのち、十分に乾燥させ、結晶を析出させた前と後の重量の差を計測した。

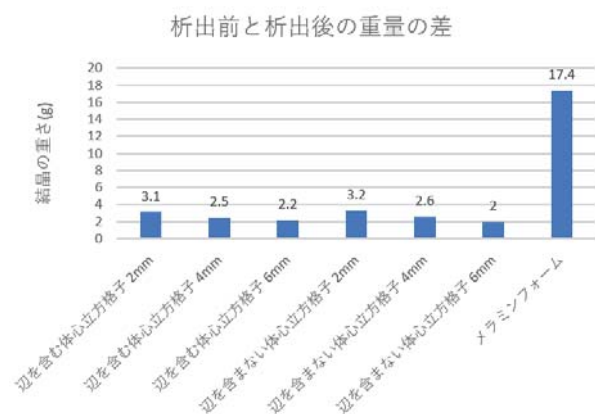


図 6. 析出前と析出後の試験片の重量の差

7 つの試験片のうちではもっとも密度の高いメラミンフォームにもっとも結晶が析出した。

ラティス構造は、格子の大きさ、つまり密度が高いものほど結晶がたくさん析出することが分かったが、構造の違いによる析出量の差はほとんど見られなかった。

この結果から、密度が高いものほど多くの結晶が析出するといえる。しかし、試験片の内部を目視することは難しく、どのように結晶が析出しているかが分かりづらかった。

そこで、3 次元のラティス構造の代わりに、2 次元のグリッドを利用して再度結晶を析出させる実験を行った。グリッドの間隔をそれぞれ 5mm, 3mm, 1mm に変えた 3 つの薄片を出力し、上記の実験と同様の手順で結晶を析出させ、成長の様子を観察した。



図 7. 結晶の析出の様子

この実験の結果、先述の実験と同様に、最もグリッドの間隔が小さい、つまり密度の高い試験片にもっとも結晶が析出した。グリッドの間隔が大きいと、結晶の数は減少するが、一つ一つの結晶の粒が大きくなる。これは、結晶が隣接すると成長を阻害してしまうためだと考えられる。[10]

5. 3D プリントプロダクトのデザイン

3D プリンタによる出力物に塩が析出することを確認したうえで、塩が析出する樹脂による壁パネルのプロトタイプを制作した。

析出させる塩は、今回は市販の食塩(伯方の塩)を使用した。将来的には副生塩の再利用を想定している。樹脂は、透明度を確保するために、PETG フィラメントを使用し、結晶を析出させたい部分には析出しやすい密度の高いグリッド上の構造を使用した。

日本の伝統的な建具である障子は、住宅における和室の減少とともに需要が落ち込んでいるが、適度な明かりを取り込むだけでなく、断熱性や吸湿性、夜間における室内の照明の反射など、多機能な面をもつ。本パネルは、塩のマテリアルとしての特性が障子紙と類似することを利用して、3D プリンタの造形度の高さを生かした 3 次元のパネルを作成した。

塩の結晶の成長は時間を要するもので、1cm ほどの結晶を得るためには数か月必要である。そのため、本研究では、別の場所で析出させた結晶を出力したプロトタイプに詰めることで、光を透過する様子を確認した。

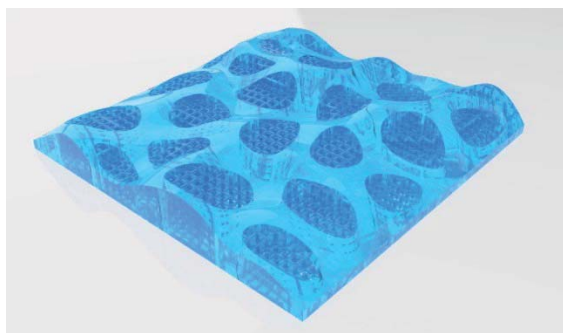


図 8. パネルのモデル

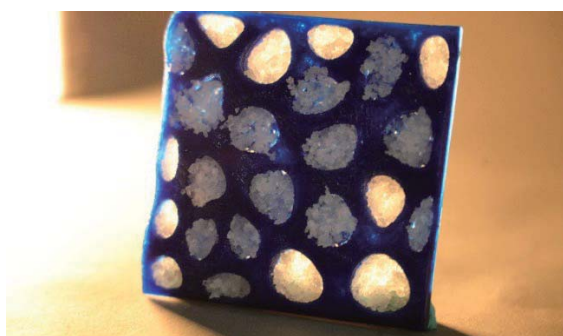


図 9. 光を当てたパネルのプロトタイプ

6. 結論

本研究では、塩の結晶が析出しやすい構造を3Dプリンタで付与することで、塩の特性である湿度調節作用や抗菌作用、軽量性といった機能を持つ明り取りのための壁パネルを提案した。出力にはFDM式の3Dプリンタを利用し、マテリアルとして透明度の高いPET-Gフィラメントを用いることで、光を乱反射する塩の結晶と合わせて高い視覚効果を生み出すことを狙った。3Dプリンタによる出力物に結晶を析出させる実験を行い、出力物表面の粗さと析出の程度に関係性があることを確認できた。

実験の結果をふまえ、塩の結晶と樹脂を組み合わせた多機能なパネルを制作し、将来的な副生塩の再利用先として提案する。

今後の展望として、同パネルに期待される湿度調整機能を定量的に測定し、効果を解析する。また、社会実装としては、空き家となっている木造住宅に本パネルを取り付け、カビ防止やさまざまな持続効果が向上するかどうかを検討していく。



図 10. 和室に設置したCG

参考文献

- 樋口 壮太郎, 廃棄物処理処分に伴い排出される副生塩のリサイクルシステムの構築に関する研究(2013), 平成24年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合研究報告書
http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/K2416.pdf
(アクセス:2021年9月15日)
- Sigalit Landau「DEAD SEA」
<https://www.sigalitlandau.com/salt>
(アクセス:2021年9月22日)
- Erez Nevi Pana「SALTS」(2018)
<https://www.hreafta.com/journal/article/bleached-by-erez-nevi-pana>
(アクセス:2021年9月15日)
- Erez Nevi Pana「Crystalline」(2020)
<https://www.ngv.vic.gov.au/erez-nevi-pana-crystalline/>
(アクセス:2021年9月15日)
- Mále Uribe Forés「Salt Imaginaries」(2020)
<https://studio-male.com/projects-2/salt-imaginaries>
(アクセス:2021年9月22日)
- Emerging Objects「Saltygloo」(2013)
<http://emergingobjects.com/project/saltygloo/>
(アクセス:2021年9月15日)
- Nicole Kleger, Martina Cihova, Kunal Masania, André R. Studart, Jörg F. Löffler, Printing of Salt as a Template for Magnesium with Structured Porosity(2019)
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201903783>
(アクセス:2021年9月15日)
- Karlijn Sibbel「SEAt」(2016)
<https://karlijnsibbel.com/portfolio/seat/>
(アクセス:2021年9月15日)
- 吉岡徳仁「VENUS-結晶の椅子」(2006)
<https://www.tokuji.com/gallery/2008-venus/>
(アクセス:2021年9月15日)
- 村上正祥, 塩の析出環境条件と結晶形状(1)(1999)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/swsj1965/54/2/54_151/_pdf
(アクセス:2021年9月15日)

トレーシングペーパーの吸湿変形のための 表現メディア装置の要件の検討

Consideration of Requirements to Make Media Device for Expression
Using Hygroscopic-morphing of Tracing Paper

