

Conference on 4D and Functional Fabrication 2025

— New Paradigm over 3D Technology —

2025年10月23日(木) 09:10 - 17:45

2025年10月24日(金) 09:00 - 18:25

京都工芸繊維大学 60周年記念館 / オンライン開催

主催 (一社)日本画像学会 4DFF研究会

共催 京都工芸繊維大学 KYOTO Design Lab

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

4DFF2025 Time Table

October 23 (Thu.), 2025

	オンライン (Zoom)	京都工芸繊維大学 60 周年記念館 Kyoto Institute of Technology 60th Anniversary Hall	
		1F メイン会場 / 1F Main Venue	2F 会場 / 2F Venue
09:10	開会挨拶 / Opening Remark		
09:20	基調講演 / Keynote Speech		
10:10	Session 1	新しい表現・造形方法による価値創出 1 Value Creation through New Method of Expression and Creation 1	
11:15	Session 2	新規材料の提案と材料特性 1 Proposal of New Materials and Material Properties 1	
12:20	Lunch (60min.)		
13:20	Session 3	新しいメカニズム・ユニーク構造 1 New Mechanism and Unique Structures 1	
14:25	Session 4	特性解析と価値評価 Performance Analysis and Value Evaluation	
15:30	Session 5	新規材料の提案と材料特性 2 Proposal of New Materials and Material Properties 2	
16:20	Session 6	4DFF のためのデザイン手法・モデリングツール Design Method and Modeling Tools for 4DFF	
17:40	実行委員会からのお知らせ / Information from Committee		
18:00			懇親会 Social Gathering
19:30			

October 24 (Fri.), 2025

	オンライン (Zoom)	京都工芸繊維大学 60 周年記念館 Kyoto Institute of Technology 60th Anniversary Hall	
		1F メイン会場 /1F Main Venue	2F 会場 / 2F Venue
08:30			デモ/ポスター準備 Demo/Poster Preparation
09:00	実行委員会からのお知らせ / Information from Committee		
09:05	招待講演 / Invited Speech		
09:35	Session 7	新しい表現・造形方法による価値創出 2 Value Creation through New Method of Expression and Creation 2	
10:40	Session 8	新しいメカニズム・ユニーク構造 2 New Mechanism and Unique Structures 2	
12:00	Lunch (75min.)		
13:15	協賛団体活動紹介 / Activities Introduction of Organizations Sponsoring SIG-4DFF		デモ/ポスター準備 Demo/Poster Preparation
13:35	デモ/ポスター: ショートプレゼンテーション / Demo/Poster: Short Presentation		デモ/ポスター: 展示説明 Demo/Poster: Exhibition and Explanation
14:50			
16:20	特別講演 / Special Talk		
16:35	Session 9	社会実装に向けた試み Trials for Social Implementation	
17:50	ライトニングトーク / Lightning Talk		
18:10	表彰式と閉会挨拶 / Award Ceremony and Closing Remark		

Conference on 4D and Functional Fabrication 2025

~ New Paradigm over 3D Technology ~

- Technical Program -

October 23 (Thu.)

10 月 23 日(木)

09:10 - 09:20

Opening Remark

開会挨拶

Kazutoshi TSUDA (Kyoto Institute of Technology), General Chair of 4DFF2025

4DFF2025 大会実行委員長 津田 和俊 (京都工芸繊維大学)

09:20 - 10:10

Keynote Speech

基調講演

KN-01

EXPO 2025: Current Status and Future Prospects and Utilization of 3D/4D at Expo 2025 Osaka/Kansai

EXPO 2025 大阪・関西万博における 3D/4D 活用の現状と今後の展望

Hiroya TANAKA

田中 浩也

(Keio University)

(慶應義塾大学)

1

10:10 - 11:10

Session 1

Value Creation through New Method of Expression and Creation 1

新しい表現・造形方法による価値創出 1

Session Chair: Yuuta NAKANO (Mitsubishi Chemical Corporation)

座長: 中野 雄太 (三菱ケミカル株式会社)

10:10 Melt Electrowriting 3D Printing of Biobased Polymers

OP-01 Melt Electrowriting 3D Printing of Biobased Polymers

Huaizhong XU

Huaizhong XU

(Kyoto Institute of Technology)

(Kyoto Institute of Technology)

3

10:25 The Design of Memory Experiences Using Sound and Clay 3D Printing

OP-02 音と Clay3D プリンタを用いた記憶体験のデザイン

Kai Haruta¹, Mizuki Ito², Yuta Uchida³, Kentaro Saito⁴, Ryuma Shineha¹, Junichi Yamaoka¹

(¹Keio University, ²Ceramic artist, ³Nagoya Zokei University, ⁴FabCafe Nagoya Ltd)

春田 凱¹, 伊とう みずき², 内田 悠太³, 齊藤 健太郎⁴, 標葉 隆馬¹, 山岡 潤一¹

(¹慶應義塾大学大学院, ²陶芸作家, ³名古屋造形大学, ⁴株式会社 FabCafe Nagoya)

5

10:40 Anyone Can Create 'Foam Art' — Development and Application of 3D Food Printing Technology for Three-Dimensional Foam Structures

OP-03 誰でも“泡アート”——3D フードプリンターによる立体泡造形技術の開発と応用展開

Airi KAGAMI¹, Hidemitsu FURUKAWA²

(¹Yamagata University, ²Yamagata Graduate School of Science and Engineering)

鏡 愛理¹, 古川 英光²

(¹山形大学, ²山形大学大学院)

9

10:55 Perovskite solar cells maximize the use of inkjet method, which allows non-contact application of each layer in a "3D stacked structure" of four different types of solvent-based inks.

OP-04 ペロブスカイト太陽電池は 4 種類の異種溶剤性インクを 4 層に積層する「積層 3D 構造体」で各層を非接触塗布できるインクジェット工法が最大に活躍する

Tomohiro YAMAZAKI

山崎 智博

(Y-Drive CO., LTD.)

(株式会社ワイドライブ)

13

11:15 - 12:00

Session 2

Proposal of New Materials and Material Properties 1

新規材料の提案と材料特性 1

Session Chair: Shigeki TAKAHASHI (Yamagata University)

座長: 高橋 茂樹 (山形大学)

- 11:15 Research on SLS 3D-print molding for fire retardant decorative building materials
OP-05 環境配慮型の難燃性軽量低コスト壁面装飾建材を実現する3Dプリンター成形用粉体材料の開発
 Mazuka Kimura¹, Hiroaki Ito², Takeshi Semba², Yuzo Okudaira³, Tatsuya Tanaka³
 (¹FES Inc., ²Kyoto Municipal Institute of Industrial Technology and Culture, ³Doshisha University)
 木村 真束¹, 伊藤 彰浩², 仙波 健², 奥平 有三³, 田中 達也³
 (¹FES 株式会社, ³京都市産業技術研究所, ³同志社大学) 17
- 11:30 Creation of hollow gel structures through buoyancy and sedimentation control: Development of P-DN gel molding technology for 4D printing
OP-06 浮力と沈降制御による中空構造ゲルの創出—4D プリンティングに向けた P-DN ゲルの造形技術開発
 Sora KOMATSU, Hidemitsu FURUKAWA (Yamagata University)
 小松 宙央, 古川 英光 (山形大学) 21
- 11:45 Fabrication Method of Temperature-Responsive Hydrogels using Uniaxial Extensional Flow for Improving the Functionality of Soft Actuators
OP-07 ソフトアクチュエータの機能性向上に向けた一軸伸長流れによる温度応答性ハイドロゲルの造形手法の構築
 Masaki FUKUDA¹, Hakuto NAKAHATA², Shoto SEKIGUCHI², William Kai Alexander WORBY², Yuta KURASHINA², Yoshiyuki TAGAWA²
 (¹Tokyo University of Agriculture and Technology, ²Graduate school of Tokyo University of Agriculture and Technology)
 福田 真生¹, 中畑 伯斗², 関口 翔斗², ウォービーウィリアム海アレクサンダー², 倉科 佑太², 田川 義之²
 (¹東京農工大学, ²東京農工大学大学院) 25

- 12:00 Session 1&2 Authors Interview
 Session 1&2 オーサーズインタビュー(OP-01～OP-07)

13:20 - 14:05

Session 3

New Mechanism and Unique Structures 1

新しいメカニズム・ユニーク構造 1

Session Chair: Takashi TAKENOUCI (Mitsubishi Chemical Corporation)

座長: 竹之内 崇 (三菱ケミカル株式会社)

- 13:20 Direct Ink Writing 3D Printing for Coral Reef Restoration
OP-08 Direct Ink Writing 3D プリンタを活用した珊瑚礁の再生
 Daisuke NAGATOMO¹, Chisaki KITAJIMA², Kazuya SAITO² (¹National Taiwan Normal University, ²Kyushu University)
 長友 大輔¹, 北島 千朔², 斉藤 一哉² (¹国立台湾師範大学, ²九州大学) 29
- 13:35 Fabrication of Hyperbolic Plane Models Constructed from Zippered Annular Strips
OP-09 ジッパーを取り付けた円環型の帯による負曲率曲面模型の作成
 Tamami YAMASAKI, Kanata WARISAYA, Tomohiro TACHI (The University of Tokyo)
 山崎 玲美, 割鞘 奏太, 舘 知宏 (東京大学大学院) 31
- 13:50 Additive Manufacturing of High-resolution Poly(butylene succinate) Scaffolds via Melt Electrowriting
OP-10 Additive Manufacturing of High-resolution Poly(butylene succinate) Scaffolds via Melt Electrowriting
 Tong Sun, Liu Yang, Simon Luposchinsky, Huali Lu, Shinichi Yagi, Huaizhong Xu (Kyoto Institute of Technology)
 Tong Sun, Liu Yang, Simon Luposchinsky, Huali Lu, Shinichi Yagi, Huaizhong Xu
 (Kyoto Institute of Technology) 35
- 14:05 Evaluation of Evaporative Cooling Structures Using Wood Powder-Containing Filaments
OP-11 木粉含有フィラメントによる気化冷却構造の評価
 Kazuki Yoshida, Hidemitsu Furukawa (Yamagata University)
 吉田 和生, 古川 英光 (山形大学) 39