高橋 明日香¹, 渡邊 恵太¹

Asuka TAKAHASHI¹, Keita WATANABE¹

明治大学¹

¹Meiji University

【要約】

トレーシングペーパーは湿気を吸収しやすく、吸湿した面が膨張し丸まるように変形する。変形速度が比較的速く様々な加工が可能なため、表現メディアとして視覚的に楽しめるのではないかと考えた。そこで、我々は以前トレーシングペーパーの変形を表現メディアとして用いることを目指して変形の制御性を調査し、トレーシングペーパーの吸湿量の調整によって特有のはためきを伴った大まかな制御が可能であることを示した。本研究では、これらの性質を活かした表現メディア装置作成のために、ガーゼに含ませた水分を熱で蒸発させて片面に吸湿をさせる手法と、空気の攪拌により一時的に変形を戻す手法を提案する。さらに、これらの手法を用いた装置を試作し表現例を提示する。

キーワード: トレーシングペーパー, 吸湿変形, 表現メディア, ディスプレイ

【Abstract】

Tracing paper absorbs moisture easily and curls up by the expansion of the surface that absorbed it. Since it curls up relatively quickly and can be processed in various ways, we thought it would be visually pleasing as media for expression. We previously examined the controllability of the morphing of tracing paper on the premise that it would be used as media for expression and showed that it was possible to control the morphing roughly by adjusting the amount of moisture absorption, with a characteristic flutter. Here, we propose a method of evaporating moisture in the gauze with heat to absorb moisture on one side of the tracing paper and a method of temporarily returning the morphing to its original shape by ventilation to create a media device for expression making use of its property. In addition, we prototype the device using these methods and present examples of expression.

Keywords: tracing paper, hygroscopic-morphing, media for expression, display

1. はじめに

木材繊維製の紙には、吸湿・放湿によって伸縮する性質がある。表裏で吸湿量の差があった場合、吸湿量の大きい面がより膨張し、その面を外側にして丸まるように変形する[1]。特に、トレーシングペーパーは一般上質紙に比べてより大きく変形する[2]。また、変形速度も掌の上で 30 秒程度と比較的速く、変形過程をリアルタイムに認知することができる。さらに、一度変形させても、放湿させればまた元のフラットな状態に戻せる。

このように変形速度が比較的速く入手も容易なトレーシングペーパーの吸湿変形を用いて、インタラクティブな表現メディアの実現を目指す。そのために本研究では、トレーシングペーパーの吸湿・放湿を制御する手法を考案し、その手法を反映した装置を作成する。

我々は、トレーシングペーパーの変形を表現メディアとして用いることを目指して変形の制御性を調査し、ひらひらと揺れながら変形する性質上厳密な制御は難しいが、吸湿量を変えることで大まかな制御が可能であることを示した[3]。また、防水加工のパターンを施すことによって、変形の手数・大きさ・形状を変化させられることを示した。



図 1. 試作した装置

本論文では、まずこれらの調査により分かった性質を活かし、吸湿変形を楽しめる表現メディア装置の要件検討と試作をする。

2. 関連研究

紙や布を吸湿・放湿により紙や布の変形させる研究報告がある。Guberan は、インクジェットプリンタを用いて、トレーシングペーパーに水のパターンを印刷し、水分を蒸発させることで立体的な構造に変形させている[4]。

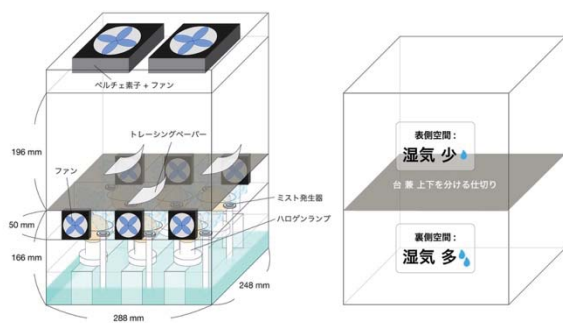


図 2. 左: 全体構造 右: 湿気の量の状態

Shigemuneらは、Guburanの研究のメカニズムを考察し、高揮発性インクと有機アクチュエータを用いた、組み上がりから稼働までを自動で行うトレーシングペーパー製の紙ロボットを提案した[5]. また、インクジェットプリンタで濃度の異なる電解質溶液を印刷し分け、自己折りたたみに時間差をつける手法を提案した[6]. Riveraらは、水に反応して膨張するハイドロゲルを吸湿変形の性質を持たない布に印刷し、放湿することで縮ませて変形させる手法を提案した[7].

本研究では、トレーシングペーパー本来の吸湿変形の性質に着目し、それを表現メディアとして応用する場合にどのような装置であるべきかの要件を検討し、装置を試作した.

3. 表現メディア装置の要件の検討と試作

3.1. 作成方針・要件

トレーシングペーパーの性質や、変形の制御性の調査結果[3]を踏まえて考察した装置作成の要件を以下に示す.

1. 片面の吸湿量をもう片面より多くできること
2. 吸湿量をだまかに制御できること
3. 変形を戻せること

1 つ目は、トレーシングペーパーの変形が表裏の吸湿量の差に起因することから要件に挙げた. 2 つ目は、先行研究の制御性の調査[3]より、吸湿量の変化によってだまかに変形の大きさを制御できることから要件に挙げた. 3 つ目は、変形の可逆性があることがメリットの 1 つであることと、変形を戻すことによって表現の幅が広がると考えたことから要件に挙げた.

3.2. 全体の実装

これらの要件を満たす装置として、4mm 厚の亚克力板を用いて図 2 のような装置を作成した. 吸湿は裏面へ限定している. 装置を中央のトレーシングペーパーを置く台となる網にて、表側空間と裏側空間に区切る. そして、表側空間の水分量を少なく、裏側空間の水分量を多くすることで、トレーシングペーパーの表裏の水分量に差をつけて変形させる. 表側空間は、上部に設置したペルチェ素子とファンで除湿することによって、水分量を少なくする. 裏側空間の水分量を多くする構造と、

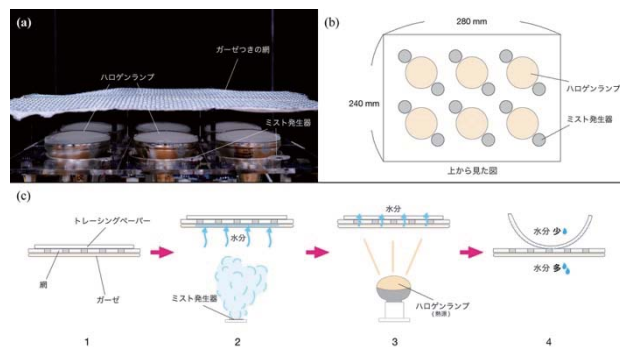


図 3. 吸湿手法と裏側空間の構造

その構造による吸湿手法、変形を戻す手法については、3.3 以降で述べる.

3.3. 吸湿手法と構造

裏面に吸湿させるために、装置の裏側空間を図 3ab のような構造にする. 上から順に、装置を上下に分けるための裏側にガーゼをつけた亜鉛製の網、熱源として神畑養魚株式会社のネオハロゲン 50W を 6 個、ミスト発生器として Seeed Technology Co., Ltd. の Grove Water Atomization を 12 個用いた.

裏面に吸湿させる手順は以下のとおりである(図 3c).

1. 網の上にトレーシングペーパーを置く
2. ミストを発生させ網の下にガーゼに吸湿させる
3. ガーゼの水分をハロゲンランプで蒸発させる
4. 蒸発した水分を裏面が吸うことで変形する

ミストの大きい水滴を直接トレーシングペーパーの裏面に当ててしまうと、放湿後も変形の跡がついてしまい、変形の可逆性が損なわれやすい. そこで、一度ミストの水分をガーゼに吸収させ、その水分を熱で蒸発させる. この手法には、ランプの照射時間を変えることによって蒸発量を調整し、変形の大きさを制御できるというメリットもある. トレーシングペーパーの固定は、亜鉛製の網に吸着可能なマグネットで行った. 熱源には、ミストを遮らずに赤外線加熱可能なハロゲンランプを使用した.

3.4. 一時的に変形を戻す手法と構造

トレーシングペーパーは表裏の吸湿量の差によって変形するため、装置の表側空間と裏側空間の水分量の差を無くせば変形は元に戻る. 3.3 の手法のミストの噴霧とハロゲンランプによる加熱を停止し、表側空間の除湿を止めれば、これを実現できる. しかし、この変形の戻し方では即効性がなく、場所ごとの制御も難しい.

そこで、裏側空間にファンを設置した(図 4ab). トレーシングペーパーが変形した状態でファンを回転させて外に風を送り出すと、表側と裏側の吸湿量の差が緩和され、一時的に変形を元に戻すことができる(図 4c). この状態でファンを止めると、表側と裏側の吸湿量に差が生まれ、再び変形させることができる.

また、仕切りを入れることでファンの風が到達する範囲を限定でき、部分的に変形を戻すことができる. 今回試作した装置では、図 4b のように亚克力板の仕切りを

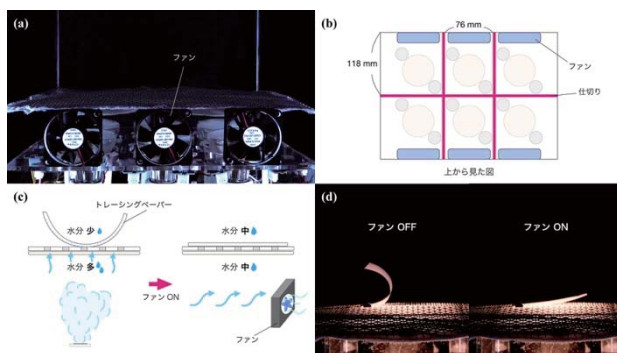


図 4. 一時的に変形を戻す手法と裏側空間の構造

設置し、6 箇所の変形のそれぞれを個別に戻せるようにした。

4. 表現例

吸湿変形や防水加工による変形の違いを活かし、装置で試した表現例を紹介する。現状では、ミストやファン、ハロゲンランプの ON・OFF は手動で制御している。今後は装置でこれらのパラメータを制御できるメリットを活かした表現例をさらに探索する予定である。

4.1 吸湿量制御で変形の大きさを変える

ガーゼに吸収させる水分量を変えることで、変形の大きさを変えることができる。図 5a の例では、噴霧するミストの数を左から順に 2 個、1 個、0 個とすることで、炎の立ち上がる大きさを左から右にかけてだんだん小さくしている。

4.2 防水加工で丸い部分と真っ直ぐな部分を作る

変形させる根本を避け、立ち上がる面に防水加工をすることによって、真っ直ぐに立ち上がらせることができる。図 5b の例では、花びらの部分には防水加工をせず、がくの部分には根本を残して防水加工をすることによって、花びらは丸く、がくは真っ直ぐに変形させている。

4.3 ファンで一時的に変形を戻す

ファンを回すと一時的に変形が戻ることを利用し、ファンを回したり止めたりして一時的に変形をさせたり戻したりすることができる。図 5c の例では中央の図のように蝶の羽が変形したところでファンを回すことで、右の図のように羽の変形を戻し、蝶の羽ばたきを表現している。

4.4 ファンと仕切りで部分的に変形を戻す

網の下に仕切りを入れてファンの風の到達範囲を限定することで、部分的に変形を戻すことができる。図 5d の例では紙芝居箱を想定し、まず左の図のように鬼側だけファンを止めて鬼を立ち上がらせ、次に中央の図のように桃太郎側もファンを止めて桃太郎を立ち上がらせた後、右の図のように鬼側のファンをつけて鬼だけを倒れさせている。

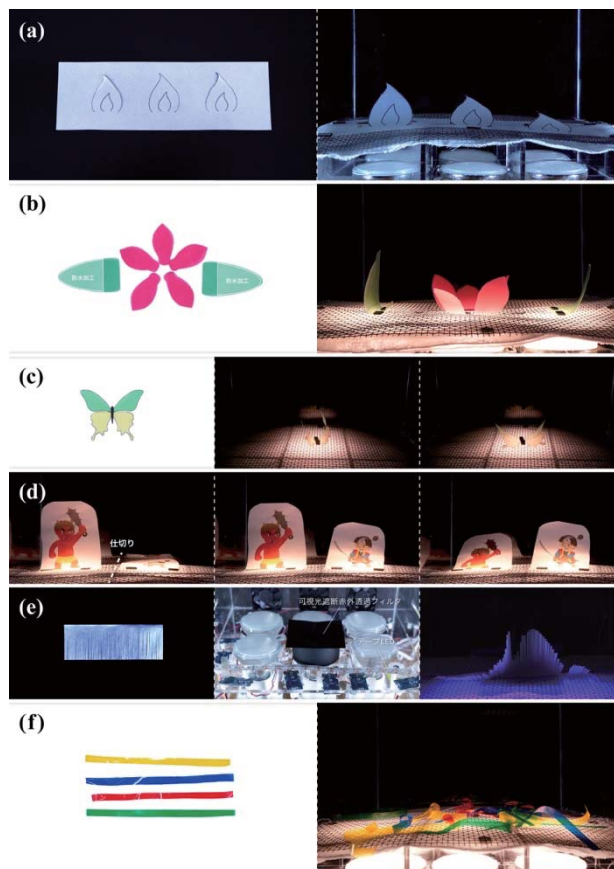


図 5. 表現例

4.5 赤外線透過フィルタで演出に可視光を使う

ハロゲンランプの上に可視光遮断赤外透過フィルタをかぶせることで、ランプの光に左右されない表現ができる。図 5e の例では可視光を遮断して下からテープ LED の色を変化させながら当てている。他にも、可視光を遮断することでプロジェクションを使った表現や、明るい場所の変形を想定した表現に応用できる。

4.6 吸湿変形する別の素材を使う

トレーシングペーパー以外にもセロハンやオブラートなど同様の性質を持っている素材にも、制御性は異なるが応用できる。図 5f の例では、トレーシングペーパーよりも変形速度の速いセロハンを細長く切って無造作に置き、うねうねと生き物のように変形させている。他にも、2 章で挙げたハイドロゲルによって形状変化可能になった布[7]や、水溶液のインクジェット印刷により自己折りたたみ可能になった紙[6]と組み合わせられる可能性もある。

5. 議論

装置の制御性や精度による課題、トレーシングペーパーの性質による課題、そして提案した手法・構造自体によって表現の幅を狭めている課題について述べる。

5.1 制御性・精度

現在の変形速度や変形を戻す速度は、リアルタイム

に認知できる速度ではあるが、さらに改善する必要があると考える。例えば図 5c の例では、ハロゲンランプの照射を開始してから中央の図の状態まで約 10 秒かかっている。また、中央の図の状態から右の図の状態に戻すまでにファンの回転を開始してから約 20 秒かかっている。変形速度や変形を戻す速度をさらに上げることができれば、表現力がより高まる。変形速度を上げるためには、表側空間の除湿性能を上げたり、より熱源の温度を上げて水分の蒸発速度を上げたりして、表裏の吸湿量の差を大きくする必要がある。変形を戻す速度を上げるためには、ファンの風量を上げる必要がある。

また、精度についても、パラメータの制御幅が小さいという問題と、装置の置かれた湿度状況に左右されるという問題がある。前者は、ガーゼを蒸発させるための熱源の温度を制御可能にしたり、ミストの噴霧量の細かい制御を可能にしたりすることで解決できると考える。後者は、常に湿度制御が可能な環境に装置を置くか、装置自体の湿度制御を厳密にできるようにすれば解決できる。しかし、水分を蒸発させているだけの現状の装置に比べてコストがかかることと、ひらひらと揺れながら変形する性質を考慮すると、厳密な制御をするよりも、変形が大きさが変わっても相対的に見て差し支えない表現や、ジェネラティブアートのような意図しない動きをする表現を楽しむ方が向いていると考える。