14:25 - 14:55

Session 4

Performance Analysis and Value Evaluation

特性解析と価値評価

Session Chair: Junichi YAMAOKA (Keio University)

座長: 山岡 潤一 (慶應義塾大学)

- 14:25 Precision-Controlled Elastic Poly(L-lactide-co-ε-caprolactone) Scaffolds via Melt Electrowriting
OP-12 Precision-Controlled Elastic Poly(L-lactide-co-ε-caprolactone) Scaffolds via Melt Electrowriting
 Liu YANG, Huaizhong XU, Shinichi SAKURAI (Kyoto Institute of Technology)
 Liu YANG, Huaizhong XU, Shinichi SAKURAI (Kyoto Institute of Technology) 43
- 14:40 Directional Dependence of Stiffness in Origami-Based Mechanical Metamaterials
OP-13 折り紙に基づくメカニカルメタマテリアルが示す剛性の方向依存性
 Daiki Ueda¹, Kenji Minesugi², Kosei Ishimura¹, Hiromi Yasuda² (¹Waseda University, ²Japan Aerospace Exploration Agency)
 植田 大樹¹, 峯杉 賢治², 石村 康生¹, 安田 博実² (¹早稲田大学, ²宇宙航空研究開発機構) 45
- 14:55 Three-Dimensional Structure of the Spines and Epidermis of the Spot-fin Burrfish
OP-14 イシガキフグの棘および表皮の立体構造
 Joichiro Nogi¹, Yuta Shimoda¹, Tendo Tomoya¹, Tetsuro Morita², Kazuya Saito³, Tomohiro Tachi¹
 禾 丈一郎¹, 下田 悠太¹, 天童 智也¹, 森田 哲朗², 斉藤 一哉³, 館 知宏¹
 (¹The University of Tokyo, ²Tokyo University of Marine Science and Technology, ³Kyushu University)
 (東京大学, ²東京海洋大学, ³九州大学) 49

- 15:10 Session 3&4 Authors Interview
 Session 3&4 オーサースインタビュー(OP-08～OP-14)

15:30 - 16:15

Session 5

Performance Analysis and Value Evaluation

新規材料の提案と材料特性 2

Session Chair: Yutaka TOKUDA (KDDI Research, Inc.)

座長: 徳田 雄嵩 (KDDI 総合研究所)

- 15:30 Proposal for Additive Manufacturing Technology Tailored to Regional Agriculture -Development of Additive Manufacturing
 Using Rice Husk and Rice Flour Paste, and a Surface Coating Method Using Mycelium-
OP-15 地域農業に寄り添った積層造形技術の提案-粃殻と米粉ペーストを活用した積層造形
 および菌糸体による表面被覆技術の開発-
 Kohei MORIMOTO¹, Kazutoshi TSUDA² (¹Nagaoka Institute of Design., ²Kyoto Institute of Technology)
 森本 康平¹, 津田 和俊² (¹長岡造形大学, ²京都工芸繊維大学) 53
- 15:45 Investigation of Okara Upcycling through 3D Food Printing for Sustainable Ingredient Development
OP-16 Investigation of Okara Upcycling through 3D Food Printing for Sustainable Ingredient Development
 Chia-Yi Lin¹, Jian-You Li¹, Tzi-Jung Wang², Tsuei-Ju Hsieh² (¹National Yang Ming Chiao Tung University, ²National Tsing Hua University)
 Chia-Yi Lin¹, Jian-You Li¹, Tzi-Jung Wang², Tsuei-Ju Hsieh²
 (¹National Yang Ming Chiao Tung University, ²National Tsing Hua University) 57
- 16:00 Keratin-derived biomaterials for corneal bioprinting
OP-17 Keratin-derived biomaterials for corneal bioprinting
 Leon Balters, Stephan Reichl (Technische Universität Braunschweig)
 Leon Balters, Stephan Reichl (Technische Universität Braunschweig) 61

16:20 - 17:20

Session 6

Design Method and Modeling Tools for 4DFF

4DFF のためのデザイン手法・モデリングツール

Session Chair: Masaki ICHIHARA (M.ICHIHARA & ASSOCIATES)

座長: 市原 政喜 (市原国際特許事務所)

16:20	Fundamental Technology of creating files for 3D printing using voxels format FAV		
OP-18	ボクセルファイル形式 FAV を使った 3D 造形用ファイル生成の基礎技術		
	Jun YAMAZAKI ¹ , Osamu MIZUNO ²	(¹ The University of Tokyo, ² tetraface Inc.)	
	山崎 淳 ¹ , 水野 修 ²	(¹ 東京大学, ² 株式会社テトラフェイス)	63
16:35	A design method for elastic structures with catenary structures in material extrusion		
OP-19	材料押出法におけるカテナリー構造を有する弾性構造体の設計手法		
	Ryosuke NAKAHARA ¹ , Toshikatsu KIUCHI ²	(¹ Kyoto Institute of Technology, Graduate School, ² Kyoto Institute of Technology)	
	中原 稜将 ¹ , 木内 俊克 ²	(¹ 京都工芸繊維大学大学院, ² 京都工芸繊維大学)	67
16:50	3D-Printed Adjustable Thoracolumbar Brace Based on Customized Body Measurements, Featuring Front-to-Back Donning, Using a Parametric and Web-Based Design Approach		
OP-20	3D-Printed Adjustable Thoracolumbar Brace Based on Customized Body Measurements, Featuring Front-to-Back Donning, Using a Parametric and Web-Based Design Approach		
	Kai Ting Chien, Jian-You Li	(National Yang Ming Chiao Tung University)	
	簡 愷廷, 李 建佑	(陽明交通大學)	71
17:05	Scan to Renew: A Mobile LiDAR and Generative AI Workflow for Simulating Urban Heritage Alternatives		
OP-21	Scan to Renew: A Mobile LiDAR and Generative AI Workflow for Simulating Urban Heritage Alternatives		
	Meng SUN, Masahiro KINOSHITA	(Kyoto Institute of Technology)	
	Meng SUN, Masahiro KINOSHITA	(京都工芸繊維大学)	75
17:20	Session 5&6 Authors Interview		
	Session 5&6 オーサーズインタビュー(OP-15～OP-21)		

17:40 - 17:45

Information from Committee

実行委員会からのお知らせ

Masahiko FUJII (Keio University Institute at SFC), Vice Chair of 4DFF2025

4DFF2025 大会副実行委員長 藤井 雅彦 (慶應義塾大学 SFC 研究所)

October 24 (Fri.)
10 月 24 日(金)

09:00 - 09:05

Information from Committee
実行委員会からのお知らせ

Ryohei YUASA (Keio University), Vice Chair of 4DFF2025
 4DFF2025 大会副実行委員長 湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

09:05 - 10:35

Session 7

Value Creation through New Method of Expression and Creation 2
新しい表現・造形方法による価値創出 2

Session Chair: Ryohei YUASA (Keio University)
 座長: 湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

09:05 - 09:35

Invited Speech
招待講演

IN-01	The Idea of ShinKogei 新工芸について Hiroshi MITACHI 三田地 博史	(Shinkougeisha) (新工芸舎) 79
--------------	---	-------------------------------------

09:35 OP-22	Considerations for 3D printing of hollow foods using edible support materials 可食サポート材による中空構造食品の 3D 造形実現に向けた検討 Ikumu FUJITA, Hidemitsu FURUKAWA 藤田 生夢, 古川 英光	(Yamagata University) (山形大学) 81
-----------------------	--	---

09:50 OP-23	Soft Block Molding with Adjustable Porous Flexibility 柔軟性が調整可能な多孔質ソフトブロックによるやわらか造形手法 Mitsuhito ANDO, Tomoya YOSHINAGA, Haruo NOMA 安藤 潤人, 吉永 智哉, 野間 春生	(Ritsumeikan University) (立命館大学) 85
-----------------------	--	---

10:05 OP-24	High-resolution 2D Printing of Complex Fiber-based Patterns Using Melt Electrowriting High-resolution 2D Printing of Complex Fiber-based Patterns Using Melt Electrowriting Lu Huali, Huaizhong XU Lu Huali, Huaizhong XU	(Kyoto Institute of Technology) (京都工芸繊維大学) 89
-----------------------	--	---

10:20 OP-25	Large-scale robotic clay 3D printing of porous structures for creating macrobiotic living environments 多孔質構造を用いた微生物生息環境の創出のための大規模ロボットによる粘土 3D プリンティング Gergely Peter BARNÁ ¹ , Bénédicte JACOBS ² , Kazutoshi TSUDA ¹ , Thomas ORTIZ ³ (1Kyoto Institute of Technology, 2Larbitssisters, 3Fungicha) Gergely Peter BARNÁ ¹ , Bénédicte JACOBS ² , Kazutoshi TSUDA ¹ , Thomas ORTIZ ³ (1Kyoto Institute of Technology, 2Larbitssisters, 3Fungicha)	91
-----------------------	--	-----------

10:40 - 11:40

Session 8

New Mechanism and Unique Structures 2
新しいメカニズム・ユニーク構造 2

Session Chair: Yoichiro KOGA (Promethean)
 座長: 古賀 洋一郎 (プロメシアン株式会社)

10:40 OP-26	Form-Making and Creative Support with Spatial Puzzles Composed of Plank Materials 平面板による空間的パズルを用いた立体造形と創作支援 Yahui LYU, Junwei AO, Shuai SHAO 呂 亜輝, 敖 俊偉, 邵 帥	(fofo lab) (フォフォラボ) 95
-----------------------	---	----------------------------------

10:55 OP-27	Design and Evaluation of Twin-Deformation Phase-Transforming Metamaterial Dampers: Toward Applications for Seismic Vibration Damping 双晶変形型相転移メタマテリアルダンパー設計と評価: 地震振動減衰への応用に向けて Yuichiro KOIZUMI ¹ , Sei HIROOKA ¹ , Masayuki OKUGAWA ¹ , Yuhon LIU ¹ , Hiroto KAWABATA ¹ , Lei WANG ¹ , Hisatoshi KASHIWA ¹ , Shiori TANIGUCHI ¹ , Takaharu NAKANO ² (¹ Graduate School of Engineering, The University of Osaka, ² Institute of Integrated Research, Institute of Science Tokyo) 小泉 雄一郎 ¹ , 廣岡 勢 ¹ , 奥川 将行 ¹ , 柳 玉恒 ¹ , 川端 弘俊 ¹ , 王 雷 ¹ , 柏 尚稔 ¹ , 谷口 詩織 ¹ , 中野 尊治 ² (¹ 大阪大学大学院, ² 東京科学大学) 99
11:10 OP-28	Self-Adjusting 4D Sealing with Tough and Flexible Double Network Gels 柔軟でつよく、液体にやさしい——DN ゲルを用いた自己調整型 4D ゲルシール Haruto YAMAZAKI Hidemitsu FURUKAWA 山崎 春翔, 古川 英光 (Yamagata University) (山形大学) 103
11:25 OP-29	Out-of-plane rotation of parallel-cut paper 平行切り込み切り紙の面外回転 Chisato IEKI, Tomohiro TACHI 家木 千里, 舘 知宏 (The University of Tokyo) (東京大学) 107
11:40	Session 7&8 Authors Interview Session 7&8 オーサーズインタビュー(OP-22~OP-29)

13:15 - 13:35

Activities Introduction of Organizations Sponsoring SIG-4DFF 4DFF 研究会協賛団体活動紹介

KJ Chemicals Corporation
KJ ケミカルズ株式会社

Yamagata University Inkjet Development Center
山形大学インクジェット開発センター

MadeHere K.K.
株式会社 MadeHere
(旧株式会社 3D Printing Corporation)

Mitsubishi Chemical Corporation
三菱ケミカル株式会社

ITOKI CORPORATION
株式会社イトーキ

13:35 - 14:50

Demo/Poster: Short Presentation デモ / ポスター: ショートプレゼンテーション

Host: Junichi YAMAOKA (Keio University)
司会: 山岡 潤一 (慶應義塾大学)

DP-01	Practical Production of Upcycled Musical Instruments Using Digital Fabrication デジタルファブリケーションを活用したアップサイクル楽器の制作実践 Karin NAKAYAMA, Ako SUZUKI, Honoka KUBO, Nanaka YONEZU, Suzuka KAWANO, Tomohiro INOUE, Norikazu TAI, Kazutoshi TSUDA (Kyoto Institute of Technology) 中山 華琳, 鈴木 杏子, 久保 歩風, 米津 七日, 川野 涼香, 井上 智博, 田井 則一, 津田 和俊 (京都工芸繊維大学) 111
DP-02	Design and development of a homemade 3D printer equipped with a new support structure 新しい支持構造を搭載した自作 3D プリンタの設計開発 Kosei HORITA ¹ , Hiroyuki MATSUMOTO ² 堀田 晃靖 ¹ , 松本 宏行 ² (¹ Graduate School of Technologists, ² Institute of Technologists) (¹ ものづくり大学大学院, ² ものづくり大学) 115
DP-03	Generative Tectonics: A Dialogue Between Code and Clay ジェネラティブ・テクトニクス: コードと土の対話 Yuko ISHIZU ¹ , Junichiro HORIKAWA ² , Tomohiro INOUE ² , Iumi NOBORIO ² , Haruka IWAMI ² 石津 優子 ¹ , 堀川 淳一郎 ² , 井上 智博 ² , 登尾 育海 ² , 岩見 遙果 ² , (¹ GEL Inc., ² Kyoto Institute of Technology) (株式会社 GEL, 京都工芸繊維大学) 117

- DP-04** Social practice of precious plastics x Digital Fabrication
 プレシヤスプラスチック×デジタルファブリケーションの社会実践
 Kaito YOSHIZAWA¹, Tomohiro INOUE² (1Kyoto Institute of Technology, 2KYOTO Design Lab)
 芳澤 海飛¹, 井上 智博² (1 京都工芸繊維大学, 2KYOTO Design Lab) 121
- DP-05** A Novel 3D Printing Technique for Fabricating Lightweight and High-Stiffness Structures through Optimized Infill Distribution Based on Stress Analysis
 応力解析を用いたインフィル効率化による軽量・高剛性 3D プリント手法
 Tomohiro TANIGUCHI¹, Misuzu YADA¹, Hiroya TANAKA² (1Keio University Graduate School, 2Keio University)
 谷口 朝洋¹, 矢田 美涼¹, 田中 浩也² (1 慶應義塾大学大学院, 2 慶應義塾大学) 125
- DP-06** Scented 3D Printing Materials Derived from Food Waste and Their Potential Applications
 食品廃棄物を原料とする, 香りを有した 3D プリント材料とその応用先の開拓
 Kawai WONG¹, Ruruka YOSHIDA², Takumi TORII¹, Hiroya TANAKA² (1Keio University Graduate School, 2Keio University)
 黄 家慧¹, 吉田 るる花², 鳥居 巧¹, 田中 浩也² (1 慶應義塾大学大学院, 2 慶應義塾大学) 129
- DP-07** Proposal for Perishable Concrete Using Salt to Evoke Awareness of Material Temporal Change
 素材の時間変化への関心を引き出す, 塩を用いた朽ちやすいコンクリートの提案
 Hinata HIRASHITA, Oh HIRANO, Hiroya TANAKA (Keio University)
 平下 ひなた, 平野 央, 田中 浩也 (慶應義塾大学) 133
- DP-08** A Density-Based Control Method for Underwater Behavior of Structures and Mechanisms Using Component-Wise Design
 水中での構造物や機構の挙動を部品ごとの密度設計により制御する手法
 Ryoma KATO, Issey TAKAHASHI, Tomoko HASHIDA (Waseda University)
 加藤 遼真, 高橋 一成, 橋田 朋子 (早稲田大学大学院) 137
- DP-09** The MEWron: Open-source Melt Electrowriting
 The MEWron: Open-source Melt Electrowriting
 Simon Luposchinsky, Paul D. Dalton², Huaizhong Xu¹ (1Kyoto Institute of Technology, 2University of Oregon)
 Simon Luposchinsky¹, Paul D. Dalton², Huaizhong Xu¹ (1Kyoto Institute of Technology, 2University of Oregon) 141
- DP-10** InThread: Enabling Co-Creation Through Interactive Weaving
 InThread: インタラクティブな織りを通じた共創の実現
 Innamia INDRIANI, Akira KATO, Junichi YAMAOKA (Keio University, Graduate School of Media Design)
 インナミア インドリアニ, 加藤 朗, 山岡 潤一 (慶應義塾大学大学院) 143
- DP-11** Bending-Torsional Buckling Analysis of Elastic-Ribbon Polygonal Units
 弾性リボン多角形ユニット座屈の曲げ・ねじれ解析
 Kaoru AOKI, Rinki IMADA, Tomohiro TACHI (University of Tokyo)
 青木 馨, 今田 凜輝, 館 知宏 (東京大学) 147
- DP-12** High-Stacked Fabrication and Morphological Control of Large-Volume Tubular Scaffolds via Melt Electrowriting (MEW) Technology
 Melt Electrowriting(MEW)技術を用いた大容量チューブ状スキヤフォールドの高積層造形と形状制御
 ZHANG XIAOYU, XU HUAIZHONG (Kyoto Institute of Technology)
 張 嘯宇, 徐 淮中 (京都工芸繊維大学) 151
- DP-13** Deployment Mechanism of Radial Slit Sliceform Structure
 放射状スリット型スライスフォームの展開機構
 Ryohei YUASA, Tomohiro TACHI (University of Tokyo)
 林 清人, 館 知宏 (東京大学) 153
- DP-14** Investigation of 3D reconstruction of terrain and architectural structures from LiDAR scanner data
 LiDAR スキャナで取得したデータによる地形や建築構造物の 3D 化の検討
 Yuuki Iwata, Norihiro Kumasaka, Runa Takei, Tatsuhiko Hoshino, Takayuki Uchida (Tokyo Polytechnic University)
 岩田 悠希, 熊坂 憲広, 武井 琉奈, 星野 龍彦, 内田 孝幸 (東京工芸大学) 157
- DP-15** Development of Organic Formwork using Fabric and 3D Printing
 布と 3D プリントによる有機形状型枠の開発
 Minchin WANG¹, Jiei KAWAI², Takumi TORII¹, Misuzu YADA¹, Tomohiro TANIGUCHI¹ (1Graduate school of Keio University, 2Keio University, 3DigitalArchi Co., Ltd.)
 汪 明靖¹, 河合 慈英², 鳥居 巧¹, 矢田 美涼¹, 谷口 朝洋¹, 松岡 康友³, 田中 浩也² (1 慶應義塾大学大学院, 2 慶應義塾大学, 3 株式会社 DigitalArchi) 161
- DP-16** Learning Beyond the Classroom: Empowering Students' Future through Fabrication
 教室を越境する学び —ファブリケーションで拓く生徒の未来—
 Shu Yamamoto^{1,2} (1Seigakuin Junior & Senior High School, 2Seigakuin Education Design Development Center)
 山本 周^{1,2} (1 聖学院中学校・高等学校, 2 学校法人聖学院教育デザインセンター) 165

- DP-17** Non-electric Wearable Soft Actuator with a Modular Pneumatic Supply System and Kink Valve
 モジュール型空気圧供給システムとキンクバルブによる無電力ウェアラブルソフトアクチュエータ
 Yutaka TOKUDA¹, Yang YIZHOU², Jiaxin ZHU², Junichi YAMAOKA² (¹KDDI Research, Inc., ²Keio University Graduate School)
 徳田 雄嵩¹, 楊 屹洲², 朱 佳昕², 山岡 潤一² (株式会社 KDDI 総合研究所, ²慶應義塾大学大学院) 169
- DP-18** Electronic Structure Analysis for Atom-Mimicking Metamaterials
 新しい原子模倣メタマテリアルのための電子構造解析
 Yui TERAMOTO, Masayuki OKUGAWA, Yuichiro KOIZUMI, Shigenobu OGATA (The University of Osaka)
 寺本 雄飛, 奥川 将行, 小泉 雄一郎, 尾方 成信 (大阪大学) 173
- DP-19** Foldable Space-Filling Modular Puzzle
 折り変形と空間充填が可能なモジュールパズルの提案
 Kentaro SO, Tomohiro TACHI (The University of Tokyo)
 宗 賢太郎, 舘 知宏 (東京大学) 177
- DP-20** From Photos to Chocolate: Integrating Environmental Context in Personalized Hybrid Gifts via Chocolate 3D Printing
 写真からチョコレートへ: チョコレート 3D プリントによる環境コンテキストを取り入れたハイブリッドギフトの提案
 Yakun NIE, Kazuhiro JO (Kyushu University)
 聂 雅琨, 城 一裕 (九州大学) 181
- DP-21** Fabrication of Periodic Ceramic Cellular Structures Using Digital Fabrication and Slip Casting Techniques
 デジタルファブリケーション技術と泥漿鋳込みによる周期的セラミックセル構造体の製造
 Soichiro UEDA, Kazuya SAITO (Kyushu University)
 植田 宗一郎, 斉藤 一哉 (九州大学) 185
- DP-22** A Context-Aware Interactive LED Decoration System Driven by Image Generation AI
 画像生成 AI によるインタラクティブ LED 加飾システムの提案
 Jiro NAKAJIMA, Ryohei HATANO (TOPPAN Digital Inc.)
 中島 次郎, 波多野 亮平 (TOPPAN デジタル株式会社) 187