5.2 耐久性・可逆性

木材繊維製の紙には、強制的に吸湿変形を繰り返すと、伸縮率が小さくなるエージング効果がある[1]。そのため、トレーシングペーパーの変形や可逆性にも限界があり、同じパラメータで同じ変形を無限に繰り返せるのではない。この問題に対しては、トレーシングペーパーは入手や加工が容易だという利点を生かして、変形が鈍ってきたらすぐに取り替えることで対応できる。将来的に、装置をトレーシングペーパーの取り替えを想定した設計にアップデートしたり、トレーシングペーパーのデザインやカット、防水加工段階を支援するエディタやツールを用意したりする必要があると考える。

5.3 表現の幅を狭める課題

本論文で試作した装置では、ハロゲンランプやミスト発生器の配置の関係上、変形の単位が仕切りで区切った区画に縛られる。区画と区画の間はハロゲンランプやミストの中心が遠く、変形の制御性に差が出てしまう。これを解消するためには、一面を均一に加熱可能な熱源を使用したり、ミストの配置の仕方を工夫したりする必要があるが、最終的にはファンの設置単位が空間解像度の単位として限界だと考える。

また、裏面への吸湿に限定して装置を試作しているため、裏面が外側になる方向にしか変形できない。本来トレーシングペーパーは吸湿量の多い面を外側にしておいて変形するため、表面の吸湿量を多くすれば表面を外

側に変形させることもできる。そのため、表側空間の水分量が少ない状態と裏側空間の水分量が多い状態を任意に入れ替えることができれば、表面が外側になる変形と裏側が外側になる変形の両方を楽しむことができる。今回は、認知できる変形速度を維持しつつこれを実現できる手法を発見できなかったため裏面への吸湿に限定したが、表現の幅をより広げるためには両面共に変形できる方が望ましい。

6. おわりに

本論文では、トレーシングペーパーの性質や、変形の制御性の調査結果を踏まえ、表現メディア装置作成のための要件検討と装置の試作を行った。

今後は、試作した装置の改良を進め、ランプ照射時間やファンの回転時間、ミストの発生時間による変形の違いを調査し、装置による制御性や課題について考察する予定である。また、表現例をさらに探索し、表現ごとに可能性や限界について考察する予定である。

参考文献

1. 中嶋隆吉, 「紙について(6-3) 紙の特徴《紙と湿度》」, 紙への道. <https://dtp-bbs.com/road-to-the-paper/paper/about-paper-006-3.html> (閲覧日: 2021 年 9 月 25 日).
2. 永井輝夫, 1979, 「トレーシングペーパー」, 『繊維学会誌』, Vol. 35, No.5, pp.140-143.
3. 高橋明日香, 西條瞳, 渡邊恵太, 2020, トレーシングペーパーへの防水加工による吸湿変形の制御と表現, Conference on 4D and Functional Fabrication 2020, 2020 年 10 月 16 日.
4. C. Gubaran, “HYDRO-FOLO,” STUDIO GUBERAN. <http://www.christophegubaran.ch/hydro-fold/> (閲覧日: 2021 年 9 月 25 日)
5. Shigemune, H., Maeda, S., Hara, Y., Hosoya, N. and Hashimoto, S., 2016. “Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing.” IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 21(6), pp.2746-2754.
6. Shigemune, H., Maeda, S., Iwase, E., Hashimoto, S., Sugano, S. and Sawada, H., 2021. “Programming Stepwise Motility into a Sheet of Paper Using Inkjet Printing.” Advanced Intelligent Systems, 3(1), p.2000153.
7. Rivera, M.L., Forman, J., Hudson, S.E. and Yao, L., 2020. “Hydrogel-Textile Composites: Actuators for Shape-Changing Interfaces.” In Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1-9).

大型 3D プリンターでのワイヤープリントを用いた 葉脈の表現と新しい傘の模索

Seeking the expression of leaf vein and new type of umbrella with wire printing of large 3D printer

坂田拓人¹, 阿部辰海², 滑川由記³, 松岡康友⁴, 田中浩也⁵

Takuto SAKATA¹, Tatsumi ABE², Yuki NAMERIKAWA³, Yasutomo MATSUOKA⁴, Hiroya TANAKA⁵

¹慶應義塾大学 環境情報学部

¹Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

【要約】

本研究では、大型 3D プリンターを用いたワイヤープリント手法による繊細な表現の題材として「葉脈」を取り上げる。本物の葉を採取し、その葉脈をトレースして作成したデータを G-CODE の制御により出力する。出力には水溶性フィラメントや感温性フィラメントを使用し、本物の葉のように環境の変化に応じて形や色を変えることのできる、3D プリントならではの表現手法を探索する。葉脈の形状や、構造から影を制御する方法を探索し、重なり合いで木漏れ日が発現される新たな傘を制作する可能性を探索する。

キーワード: 大型 3D プリンター, ワイヤープリント, G-CODE, 葉脈

【Abstract】

In this research, we brought up “leaf veins” as a subject of subtle expression by wire printing using a large 3D printer. We picked a real leaf and prepared G-CODE data from tracing the real leaf vein to print. The data created by tracing the veins of a real leaf which we took is output under the control of G-CODE. Water-soluble filament and temperature-sensitive filament are used for output, and we will explore a method of unique expression to 3D printing that can change its shape and color in response to changes in the environment, just like a real leaf. We explore the form of leaf veins and the way of controlling shadows from the structure and explore the possibility of creating a new umbrella that expresses sunlight through trees by piling up.

Keywords: large 3D printer, wire print, G-CODE, leaf vein

1. はじめに

FFF 方式の 3D プリンターの造形方法のひとつに、空中線画のような「ワイヤープリント」という技法がある。この造形手法は、出力時間を短縮できるメリットがあり、その特徴から、大きな出力物の造形とも親和性が高く、ロボットアーム式 3D プリンターを使って、建築・家具スケールの作品を制作する試みがなされてきた[1][2][3]。ワイヤープリントは大型出力における造形技法としての実用性が確認される一方で、さらなる繊細な表現技法としては研究の余地がある。

そこで我々は、ワイヤーの太さやかたちをより繊細に制御し、表現技法としての新たな価値を探索するために、題材として「葉脈」を取り上げることにした。線の太さが異なり、有機的な曲線を持つ葉脈を題材とすることで、ワイヤープリントを用いた表現をこれまで以上に突き詰め、最終的には緻密な重なり合いで木漏れ日が発現される新たな傘を制作する可能性を探索する。

2. 造形方法

葉脈を題材とした 3D プリントの先行研究には、葉脈生成の原理をアルゴリズムとして抽象化し、応用したも

のがある。[4][5]

しかし我々は、実際の葉脈の魅力をそのまま活かすため、アルゴリズム化するのではなく、本物の葉から葉脈部分のみを手作業で抽出することを試みた。

2-1. 葉脈の抽出方法

実際の葉から葉脈を抽出するためにはいくつかの作業が必要である。今回は、葉脈標本と呼ばれる、葉肉部分を溶かして作る手芸の手法を用いた。採取した葉を強アルカリ性の洗剤に漬け込み、葉肉部分を歯ブラシで落とすことで葉脈部分のみを抽出した。なお、葉脈を抽出した葉には葉脈が硬く、アルカリ性の成分に溶けにくいツバキの葉を採用した。(図 1)



図 1. 制作したツバキの葉脈標本

2-2. 葉脈のトレース

作成した葉脈標本を 2 次元画像化し、Illustrator に取り込み、トレースの下書きとした。iPad 版の Illustrator で葉脈部分のみを手書きでトレースし、パスを作成し(図 2)、Fabrix[6]を用いて G-CODE に変換した。