14:50 - 16:20

Demo/Poster: Exhibition and Explanation

デモ / ポスター: 展示・説明

(Venue Only)
 デモ/ポスターは会場のみ

(DP01~DP22 and Sponsor Organization)

16:20 - 17:35

Session 9

Trials for Social Implementation

社会実装に向けた試み

Session Chair: Masahiko Fujii (Keio University Institute at SFC)

座長: 藤井 雅彦 (慶應義塾大学 SFC 研究所)

16:20 - 16:35

Special Talk

特別講演

- ST-01** Risk and Protection of Design Product
 デザイン制作のリスクと保護
 Masaki ICHIHARA (M. ICHIHARA & ASSOCIATES)
 市原 政喜 (市原国際特許事務所) 191

- 16:35
OP-30 New Movements Opened by "Vibration x Flexibility"-- Design of a Four-Directional Soft Actuator and the Possibilities of 4D Response
 振動×柔軟性でひらく新たな動き——四方向移動ソフトアクチュエータの設計と 4D 的応答の可能性
 Ko Shimizu¹, Hidemitsu FURUKAWA² (¹Yamagata University, ²Yamagata Graduate School of Science and Engineering)
 清水 康央¹, 古川 英光² (¹山形大学, ²山形大学大学院) 193

- 16:50
OP-31 3D-Printed Facade Design and Construction for the Toilet "Mirage of the Island" at the Osaka-Kansai Expo
 大阪関西万博におけるトイレ「島の蜃気楼」の 3D プリント外装材の設計・製造から施工まで
 Azusa TAZUMI, Ryo SUMI, Shoko IKEMOTO, Naoki TAGAWA (ND3M)
 田住 梓, 鷺見 良, 池本 祥子, 田川 直樹 (ND3M) 197

- 17:05 Development of Recycled Materials for Pellet-Based 3D Printers from Egg Packs and Their Application in Local Community Circulation
OP-32 卵パック由来のペレット式 3D プリンタ用リサイクル材料開発と地域内循環への展開
 Misuzu YADA¹, Jiei KAWAI², Yoshihiko SHIRAISHI¹, Takumi TORII¹, Ryohei YUASA¹, Masaki ARAI¹, Hiroya TANAKA²
 (¹Keio University Graduate School, ²Keio University)
 矢田 美涼¹, 河合 慈英², 白石 慶彦¹, 鳥居 巧¹, 湯浅 亮平¹, 荒井 将来¹, 田中 浩也²
 (¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学) 201
- 17:20 How can we get more people to discover the appeal of 3D printers?
OP-33 3D プリンターの魅力を多くの人に知ってもらうには?
 Kenta NAGAI, Shu YAMAMOTO (SEIGAKUIN JUNIOR & SENIOR HIGH SCHOOL)
 永井 健太, 山本 周 (聖学院中学校・高等学校) 205

17:35 Session 9 Authors Interview
 Session 9 オーサーズインタビュー(ST-01, OP-30～OP-33)

17:50 - 18:10

Lightning Talk
ライトニングトーク

Host: Mayumi AOKI (Keio University)
 司会: 青木 まゆみ (慶應義塾大学)

18:10 - 18:25

Award Ceremony and Closing Remark
表彰式と閉会挨拶

Masahiko FUJII (Keio University Institute at SFC), Vice Chair of 4DFF2025
 4DFF2025 大会副実行委員長 藤井 雅彦 (慶應義塾大学 SFC 研究所)

4DFF 研究会協賛団体

- | | | | |
|---|--|--|---|
| 1 |  KJ Chemicals | KJ Chemicals Corporation
KJ ケミカルズ株式会社 | https://www.kjchemicals.co.jp/ |
| 2 |  山形大学
Yamagata University | Yamagata University Inkjet Development Center
山形大学インクジェット開発センター | https://inkjet.yz.yamagata-u.ac.jp/yz-ijc/ |
| 3 |  MadeHere | MadeHere K.K.
株式会社 MadeHere
(旧株式会社 3D Printing Corporation) | https://www.3dpc.co.jp/ |
| 4 |  MITSUBISHI
CHEMICAL
GROUP | Mitsubishi Chemical Corporation
三菱ケミカル株式会社 | https://www.mcgc.com/index.html |
| 5 |  ITOKI
明日の「働く」を、デザインする。 | ITOKI CORPORATION
株式会社イトーキ | https://www.itoki.jp/ |

Speaker 講演者紹介

基調講演 Keynote Speech



Hiroya TANAKA (Professor, Environment and Information Studies, Keio University)

田中 浩也 (慶應義塾大学 環境情報学部 教授)

2003 年京都大学 COE 研究員, 2004 年東京大学生産技術研究所助手を経て, 2005 年より慶應義塾大学環境情報学部専任講師. 2008 年より同准教授, 2016 年より同教授. 2010 年マサチューセッツ工科大学建築学科客員研究員.

2012 年慶應大学 SFC 研究所ソーシャルファブリケーションラボ設立・代表. 2011 年ファブラボ鎌倉設立. 2013 年第 9 回世界ファブラボ会議(横浜)実行委員長. 2013 年経済産業省「新ものづくり検討委員会」委員. 2013 年総務省「ファブ社会の展望に関する検討委員会」座長. 2014 年 経済産業省「新ものづくりネットワーク構築支援事業」委員. 2014 年総務省「ファブ社会の基盤設計に関する検討委員会」座長.

専門は 3D とネットワークを結び付けた創造性支援であり, より具体的にはデジタルファブリケーションの可能性を先駆的に探究している. 大阪万博 2025 日本館内「ファクトリーエリア」常設展示制作を主担.

招待講演 Invited Speech



Hiroshi MITACHI (Director, Shinkougeisha)

三田地 博史(新工芸舎 主宰)

京都工芸繊維大学/大学院でデザインを学んだ後, 株式会社キーエンスで製品デザイン業務に従事. その後, 株式会社 YOKOITO でデジタルファブリケーションを中心とした研究活動・自社商品開発を行い, 2020 年に新工芸舎を立ち上げ, 2023 年に法人化. デジタルファブリケーションが生み出す, コンピュータとアナログ世界の境界面に現代におけるモノの在り方を模索する. 平成元年生まれ.

EXPO 2025 大阪・関西万博における 3D/4D 活用の現状と今後の展望

PEXPO 2025: Current Status and Future Prospects and Utilization of 3D/4D
at Expo 2025 Osaka/Kansai

田中 浩也

Hiroya TANAKA

慶應義塾大学

Keio University

【要約】

2025 年日本国際博覧会（「大阪・関西万博」）では、食品から建築までさまざまな 3D プリンタが活用されています。そのようななか、慶應義塾大学 KGRI 環デザイン&デジタルマニュファクチャリング創造センターでは、「3D プリンタの“動きそのもの”を見せる」ことをコンセプトに、エス.ラボ株式会社、株式会社放電精密加工研究所、株式会社 Digital Archi らと共創し、日本政府館ファクトリーエリアでの常設展示制作（「双鶴」）を担当しました。

本講演では、その舞台裏を紹介し、また藻類を活用したスツールのコンセプトから設計・製造までの過程を振り返ります。さらに、今回の万博でできたこと、できなかったことを整理したうえで、3D プリンティング/4D プリンティング技術の全体のさらなる発展可能性を考えてみたいと思います。

【Summary】

In the 2025 Japan International Expo (“Osaka-Kansai Expo”), a variety of 3D printers has been used for everything from food to architecture. Under such circumstances, Keio University Digital Manufacturing and Design Research Center for Emergent Circularity, based on the concept of “showing the movement of the 3D printer itself,” collaborated with S. Labo Co. Ltd., HODEN SEIMITSU KAKO KENKYUSHO Co., Ltd. and DigitalArchi Co., Ltd. to create a permanent exhibition (双鶴 “Soukaku”) in the factory area of the Japanese Government Pavilion.

In this presentation, I will take you behind the scenes and look back at the process of creating the algae-based stool, from concept to design and manufacturing. Furthermore, I would like to summarize what was done and what was not done at the Expo and consider the further development potential of 3D printing/4D printing technology as a whole.

Melt Electrowriting 3D Printing of Biobased Polymers

Huaizhong XU

Kyoto Institute of Technology

【Abstract】

Melt electrowriting (MEW) is an advanced 3D printing technology to process high-resolution scaffolds. Although MEW has printed many biobased polymers, the printability for most of them is low. This report aims at improving the printability of poly(L-lactic acid) (PLLA), poly(D,L-lactic acid) (PDLLA), and poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) during the MEW process. To this end, the printability regarding jet lag angle and critical translation speed is investigated; the print limitations of the polymers are discovered; and tensile tests of the scaffolds are carried out. As a result, scaffolds with high resolution, low interfiber distance, and high layers can be printed.

Keywords: 3D, high resolution, biobased polymer, printability

1. Introduction

Melt electrowriting (MEW) is an additive manufacturing technology that allows for the printing of microfiber-based tissue engineering scaffolds¹. Although more than 40 different materials have been printed by MEW, only poly(ϵ -caprolactone) (PCL) gained great success for its high printability from the aspect of low glass transition temperature ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) and melt temperature ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$). However, the weaknesses of PCL include low modulus, long degradation period, and low bioactivity. Poly(lactic acid) (PLA) is another significant biobased polymer, widely applied in tissue engineering and regenerative medicine. PLA has a high modulus and a relatively short degradation period, while stable printing of PLA or PLA-related copolymers by MEW is a great challenge due to their low thermal stability. The objective of this work is long-term and stable MEW printing of poly(L-lactic acid), poly(D, L-lactic acid), and poly(lactic-co-glycolic acid), and determining their processing window.

2. Experimental

Medical-grade poly(L-lactic acid) (PLLA) with a molecular weight of 130,000 g/mol, and poly(D, L-lactic acid) (PDLLA) with a D-to-L ratio of 50/50 and molecular weight of 130,000 were supplied by Musashino Ltd. Co. (Tokyo, Japan). Medical-grade poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) with an L-to-G ratio of 50/50 and molecular weight of 130,000 was purchased from BMG, Inc. (Kyoto, Japan). All the polymers were dried sufficiently before use.

Custom-built melt electrowriting (MEW) devices were used to produce planar scaffolds and tubular scaffolds. The MEW device contains a pressure-based feeding system, a heating system, a high-voltage system (Dong-wen High Voltage, Co., Ltd.), a translation system (COMS Co., Ltd.), and a collection system. The printing parameters are shown as follows: 25G, 27G, and 30G

nozzle size, 1~4 mm nozzle-to-collector distance, 2~5 kV applied voltage, 50~200 kPa Nitrogen pressure, 150~200 $^{\circ}\text{C}$ print temperature, 2~20 mm/s translation speed. The printing process was conducted at a room temperature of 22~23 $^{\circ}\text{C}$ with a relative humidity of 34%~36%.

3. Conclusion

Figure 1 shows the results of MEW of PLLA. We can print large quantities of scaffolds with large dimensions since the jet lag angle can be kept larger than 0° for 24 hours. Also, we can print scaffolds with nonlinear patterns since the jet lag angle can be kept stable for 15 hours.

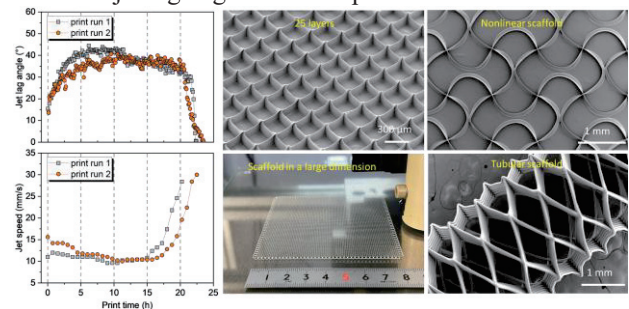


Fig. 1. Melt electrowriting of poly(L-lactic acid).

Figure 2 shows the results of MEW of PDLLA. For long-term printing, reducing the jet speed can greatly slow down the change of jet speed, extending the processing window. PDLLA scaffold with an interfiber distance of 100 μm can be printed for 100 layers.

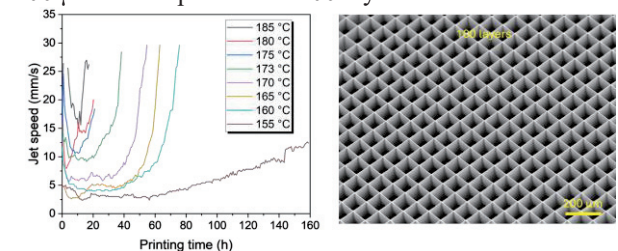


Fig. 2. Melt electrowriting of poly(D,L-lactic acid).

Figure 3 shows the results of MEW of PLGA. PLGA scaffolds of large volume and large dimensions can be printed since the PLGA jet is stable for approximately 24 hours. All fibers are tightly stacked with each other due to the low viscosity of the PLGA melt.

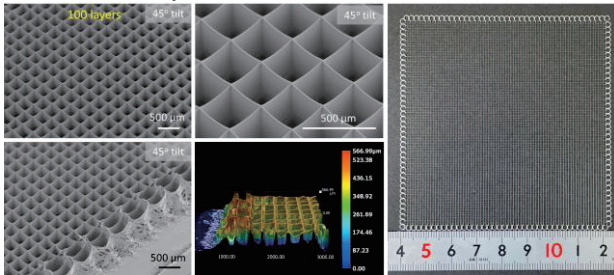


Fig. 3. Melt electrowriting of poly(lactic-co-glycolic acid).

Reference

1. Robinson, T. M.; Hutmacher, D. W.; Dalton, P. D. "The Next Frontier in Melt Electrospinning: Taming the Jet", *Advanced Functional Materials* (2019), 29 (44), pp. 1904664.

音と Clay 3D プリンタを用いた記憶体験のデザイン

The Design of Memory Experiences Using Sound and Clay 3D Printing

春田 凱¹, いう みずき², 内田 悠太³, 斉藤 健太郎⁴, 標葉 隆馬¹, 山岡 潤一¹

Kai Haruta¹, Mizuki Ito², Yuta Uchida³, Kentaro Saito⁴, Ryuma Shineha¹, Junichi Yamaoka¹

¹慶應義塾大学大学院, ²陶芸作家, ³名古屋造形大学, ⁴株式会社 FabCafe Nagoya

¹Keio University, ²Ceramic artist, ³Nagoya Zokei University, ⁴FabCafe Nagoya Ltd

【要約】

本研究は、個人にとって特別な音を陶器へ写像し、データ-モノ-記憶の関係を再設計するデザイン手法を提案する。本研究は、本手法をデジタルと手仕事を横断する工芸的实践として位置づける。参加者は家族の声や自然音等を録音し、波形・時間的特徴を器の断面・表面テクスチャに写像し、Clay 3D プリンタで成形した。制作 (make) - 使用 (use) - 語り (talk) で構成するワークショップにより、完成後の触知と日常使用が物語想起と由来の共有を促すことを観察した。本手法は、保存・展示偏重から、使用・触知・語りで価値が更新される“低解像度のかたち”への転換を志向する。

キーワード: 音, Clay 3D プリンタ, データフィジカル化, 記憶, 工芸, ワークショップ

【Abstract】

This study proposes a design approach that maps personally meaningful sounds onto ceramic vessels, reconfiguring the data-object-memory relationship. We position the approach as a craft practice that bridges digital fabrication and handwork. Participants recorded family voices and ambient sounds; waveform and temporal features were mapped to vessel cross-sections and surface texture, then fabricated with a Clay 3D printer. Through a make-use-talk workshop, we observed that tactile engagement and everyday use after completion prompted narrative recall and sharing of provenance. The approach aims to shift from a preservation/display bias toward “low-resolution forms” whose value is renewed through use, touch, and talk.

Keywords: sound, clay 3D printing, data physicalization, memory, craft, workshop

1. 序論

本研究は、個人に固有の音(家族の声・環境音・演奏等)を Clay 3D プリンタにより陶器形状へ写像する生成手法と、その実装を前提とする日常使用志向の体験設計を提示する。情報過多の時代において、音は保存対象として蓄積される一方、日常の使用において記憶を自発的に喚起し、他者との語りを誘発する媒体へと十分に昇華していない。従来は写真・動画中心の保存実践(アーカイブ/再生)に依拠してきたが、日常文脈における自発的想起と語りの誘発という観点で機能が限定的であった[1]。

Jansen ら[2]は、データ・フィジカライゼーションの分野で、データを物理的表現へ具現化し理解・探究・コミュニケーションを支える枠組みとして位置づけた。その為、展示・鑑賞文脈に主眼が置かれる例も少なくない。音のフィジカライゼーションに関しては Desjardins らによる ListeningCups[3]が、日常音データを磁器カップに触知的テクスチャとして埋め込み、語り(data stories)を促す事例を報告している。一方で, Abdelkade ら[4] は、セラミックス3Dプリンティングの方式・材料・後処理を整理し、工芸的応用の可能性も示している。

本研究は、これらの系譜を踏まえつつ、音を日用品としての器へ写像し、使う行為そのものを起点に“使用-想起-語り”の循環を成立させることを目的とする。

2. コンセプト

本研究のコンセプトは、個人の音を陶器という日用品へ写像し、作る(making)-使う(using)-語る(storying)の循環として記憶とモノとの新たな関係を設計する点にある。音は感情・時間・関係性を帯びた個人データであり、Clay 3D プリンタはその特徴量(時間的包絡、周波数成分)を形状・テクスチャへと連続的に転換できる。さらに、器は日常に置かれ、触れられ、用いられる媒体であるため、鑑賞中心の提示ではなく使用を起点とする想起と語りの誘発が期待できる。この姿勢は、データを物理的に表現して理解・対話を促すというデータ・フィジカライゼーションの知見[2]と、音データの触知的提示を示した ListeningCup[3]に接続しつつ、鑑賞/展示から使用・触知・語りへ重心を移す点に新規性を置く。個人的なフィジカライゼーションでは制作・使用・省察が深く絡み合い、日常への“置かれ方”自体が省察を支えることが示されている[5]。

この循環は、(i) 土を練る(素材への身体的没入)、(ii) 音データの採取(個人的記憶の抽出)、(iii) 音から形へ生成・焼成(時間包絡→外形/周波数→テクスチャ)、(iv) 使用・共有(日常使用と提示)、(v) 対話・再解釈(物語の更新)という五つの連続相から構成される(Fig. 1)。併せて、本研究はデジタル生成と手仕事の往還を設計原理として採用する。仮説は、自身の音を写

像した器への触れを通じて想起が促進され、語りが誘発されることである。これにより、アーカイブ／再生中心の保存観を、参加と使用に根差した関与的な記憶実践へと転換する。