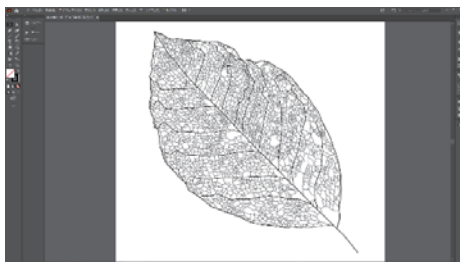


図 2. Illustrator でトレースしたツバキの葉脈

3. 3D プリントによる葉脈表現の検証

葉脈のワイヤープリントを用いた新たな表現の探求のため、本物の葉で観察される現象の再現を検証した。

3-1. 異なる太さの葉脈の表現

図 3 に、Fabrix[6]で作成した G-CODE を家庭用 3D プリンターに読み込み出力した葉脈を示す(180mm × 200mm)。本物の葉からトレースした葉脈ならではの有機性のあるワイヤープリントが確認できた。

また、葉脈の太い部分と細い部分の差異を表現するため、Fabrix[6]の機能を用いてパス毎のフィラメント押し出し量を調整した。(図 4)

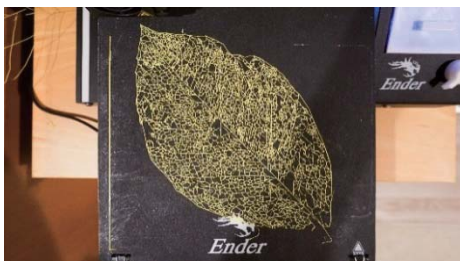


図 3. 出力したツバキの葉脈

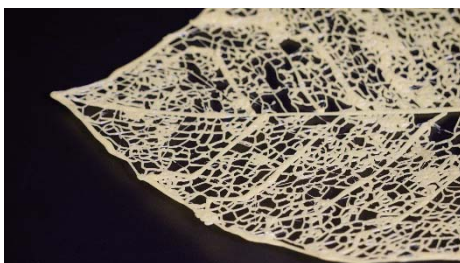


図 4. 太さの異なる葉脈の表現

3-2 葉の形状変化

本研究では、モデリングが画像のトレースによって行われるため、二次元的な葉脈になる。そこで、本物の葉で確認される 3 次元的な曲面を再現するために出力後に形状を変える表現方法を検証した。

図 5 は、出力後 45 度以上に温めることでかたちを変

えることのできる感温性フィラメントの TRF+H[7]を用いて出力した葉脈である。

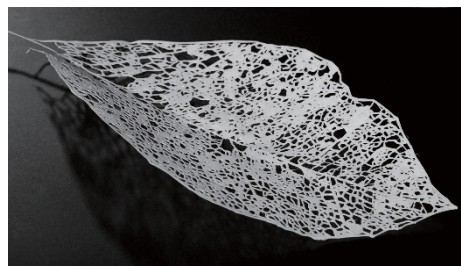


図 5. TRF+H で出力した葉脈

3-3 葉脈の大型化

葉脈をデジタルで再現することの価値として、拡大が可能である点がある。そこで、これまで家庭用 3D プリンターを使って出力していた葉脈を拡大し、大型化することで生まれる新たな表現を検証した。

今回は、研究室が開発している特別なロボットアーム式 3D プリンターである ArchiFAB MAI(図 6)を用いて出力を行った。



図 6. ArchiFAB MAI

ArchiFAB MAI とは、6軸の産業用ロボットアーム(最大リーチ 2503mm 最大可搬質量 40kg)に、ペレット樹脂材を押出すプリントヘッド(スクリュー径 30mm モータ容量 750W ノズル径 0.5mm~10mm)を組み合わせた大型 3D プリンターである。プリント材料は熱溶融樹脂ペレットφ2mm~5mm に対応し、材料タンク(容量50kg)からプリントヘッドのホッパーに圧縮空気搬送で自動供給される。最大プリントサイズは、矩形領域で定義する場合は、幅 2000mm 奥行 1000mm 高さ 1200mm 程度であり、扇形の形状で定義する場合は、1軸回転角度±90°半径 1200mm~2700mm 高さ 1100mm~1800mm 程度となる。プリント速度は主に押出速度に依存するため材種によって異なるが、本研究で用いた PLA の場合は最大 12kg/h 程度である。今回は 900mm×1100mm のパレットの上に 6mm 径のノズルで出力した。

図 7 に出力中の ArchiFAB MAI の様子を示す。大型化に伴いノズル径を太くしたことで、本来の葉脈のきめ細かさを再現することができた。また、その大きさから、本来の葉脈からは感じることもできない、身体に訴えかける迫力が生まれた。(図 8)

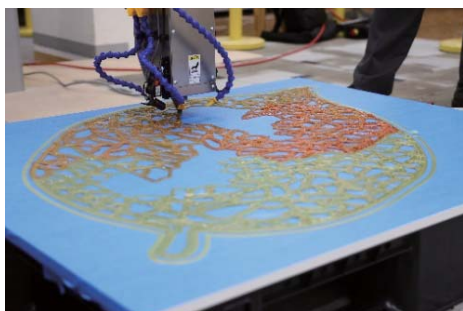


図 7. ArchiFAB MAI での出力



図 8. 大型出力した葉脈

3-4 葉の色変化

本来の葉っぱの特徴として、紅葉をはじめとする色の変化がある。この色の段階的変化を再現するため、ArchiFAB MAI での出力時に、色付きのフィラメントの投入量を調整し、段階的な色変化が生まれるか検証した。検証には PLA を使用し、透明のペレットを母材に、色付き PLA フィラメントを裁断して作成したペレットを混ぜた。(図 9)

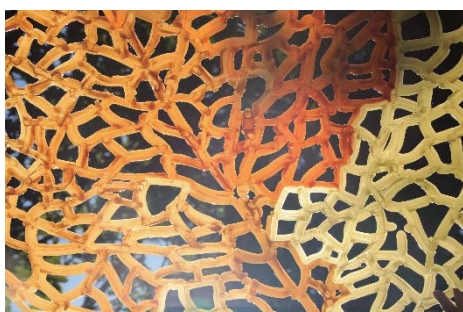


図 9. 緑と赤の色付き PLA による色表現

4. 葉脈の特徴を活かした新しいプロダクトの提案

4-1 葉傘への展開

葉脈の持つ特徴として、フラクタル構造が挙げられる。フラクタル構造には自己相似性があり、葉脈の作り出す影を観察すると、木全体が作り出す木漏れ日のような複雑な影を確認できる。(図 10)

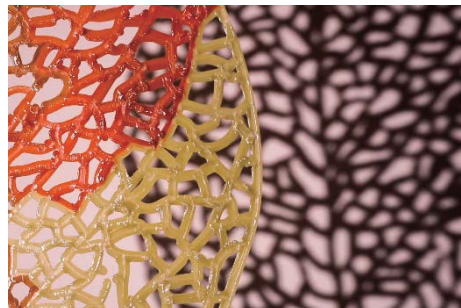


図 10. 葉脈のつくる影の様子

我々はこの特徴を傘に取り入れ、ファンタジーの世界で登場する「葉傘」をリメイクできないかと考えた。

図 11 は、我々が提案する新しい傘のイメージ画像である。地に落ちた一片の葉のような形状を成すこの傘は、葉脈がつくる影によって、その中に入る人々に程よい木陰のような空間を提供する。日差しが入り込む角度によって影のかたちは変化するため、太陽の動きに伴って葉脈の影には重なりが生まれ、木漏れ日のような影が発現する。(図 12)

葉に囲まれた内側は、緻密な葉脈が外の景色を程よくさげぎって、既存の傘のように半プライベート空間を演出する。(図 13)

実装には TRF+H のフィラメントを部分的に用いることで、気温の変化に対応して形状を制御する。

また、雨が降った後などには、葉脈の目の間に水滴が保持され、光を反射する効果を期待することもできる。[8]

太陽の動き、気温・気候の変化により、四季折々、様々なかたちに変容するこの傘は、人々の生活に最適化された既存の傘にはない、機能を超越した魅力がある。これまでの傘にない機能・魅力を持つ新たな傘として、この葉傘を提案する。