コンセプトデザイン

Clayを媒介に、音データを陶器に変換する体験の設計

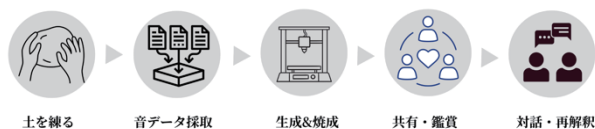


Fig. 1. Concept design of making-using-storying cycle

体験設計は、記憶から音を選び(録音・抽出)、音が形へ変わる過程を目視・触察で理解し、完成後に他者と使い見せ合うことで、「どの音のどの瞬間がこの形を生んだのか」を語り合う流れとして定義する。制作前後の記述や対話を併置し、器を介したやり取りが個人の物語を再解釈し、コミュニティへ開いていくよう設計している。また、陶芸家との対話から、Clay 3D プリンタを工芸の道具として位置づけ、素材・技法・感情をつなぐ枠組みとして活用できること、新旧の価値を対立させず新たな価値創出に向けて統合できることを得た。さらに専門実践でも、Clay 3D プリンタは効率化より創造的可能性と概念的含意が前面化することが指摘されている[6]。

3. 構造

3.1 システム構成

本システムは、音から器形状を生成する処理系と、Clay 3D プリンタへの出力系から構成する。入力音声ファイル(WAV 等)である。時間領域では、音の大きさの変化(包絡)を抽出し、最小・最大半径の範囲に線形写像して半径関数を得る。この半径関数を極座標に配置して回転させ、器の外形を生成する。造形限界を超える急峻な形状を避けるため、上限・下限の制約と平滑化を併用し、焼成時の収縮はスケーリングで補正する。

周波数領域では、音を短い区間に分割して各区間の帯域エネルギーを求め、これを外形に沿う表面テクスチャの振幅として再配置する(Fig. 2)。

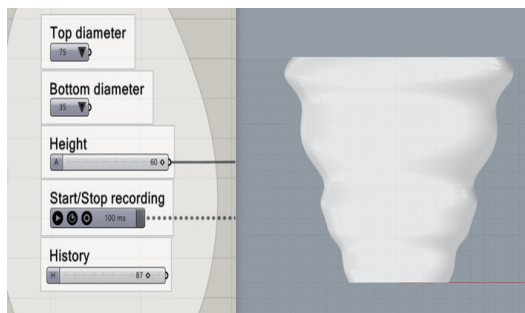


Fig. 2. Volume-to-shape interface

テクスチャの周方向の繰り返し回数(空間周波数)と

開始位置(位相)は造形パラメータとして設定し、音の強さは主として凹凸の振幅に反映させる。生成した外形は層ピッチごとに押し出して積層し、各層にテクスチャを適用する(Fig. 3)。

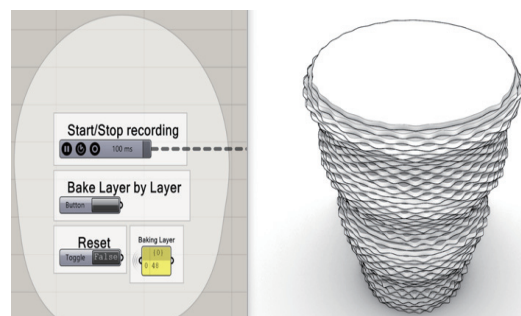


Fig. 3. Spectrum-to-texture interface

粘土の安定性を確保するため、振幅の上限設定と局所的な平滑化を施し、ノズル径・層ピッチ・押出量は粘土の可塑性と含水率に応じて調整する。最終的な形状はスライサでツールパス(G-code 等)に変換して出力する。処理の流れは、音量の変化を外形に、周波数の強さを表面の凹凸に対応させ、層ごとに適用した後に出力するというものである。実験では、層ピッチ 0.8-1.2 mm, 凹凸振幅 0.5-2.0 mm の範囲を主に用いた。

3.2 ワークショップ体験プロセス

本ワークショップは 2 回構成で実施した。目的は、参加者が自分の音を器へと具現化し、完成品を実際に使いながら自然に語れる場をつくることである。

第 1 回(作る体験)では、趣旨説明と同意手続きの後に、陶芸作家によるレクチャーを受ける。とくに美濃の土の特性(粒度、水分、焼成後の発色や収縮)について説明を受け、実際に土練を行って手を動かしながら、重さ・湿り気・可塑性を確認する。参加者は 2 通りとした: 当日に録音する参加者と、あらかじめ録音を持参する参加者である。持参者は整音・トリミングから開始し、当日録音の参加者は静かな環境で収録する。その後は共通で、操作画面を用いて「音量の変化＝外形」「周波数の強さ＝表面の凹凸」という対応を確認しつつ、半径の上限・下限、層ピッチ、凹凸の振幅、周方向の繰り返し回数や開始位置を調整する。短い試作片を触って確かめたうえで最終形状を決定し、Clay 3D プリンタで成形して乾燥・焼成工程へ回す。

第 2 回(使う・語る体験)では、焼成済みの器を受け取り、手触り・重さ・口当たりを確認したのち、茶を淹れて実際に用いる。参加者同士で器を交換し、縁や胴などの部位を指さしながら由来となる音の瞬間を示し合う。交換と見せ合いは、日常的な比較・会話を喚起するという報告とも符合する[1]。続いて、次の観点に沿ってディスカッションを行う: ①音の由来と背景, ②誰が・どの場面で・どのように使うか(自分／家族／贈呈など), ③新し

い工芸のあり方として本作品をどのように使用し位置づけていくか(使用シーン／共有の仕方／継続性等).最後に、ディスカッションとともに半構造化インタビューを行い、今後の使用計画をアンケートに記して終了する。

以上の 2 回により、制作と使用の体験がひとつつながりとなり、個人の音が日常の会話のきっかけとして機能することを意図した。本プログラムは、通常の陶芸と異なり、自分の大切な音を層の設計情報として用いて土を積み上げ、個人の音データを日用品としての陶器へ写像する手法として位置づけられる。

4. 事例(ワークショップ実施と作品)

本ワークショップは FabCafe Nagoya にて実施した。参加者は 5 歳から 40 代までの 13 名であり、主としてものづくりに携わる参加者やデザイナーが中心であった。

はじめに、陶芸家によるレクチャーを行い、使用する土の基本的な扱い方および成形後に注意すべき要点を実演を交えて確認した。続いて、参加者は土練を行い、圧縮と切り返しを繰り返しながら質感・可塑性を触覚的に把握した(Fig. 4)。



Fig. 4. Participants kneading clay

音一形写像の工程では、持参あるいは当日に収録した音を簡単な整音(ノイズ除去・トリミング)で整え、操作画面上で「音量の時間変化を外形に、周波数成分の強さを表面テクスチャに対応づける」という規則を確認した。短い試作片を出力して触察し、半径の上限・下限、層ピッチ、凹凸の振幅、周方向の繰り返し回数・開始位相を調整して最終形状を決定した(Fig. 5)。

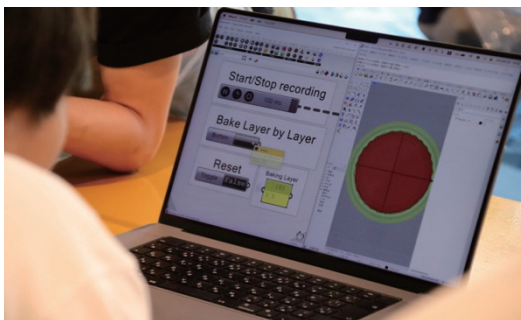


Fig. 5. Participants transforming sound into form

決定後は Clay 3D プリンタで成形し、乾燥・焼成工程へと回した。

使用・共有フェーズでは、実際に参加者が作った焼成済みの器を手に取り、口当たりや手触り確かめつつ簡単な抽出・試用を行った。(Fig. 6)

4.1 作品事例(Fig.6)

事例 1:ししおどしの音

参加者は、憧れていた庭の風景を手がかりに、ししおどしの「カタン」という一瞬の音を選択した。時間的包絡の急峻な立ち上がりを外形の張りとして、周波数成分の強弱を表面テクスチャとして反映した結果、短い衝撃の瞬間がかたちに残められた。静かな憧れを象徴する器として、落ち着いた使用場面(朝の茶など)を想定している。

事例 2:彼女のバイオリン

参加者は、恋人が奏でたバイオリンの生演奏を録音し、旋律のうねりを表面の連続的パターンとして写像した。外形はフレーズの緩急に合わせて緩やかに変化し、「君の音を見せたい」という意図が制作動機として明確に語られた。完成後は、食卓での使用や贈呈といった私的な共有の場面が想定された。



Fig. 6. Participant's work "Sound of Shishi-odoshi" (left) "Her Violin" (right)

4.2 ディスカッション

第 1 回では、(1) 音の由来と背景、(2) 誰が・どの場面・どのように使うか、(3) 新しい工芸のあり方として本作品をどのように使用し位置づけていくか、を軸に議論した。(Fig. 7) 特に、器を交換し指さして部位と音の瞬間を結び付けながら語る行為が、記憶の具体化と共有を促進することが確認された。



Fig. 7. Participants during workshop discussion

討議の具体的論点としては次が挙げられる。第 1 に、

写真・映像のように「開く」操作を介さず、手に取るだけで記憶が立ち上がるという実感が繰り返し述べられた。第 2 に、陶器は時間に耐える媒体として評価され、将来にわたって想起を誘うことが指摘された。第 3 に、想起は制作時よりも使用時(乾杯やサーブなど)に集中し、器の局所(縁・胴・テクスチャ)を指示しながら語る行為が会話の起点となっていた。これは手での構築と触知、および日常への配置が省察を支えるという知見とも整合する[5]。第 4 に、Clay 3D プリンタは手びねりやろくに連なる道具として受容され、人の判断や乾燥管理などのケアと両立する工芸性が確認された。第 5 に、データ上は複製可能であっても、土・湿度・気温などの条件により同一にならない差異が生じ、それが一意性の根拠として共有された。

5. 結論

本研究は、個人の音を日用品としての器へ写像する手法と体験設計を示し、制作(作る)と使用(使う)を連続させることで記憶の自発的想起と語りが立ち上がる状況を構成した。情報過多の現代では、写真や映像、音声が高解像度で記録・再生されることが当たり前になり、データは正確さと鮮明さを求められ、記憶すら“保存”の対象となっている。これに対し本研究は、あえて解像度を下げてデータを「ぼかす」ことで、音という個人的記憶を低解像度のかたちへ写像し、それを日用品として手に取る行為を通じて想起と語りを促す立場を取る。

器は視覚・触覚のメディアとして機能し、写真・映像のように“開く”操作を要せず、日常の所作の中で受動的に記憶を立ち上げる。完成した作品にどの音が込められているかは作者本人にしか分からないという秘匿性と、他者が形から物語を読み取り・問い返す曖昧性が共存し、それが会話を生む契機となる。Clay 3D プリンタは手仕事に連なる道具として位置づけられ、素材・作法・人の判断と併走しうること、また素材条件に由来する差異が一意性を支えることも示された。

今後の展開としては、曖昧な形状をオルゴールのように“弾く”ことで音を再立ち上げる触覚的インタラクション、振動スピーカによる共振、再構成音との連携、スキャンや QR 等によるメタデータ紐付けなどを構想している。保存のためにデータを固定するのではなく、思い出すきっかけとして形にするという方針が、記憶と語りをつなぐ新しい工芸の表現を開く可能性を示唆する。

参考文献

1. S. Stusak, A. Tabard, F. Sauka, R. A. Khot, A. Butz, “Activity Sculptures: Exploring the Impact of Physical Visualizations on Running Activity”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 20(12) (2014), pp.2201-2210.
2. Y. Jansen, P. Dragicevic, P. Isenberg, J. Alexander, A. Karnik, J. Kildal, S. Subramanian, K. Hornbæk, “Opportunities and Challenges for Data Physicalization”, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15) (2015), pp.3227-3236.
3. A. Desjardins, T. Tihanyi, “ListeningCups: A Case of Data Tactility and Data Stories”, Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference (DIS '19), Pictorials (2019), pp.147-160.
4. M. Abdelkader, S. Petrik, D. Nestler, M. Fijalkowski, “Ceramics 3D Printing: A Comprehensive Overview and Applications, with Brief Insights into Industry and Market”, Ceramics 7(1) (2024), pp.68-85.
5. A. Thudt, U. Hinrichs, S. Huron, S. Carpendale, “Self-Reflection and Personal Physicalization Construction”, Proceedings of CHI '18 (2018).
6. M. S. Lovato, J. Suina, J. Tso, C. Friedman-Gerlicz, A. Kaminsky, L. Buechley, “American Indian Pottery and Clay 3D Printing: An Exploration of Opportunities and Risks in Professional Practice”, Proceedings of CHI '25 (2025), 23 pp.

誰でも“泡アート”——3D フードプリンターによる立体泡造形技術の開発と応用展開

Anyone Can Create 'Foam Art' — Development and Application of 3D Food Printing Technology for Three-Dimensional Foam Structures

鏡 愛理¹, 古川 英光²

Airi KAGAMI¹, 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, ²Yamagata Graduate School of Science and Engineering

【要約】

近年、食の分野では演出やデザイン性への関心が高まっており、ラテアートやデザート装飾など、泡を用いた表現技術が注目されている。しかし、3D ラテアートなどの立体表現は熟練した職人の手作業に依存しており、自動で簡単に再現できる技術はまだ確立されていない。そこで本研究では、3D フードプリンター「FP-3000」を用いて泡を安定して印刷する手法の確立を目指している。粉末状の起泡剤を水に溶かして使用し、粉末濃度や砂糖などの安定剤の配合条件を変えながら、起泡性と印刷安定性を調査し、印刷を行った。

キーワード: 3D フードプリンター, 起泡剤, 泡造形, フードアート

【Abstract】

In recent years, increasing attention has been paid to presentation and design in the food field, and foam-based techniques such as latte art and dessert decoration have attracted considerable interest. However, three-dimensional expressions like 3D latte art still rely on the manual skills of trained artisans, and no technology has yet been established to reproduce them automatically. This study aims to establish a stable foam printing method using the 3D food printer “FP-3000.” A powdered foaming agent dissolved in water was employed, and its concentration and stabilizer conditions (e.g. sugar) were varied to investigate foamability and printing stability.

Keywords: 3D Food Printing, Foaming agent, Foam Fabrication, Food Art

1. 緒言

近年、食におけるデザイン性や体験性への関心が高まり、ラテアートやスイーツ装飾といった「泡」を用いた表現技術が注目されている。中でも 3D ラテアートは視覚的な楽しさがあり需要が高まっているが、現状は熟練した職人の手作業に依存しており、誰もが手軽に再現できる自動造形技術は確立されていない。また、既存の対応機器では造形の細かな調整を手動で行う必要があり、再現性や自由度にも課題がある[1]。そのような課題がある中、3D フードプリンター用の泡インクの研究なども行われており、3D フードプリンターによりアイデアやデザインを自由に表現できるが、食品泡は揮発性があり不安定というのが現状である[2]。

そこで本稿では、スクリュー式 3D フードプリンターを用いて立体泡造形を実現するための手法を検討した。手法として、粉末状の起泡剤を用いた食品泡を材料とし、ノズル径や吐出条件を調整しながら造形精度を評価した。評価方法は印刷物の全長を測定し、作成したモデルとの差異を比較する寸法精度と、時間経過による表面の変化や印刷の再現性などの安定性についての調査を行う。Fig.1 に本研究の概要図を示す。本研究の意義は泡を安定的に印刷する手法を確立し、技術や経験に左右されずに誰でも簡単に泡の立体造形や 4D 的演出を楽しめる環境の実現を目指すことである。

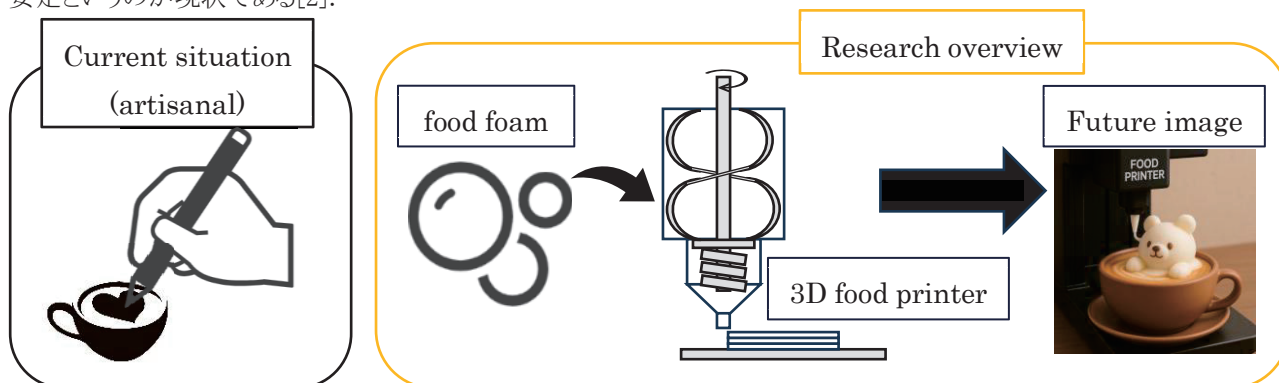


Fig 1. Research overview

2. 研究方法

2.1. 使用機器

使用した装置は「FP-3000」と呼ばれる 3D フードプリンターであり、吐出機構はスクリー式である。筒にインク材料を満たし、スクリーによって押し出すことで造形を行う。ノズル径は 1.2[mm]とし、3D フードプリンター「FP-3000」に泡を充填し印刷を行った。

2.2 使用材料

材料には粉末状の起泡剤を用い、水に溶かして攪拌させることで泡を生成した。さらに、泡の安定性を高めるため、砂糖および微細粒子の米粉を安定剤として添加し、配合比や攪拌時間を変化させながら検討を行った。Table 1 は起泡剤濃度が 3[%]の時の配合比を示す。

Table 1. Foam material ratio

Solution (concentration)	40[g] (3[%])
solvent	38.8[g]
solute	1.2[g]
sugar	16[g]
rice flour	6[g]
Stirring time	7[min]

2.3 造形比較のモデル

造形対象として「羽」を模したモデルを設計した (Fig. 2). これは、泡の特徴である軽量性を「羽」と結びつけたデザインコンセプトに基づくもので、モデルは fusion により作成した。モデルのサイズは、横 (X) 55.73[mm]、縦 (Y) 30.30[mm]、高さ (Z) 8.0[mm]である。

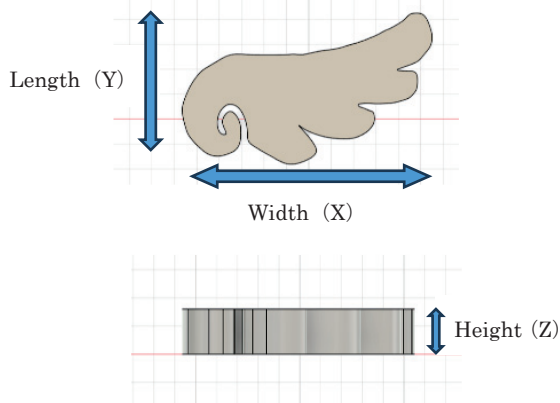


Fig. 2. Printed model

3. 実験

3.1 造形条件

STL ファイルから G-code 変換する際にノズル径を 2.0 [mm]に設定してスライスを行い、実際には 1.2[mm]径のノズルで印刷を行った。これは、泡材料が吐出後に広がる特性を考慮し、外観上の形状を安定させるためである。

3.2 造形物の寸法評価

寸法精度の評価には、比較的造形が安定した 3[%]濃度の結果を用いた。1[%]濃度では流動性が高く寸法が不安定となり、5[%]濃度では泡が固化して連続印刷が困難だったことが選定理由である。

Table 2 は印刷する際の押し出し倍率、レイヤー高さ、吐出係数、印刷速度などの条件を変化させ、まとめた表である。

横 (Width (X)), 縦 (Length (Y)), 高さ (Height (Z)) の寸法は ImageJ を用いて各方向を 5 回測定し、その平均値を寸法値とし、もとのモデルを基準として差異を比較する。

Table 2. Printing conditions

Sample Number	Extrusion Multiplier	Layer Height [mm]	Emission factor [%]	Printing speed [%]
①	10	1	100	100
②	10	1	100	75
③	10	1	150	100
④	10	1	150	75
⑤	10	1	200	100
⑥	10	1	200	75
⑦	15	0.6	100	100
⑧	15	0.6	100	75
⑨	15	0.6	150	100
⑩	15	0.6	150	75
⑪	15	0.6	200	100
⑫	15	0.6	200	75
⑬	15	1	100	100
⑭	15	1	100	75
⑮	15	1	150	100
⑯	15	1	150	75
⑰	15	1	200	100
⑱	15	1	200	75