図 11. 葉脈を用いた新しい傘のイメージ画像

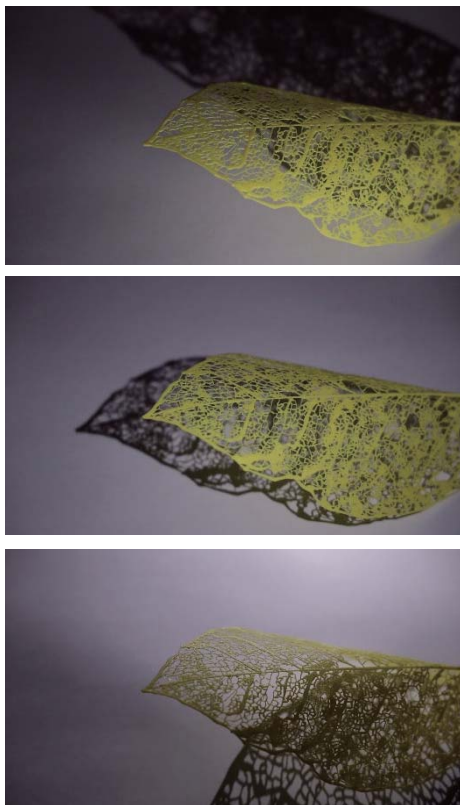


図 12. 1 日の太陽の動きから生まれる新しい傘の影の動き

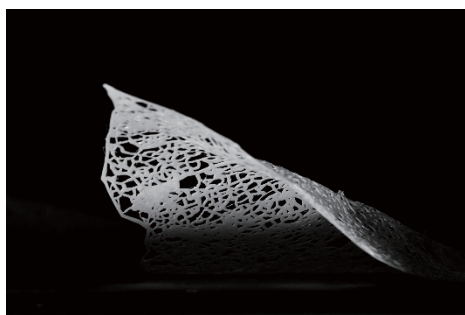


図 13. 新しい傘の内部からの見え方

5. 今後の展望

近年、地域で捨てられていたリサイクルプラスチックを 3D プリントに活用することに期待が高まっている。しかし、例えばペットボトルのキャップなどの、捨てられたプラスチックを集めてきたとしても、さまざまな種類の材料が混ざった状態にあり、安定した吐出量で 3D プリントすることはできない。また、リサイクルの文脈で良く登場するポリプロピレンやポリエチレンはもともと収縮率が大きいものであり、3D プリントを失敗する大きな要因を孕んでいる。

しかしそのような扱いの難しいリサイクルプラスチックであっても、ワイヤープリントであれば出力が比較的容易であることも分かっている。[9] 今回探求した葉脈の 3D プリントは、地域の捨てられたプラスチックを材料としてつくることで、さらなる社会的意義を生み出せる可能性がある。

本研究では、大型 3D プリンターを用いたワイヤープリント手法による繊細な表現の題材として「葉脈」を取り上げ、その可能性を探索した。

今後は、特定の地域やエリアを限定し、その場所にゆかりのある樹木の「葉」を題材として、その地域で捨てられたリサイクルプラスチックを用いて 3D プリント葉脈体をつくることで、新たな価値を生み出せるかどうかを検証したい。

謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献

1. Branch TECHNOLOGY, Design Miami Pavilions, <https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/shop>, (参照 2021-09-15)
2. Aectual, Sunshade roof, <https://www.aectual.com/architectural-products/sunshader>, (参照 2021-09-15)
3. Iaac, MATERIAL, <https://iaac.net/project/mataerial/>, (参照 2021-09-15)
4. Nervous System, <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>, (参照 2021-09-20)
5. JAKDRINNAN, 3D LEAF VENATION, <https://jakdrinnan.wordpress.com/2012/12/09/3d-leaf-venation/>, (参照 2021-09-23)
6. Hiroya Tanaka, Fabrix, <https://www.fabrix.design/>, (参照 2021-09-15)
7. ユニチカ株式会社, TRF+H, https://www.kickstarter.com/projects/trf-plus-h/trf-h-filament-trf-h?fbclid=IwAR16V3_BueLUtGu14I9JsjcMzKNsAKvRNcK3xoGwOHhgkIKLeTPxgnZhHo, (参照 2021-09-15)
8. 河井萌, 田中浩也, 大野定俊, 中島奈央子, ポロノイ構造を用いた水の表面張力による環境呼吸パネルの提案, Conference on 4D Functional Fabrication 2020, 2020-10-16
9. PRECIOUS PLASTIC KAMAKURA, <https://preciousplasticmakamura.com/>, (参照 2021-09-20)

3D プリンタによるポリウレタンフォーム特性の再現と 自動車用シートへの適用

Reproduction of polyurethane foam characteristics with a 3D printer,
And application to automobile seats

板橋 大一¹, 高橋 佳之¹, 岡崎 太祐², 浅野 義弘²

Taichi ITABASHI¹, Yoshiyuki TAKAHASHI¹, Taisuke OKAZAKI², Yoshihiro ASANO²

¹株式会社ブリヂストン, ²慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

¹Bridgestone Corporation, ²Graduate school of Media and Governance, Keio University

【要約】

本研究では、3D プリンタを用いてポリウレタンフォームのセル構造体に類似する幾何構造を設計し機械特性の比較を行った。自動車クッション用ポリウレタンフォーム材の観察結果からその構造体を Kelvin 14 面体とし、既存ポリウレタンフォーム材、および3D プリンタ造形した複数のブロックサンプルを作製した。造形には米国 Carbon 社製 3D プリンタと EPU 素材(Elastomeric Poly Urethane)を用いた。4DFF2020 での先行研究に基づく試験方法でヤング率を測定し、Ashby map 上にプロットし可視化を行った。本研究結果は自動車用シート等各種クッション材の製品開発や普及、および新たな価値を示す試験方法の提案に貢献するものと考えられる。適用事例の1つとして Kelvin14 面体を用いたレーシングシートを作製した。

キーワード : 3D, 機械特性, Kelvin14 面体, ポリウレタンフォーム

【Abstract】

This research is about poly-urethane foam structure modeled with a 3D printer. Based on the observation results, the structure was designated as a Kelvin tetradecahedron. Block samples with an existing poly-urethane foam and made by a 3D printer were prepared. The Structure 3D printer was manufactured by Carbon, USA and EPU (Elastomeric Poly Urethane) material. Young's modulus obtained by the measurement method introduced in 4DFF 2020 were visualized by mapping on the Ashby-map. The result will contribute to product development and popularization of various cushion materials such as automobile seats, and proposal of new test methods that show new value. This time, a racing seat was produced using Kelvin tetradecahedron as an application example.

Keywords : 3D, mechanical character, Kelvin tetradecahedron, poly-urethane foam

1. 序論

ポリウレタンフォームは軽くクッション性や耐久性に優れる特性を持ち、クッション材として幅広く使用されている。製造には2種類の成分を混合させ、ガスを出し泡状に膨らみながら樹脂化させて行う。このことから完成した製品は泡化で構成されたセル構造とウレタン樹脂そのものの2つの特性を持つが、化学反応や製造プロセスの制約から完成品で得られる特性範囲には限界がある。一方、近年の技術向上により、スニーカーのミッドソール¹・ヘルメット内部のクッション材²・自転車のサドル³など多くの分野で3D プリンタ製クッション材が使用されており、利用範囲が拡大している。

本研究の目的は、3D プリンタを用いて作成したサンプルと既存ポリウレタンフォームの材料特性を比較し、それを基に材料の置換や従来のポリウレタンフォームでは設計できない特性を得られるかを検討することで、新たな価値創造ができるかの可能性を探ることである。実際の取り組みとしてポリウレタンフォームのセル構造観察結果からセル構造体を特定し、現行範囲内外の特性を得ることを目的として3Dプリンタ製ブロックサンプルを作

成した。これらを先行研究に基づく試験方法を用い自社ポリウレタンフォームとヤング率と密度の比較を行い、物性比較手法として知られている Ashby マップ⁴上での視覚化と考察を行った。

2. サンプル作成

2.1 セル構造の決定

(株)ブリヂストン(以下、『自社』)で製造している自動車用ポリウレタンフォームを観察し、セル構造体は Kelvin14 面体(切頂8面体)とした。Fig.1 のような形状をしており、単一で空間充填可能な形状の中で表面積が小さく安定な幾何構造として知られており、泡のセル構造に多く見られる。

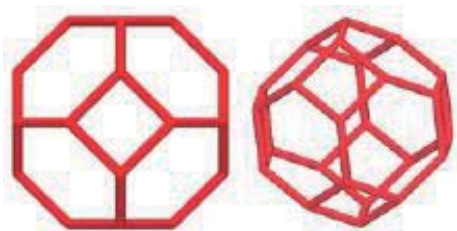


Fig.1 Kelvin14 面体構造

2.2 試験サンプル

サンプルサイズは 30mm 角の立方体とした。試験時の挙動を観察し易くするためセル構造径は実際のポリウレタンフォームより大きく 10mm とし、サンプル内に 27 個 (3x3x3) 配置される。骨格太さは 0.8mm, 1.0mm, 1.2mm, 1.5mm の4水準各1個ずつ設定した (Fig.2)。

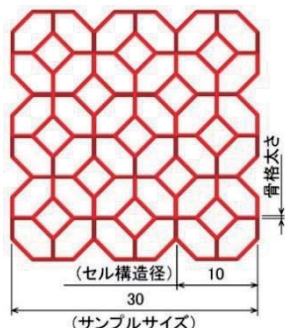


Fig.2 試験片の構造とパラメータ

既存ポリウレタンフォームと比較するため、自社製で硬度水準の違う6種類の配合処方サンプル（ウレタン A～F）を 100mm 厚の元サンプルから 30mm 立方体に切出して作成した。また、肉厚方向のばらつきを考慮し、厚さ方向の上中下からそれぞれ1個ずつ3個のサンプルを配合処方毎に用意した。今回使用したサンプルの外観写真を Fig.3 に示す。

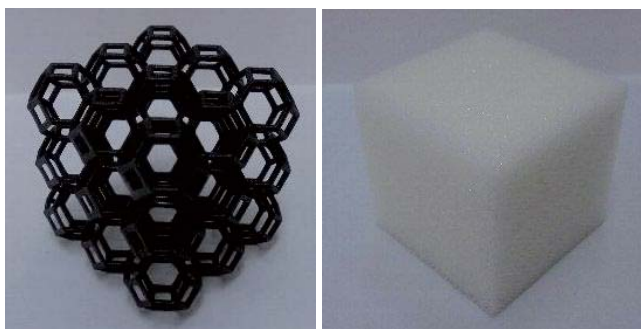


Fig.3 試験片外観

（左：3D プリント造形品、右：ポリウレタンフォーム）

2.3 造形

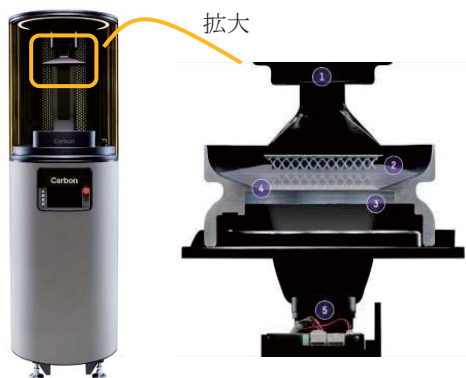


Fig.4 使用した 3D プリンタ Carbon 社『M2』
（左：全体像、右：造形室の拡大図）

造形には Fig.4 に示す米国 Carbon 社製 3D プリンタ『M2』⁵ を用い、樹脂は EPU (Elastomeric Poly Urethane) を用いた。

3. サンプル計測

測定方法は 2020 年度 4DFF 発表に基づく手法⁶を用いた。3D プリンタ造形と自社製ポリウレタンフォームサンプルに対し、サンプルの密度とともにヤング率の計測を行った。Fig.5 に装置および試験の様子を示す。

3.1 計測機器

計測は押し込み型硬さ試験機、YAWASA MSES-5012-1-SL (テック技販, 京都) と電子天秤 (エー・アンド・デイ社, EW-1500i), 電子ノギス (Mitutoyo, CD-15AX) を用いて行った。

3.2 計測条件

標本は平坦な面の上に乘せられ、圧力センサーに球面上のプロブ (外径 20mm) を取り付け、この状態から、0.5mm/s の一定速度で、標本の中央部に対して 2N に達するまで荷重をかけた。Fig.5 では、計測前の造形サンプルと最大荷重付近での変形を示す。また、造形物の密度は、電子天秤を用いて造形物の重量を測定し、外形寸法を電子ノギスで測定した三辺より体積を求め、空隙を含んだかさ密度を算出した。

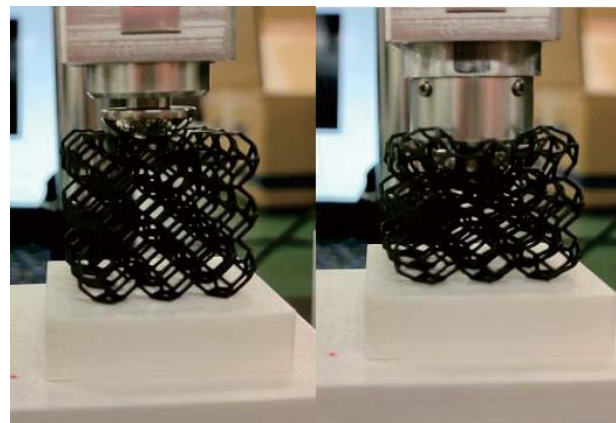


Fig.5 テック技販社『YAWASA』測定装置と試験の様子
（左：計測開始時、右：最大荷重付近）

3.3 ヤング率算出方法

各3D プリント造形サンプルおよび自社製ポリウレタンフォームサンプルに対して5回ずつ測定実験を行い、線形領域が保たれる 0.5-1.5N の計測区間を用いてヤング率を算出し、平均値を計測結果とした。

4. 計測結果と考察

測定実験より得られたサンプル密度-ヤング率プロットを Fig.6 に示す。ポリウレタンフォーム (図中ウレタン A～F) の密度は約 40～90[kg/m³]、ヤング率は 10～

110[kPa]の範囲で分布しており、サンプル切出し位置に応じてばらつきを持つことも確認できた。3D プリント造形サンプルの密度は $40 \sim 140[\text{kg}/\text{m}^3]$ で骨格太さに準じて増加、ヤング率は $4 \sim 90[\text{kPa}]$ で概ね密度に対して線形に増加した。

既存ポリウレタンフォームに比べ3D プリント造形品は低ヤング率で、より低硬度のクッション材を実現できる可能性が示唆された。また、骨格をより太くすることで、高硬度域も実現可能と考える。さらに、1つの構造体の中に複数種類の硬度を持つ形状を任意に分布させることも可能であり、クッション材の機能向上や設計自由度向上も期待できる。

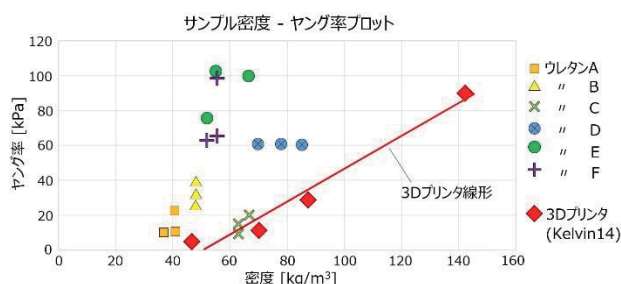


Fig.6 サンプル密度-ヤング率プロット

Fig.7 に今回の測定結果を 2020 年度 4DFF 発表⁶で示された Ashby Map に追加した図を示す。ポリウレタンフォームは図中赤枠の領域で、既存 Foams 材の低ヤング率領域と近いことが確認された。また3D プリント造形品は図中青枠の領域であり、今回の試験方法では4サンプル中3つが低ヤング率側でフォーム材料の領域から離れていることが確認できる。このことから今回設計した 3D プリントサンプルは従来のフォーム材料では再現できない密度とヤング率を持つことが分かり、新たな機械特性を持つ材料を設計しうることが Ashby Map を用いて確認できた。

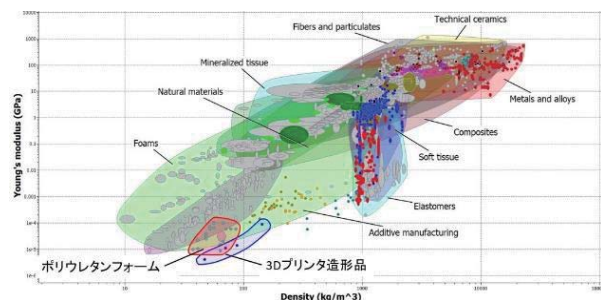


Fig.7 試験結果を追加した密度-ヤング率 Ashby Map

5. 結論

ヤング率計測の結果により、3D プリント製クッション材がポリウレタンフォーム同等の特性を再現できるとともに、これまで得られなかった特性を実現できる可能性が示唆された。研究結果の Kelvin14 面体適用事例として、Fig.8 に示す着座可能な 3D プリント製クッション材によるレーシングシートを作製した。

本報告内容は弾性域のヤング率のみだが、クッション材の特徴を表す機械特性は幅広く、ヤング率の他にも座屈域・ヒステリシス・動的特性など様々な指標で表される。研究結果の一部は新たな価値を測る試験方法の提案、および各特性を利用した製品開発やその普及に貢献するものと考えられる。



Fig.8 Kelvin14 面体を用いたレーシングシート
(着座面全てのクッション材が 3D プリント造形品)

参考文献

1. adidas, "4DFWD: DATA-DRIVEN 3D PRINTED PERFORMANCE TECHNOLOGY DESIGNED TO MOVE YOU FORWARD", <https://news.adidas.com/running/4dfwd--data-driven-3d-printed-performance-technology-designed-to-move-you-forward/s/514baddb-1029-4686-abd5-5ee3985a304a/>, accessed 2021-09-23.
2. CARBON, "Riddell Partners with Carbon® to Produce First-Ever 3D Printed Football Helmet Liner", <https://www.carbon3d.com/news/press-releases/riddell-carbon-produce-football-helmet/>, accessed 2021-09-23.
3. Fizik, "Adaptive-3d Printed Road Bike Saddle", https://www.fizik.com/eu_en/drops/adaptive.html, accessed 2021-09-23.
4. M. Ashby, "Designing Architected Materials", Scripta Materialia, 68(1), pp. 4-7(2013). <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.04.033>, accessed 2021-09-23.
5. Carbon, "M2 3D プリント", <https://jsr3dprint.com/carbon3d/hardware/424/>, accessed 2021-09-23.
6. 岡崎太祐, 浅野義弘, 櫻井智子, 常盤拓司, 仲谷正史, 田中浩也「Ashby map を用いた 3DPrint 可能な architected structures の特性把握」Conference on 4D and Functional Fabrication 2020, OP-02

ショーケース会場、ライトニングトーク・表彰式 入場と聴講について

以下のセッションはZoomではなく、バーチャル会場oViceで実施します。

- ・ショーケース：研究成果と議論(&協賛団体展示説明)
- ・ライトニングトーク
- ・表彰式&Closing Remark

10月29日(金) 15:55-16:50

10月29日(金) 16:50-17:20

10月29日(金) 17:20-17:35

会場への入場

10月29日は15:55になりましたらZoomを退出し、下記方法に従ってバーチャル会場oViceに入場してください。コンファレンス終了まで、この会場ですべてのセッション、イベントを実施します。

バーチャル会場oViceのURLは

<https://sig4dff2021.ovice.in/lobby/enter>

です。最初の画面(図1)でオーディオ、カメラデバイスを設定してください(カメラの設定は必須ではありません)。次に名前を入力し[入場]をクリックして入場してください(図1)。他の参加者との円滑なやり取りのためお名前は、名前@所属のように記載してください。

(例：藤井@慶応大SFC)。

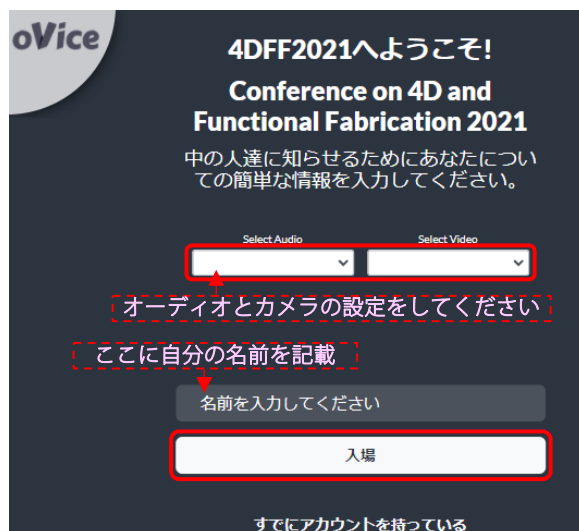


図1 ログイン画面

会場内の移動と参加者とのコミュニケーション

入場すると会場が投影され、自分のアバターが会場左上に登場します。

マウス左ボタンで自分のアバターを掴んで会場内を移動します。他の参加者と会話可能範囲が重なると(グレーの円が重なると)、重なった人同士で会話ができます(図2)。相手に近づくほど大きな声で聞こえます。

画面下のメニュー(図3)で必ずマイクをONにしましょう。その他メニューにあるカメラは初期設定ではOFFになっています。実行委員から指示されるまでカメラはOFFでお願いします。



図2 参加者同士の会話

挙手と拍手

自分のアバターの位置と異なる位置を左クリックし、キーボードから

hand と入力すると挙手、

clap と入力すると拍手(音声付)をすることができます。

ショーケースの聴講方法、ライトニングトークの参加方法等、その他会場での操作方法については、操作説明書をお読みください。操作説明書は以下にあります。

http://www.sig4dff.org/images/4dff2021_ovice.pdf



図3 画面下のメニュー

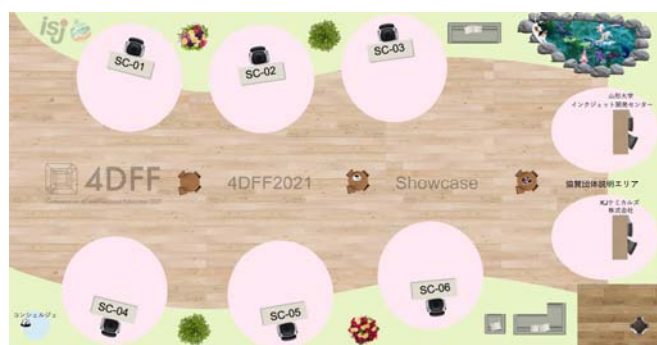


図4 ショーケース会場



図5 ライトニングトーク・表彰式会場

4DFF2021 実行委員会

実行委員長

渡邊 恵太 (明治大学)

副実行委員長

藤井 雅彦 (inkcube.org/慶應義塾大学SFC研究所)

実行委員

常盤 拓司 (慶應義塾大学)

青木 まゆみ (慶應義塾大学)

古賀 洋一郎 (株式会社3D Printing Corporation)

湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

高橋 茂樹 (山形大学)

市原 政喜 (市原国際特許事務所)

木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

山岡 潤一 (慶應義塾大学)

竹内 達夫 (日本画像学会)

ショーケース会場提供：**oVice**

予稿集発行日(予稿公開日)

2021年10月26日



慶應義塾大学SFC研究所
ファブ地球社会



(一社)日本画像学会