3.3 起泡剤の安定性の評価

泡の安定性は、造形物の経過による外観観察で評価した。起泡剤濃度や吐出・速度といった印刷条件を変化させて印刷挙動を観察する。また、印刷後の造形物および未印刷の泡の経過による変化を比較する。数値化した定量評価は行っていないが、時間経過に伴う液化やひび割れの有無を観察することで安定性を評価した。

4. 結果・考察

4.1 寸法精度

Table 3 に水平方向の寸法値を示し、高さ方向については表面の凹凸によるばらつきが大きいので、寸法値に加え標準偏差および最大値を Table 4 に示した。

Table 3. Dimensional accuracy

Sample Number	X (difference) [mm]	Y (difference) [mm]
criterion	55.73	30.30
①	50.85(-4.88)	27.22(-3.08)
②	50.93(-4.8)	28.56(-1.74)
③	53.09(-2.64)	27.92(-2.38)
④	53.02(-2.71)	30.87(+0.57)
⑤	53.0(-2.73)	28.23(-2.07)
⑥	51.06(-4.67)	27.51(-2.79)
⑦	52.47(-3.26)	28.05(-2.25)
⑧	51.42(-4.31)	27.18(-3.12)
⑨	56.76(+1.03)	29.69(-0.61)
⑩	55.10(-0.63)	31.28(+0.98)
⑪	58.25(+2.52)	31.83(+1.53)
⑫	54.10(-1.63)	29.50(-0.80)
⑬	54.98(-0.75)	30.33(+0.03)
⑭	53.99(-1.74)	28.84(-1.46)
⑮	54.94(-0.79)	30.62(+0.32)
⑯	55.60(-0.13)	31.68(+1.38)
⑰	56.73(+1.0)	30.92(+0.62)
⑱	55.64(-0.09)	30.19(-0.11)

Table 4. Dimensional accuracy

Sample Number	Z (difference) [mm]	Standard deviation	Maximum [mm]
criterion	8.0		
①	8.46(+0.46)	0.76	9.32
②	8.13(+0.13)	0.48	8.67
③	8.90(+0.90)	0.59	9.57
④	8.43(+0.43)	0.46	9.00
⑤	9.64(+1.64)	0.66	10.29
⑥	8.55(+0.55)	0.65	9.44
⑦	9.97(+1.97)	0.88	11.40
⑧	9.36(+1.36)	0.57	10.20
⑨	8.97(+0.97)	0.45	9.37
⑩	8.93(+0.93)	0.34	9.36
⑪	8.79(+0.79)	0.79	10.74
⑫	8.34(+0.34)	0.30	8.62
⑬	10.37(+2.37)	0.70	11.07
⑭	8.97(+0.97)	0.44	9.55
⑮	8.41(+0.41)	0.43	8.78
⑯	9.48(+1.48)	0.50	9.98
⑰	9.23(+1.23)	0.37	9.65
⑱	8.62(+0.62)	0.52	9.23

寸法測定の結果、高さ方向ではすべての条件で設計値よりプラス側の差異が生じた。これは積層過程において泡がつぶれずに盛り上がる挙動を示したためと考えられる。一方、縦および横方向ではマイナス側の差異

が多く見られた。これは乾燥や収縮による影響だけでなく、ノズル径 2[mm]に設定したデータを泡の広がり考慮してノズル径 1.2[mm]で印刷を行ったが、予想より泡の広がりが弱く、結果として寸法が設計値より小さくなった可能性が高い。

また、条件別に見ると、押し出し倍率 15[%]の設定では 10[%]の場合に比べてプラス方向の差異が大きく、吐出量が形状再現性に大きく影響することが示唆された。さらに、吐出係数と印刷速度の組み合わせが(100,100)の条件では標準偏差が大きく、再現性が低下していた。これは流動と硬化のバランスが崩れやすい条件の可能性がある。以上の結果から、吐出係数と印刷速度の適切な組み合わせが形状再現性および寸法精度の向上に重要であると考えられる。

4.2 安定性

泡の安定性を検証したところ、泡の初期状態に依存しており、とくに起泡剤濃度が主な要因である可能性が示唆された。起泡剤濃度 5[%]で調製した泡は時間経過に伴い泡が固化し、連続印刷は困難であったが、印刷後 10 日以上形状を保持した(Fig. 3)。一方、濃度 1[%]で調製した泡は繰り返し印刷が可能であったものの、造形中に液化が進行し形状保持性に劣り、印刷後数日で液化した。したがって、起泡剤濃度は印刷物の長期安定性と印刷可能時間の双方に影響する主要因であると考えられる。



Fig. 3. Changes in foam-shaped objects over time (left: immediately after printing, right: 10 days later)

吐出係数が 50[%]など低い場合では供給不足により途切れやすくなり、係数が 300[%]など高い場合では安定性は向上したものの、泡の広がりによっては形状にひびつさが生じた。印刷速度が遅い場合にはノズルを伝って泡が落下し、速い場合には途切れやすくなるなど、造形の安定性に大きく影響することがわかった。

印刷後の経過を観察すると、印刷直後は滑らかな表面を有していたが、時間経過により表面にひび割れが生じた。これにより、印刷された泡造形物は一定の安定性を有するが、表面乾燥や収縮に伴う劣化が起ることが明らかとなった。

印刷物と未印刷の泡を比較したところ、印刷した造形物は 10 日経過後も液化せず、起泡構造を保持していた。一方、印刷に使用しなかった泡は時間の経過と

もに液化が進行した。これらの結果から、吐出条件だけでなく、スクリー式による攪拌や印刷というプロセスそのものが泡の安定化に寄与している可能性が考えられた。本研究での安定性評価は探索的な観察にとどまったため、今後は気泡径の測定や重量変化などの定量的な評価を導入し、安定性を客観的に検証する必要がある。

5. 二色造形

さらに応用として二色造形を行い、寿司のタコ刺身をモデルとした造形を行った。白色泡に加え、溶媒にコーヒーを用いた泡を作成し、色の異なる二種類の泡を積層して造形した。本研究における二色造形は、起泡剤濃度 3[%]の検討を行う以前に実施したものであり、当時は連続印刷のしやすさを優先して低濃度条件の 1[%]を選定した。Table 5 は白色泡とコーヒーを用いた黒色泡の配合比である。

Table 5. Foam material ratio

	White foam	Black foam
Solution (concentration)	40[g] (1[%])	50[g] (1[%])
solvent	0.4[g]	0.5[g]
solute	39.6[g]	49.5[g]
sugar	16[g]	20[g]
rice flour	6.0[g]	7.5[g]
Stirring time	9[min]	11[min]

その結果、タコの身と赤い縁取りを模した二色造形が可能であり、単色造形に比べて視覚的な再現性が向上した。しかし、印刷の安定性には課題が残った。印刷速度 130[mm/min]・押出値 10[%]の条件に固定して 7 回造形を行ったところ、造形が安定したのは 1 回のみであり、多くは泡が液化して形状を維持できなかった (Fig. 4)。特にコーヒーを溶媒とした泡は攪拌を繰り返しても安定せず、短時間で溶解した。

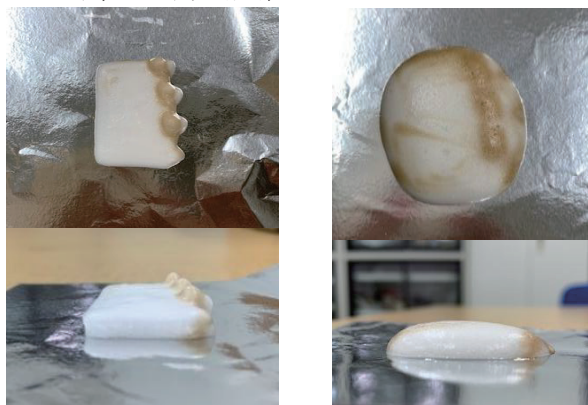


Fig. 4 Two-color modeling (success/failure)

今回、起泡剤濃度を 1[%]に設定したため泡が十分に安定せず、印刷の大部分が失敗に終わったと考えられる。今後は濃度を高める、あるいは印刷条件を最適

化させることで成功率を向上させる。また、コーヒーを用いた泡は通常の溶媒に比べて溶解がやや早く進行する傾向がみられ、この点が安定性低下の一因となった可能性がある。溶解そのものがある種の 4D 性とも言えるが、鑑賞し楽しむ程度の保持時間の確保は重要である。したがって、二色造形の実現には起泡剤濃度だけでなく、着色に用いる溶媒の特性も重要な要素であると考えられる。

6. 結言

今回 3D フードプリンターを用いて泡を材料とした立体造形を行い、その可能性を検討した結果、スクリー式の吐出機構と 1.2[mm]ノズルにより、泡を安定して積層することが可能であることを確認した。また、寸法精度の評価から、高さ方向では設計値よりも大きくなる傾向が見られる一方で、縦・横方向では小さくなる傾向が多く確認された。これは泡の広がり挙動や吐出条件に起因するものであり、適切な条件設定によって再現性の改善が期待される。

今後はより複雑な形状や二色造形の安定化に取り組み、多様な装飾表現や 4D 的な演出への応用を進めたいと考えている。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、「NEDO 先導研究プログラム／マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004)、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期／バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO) (JPNP23025)、JSPS 科研費 (基盤 A JP23H00498、JP25H00890、基盤 C JP24K12997、JP24K15231)、ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS511) 等によって支援を受けたものである。

参考文献

1. 株式会社タカラトミーアーツ「3D ラテメーカー アワタチーノ」(参照:2025.8.20)
<https://www.takaratomy-arts.co.jp/specials/awataccino/>
2. Amelia Yilin Lee et al., "Three-Dimensional Printing of Food Foams Stabilized by Hydrocolloids for Hydration in Dysphagia." International Journal of Bioprinting (2021), 7(4), pp.393, <https://doi.org/10.18063/ijb.v7i4.393>

ペロブスカイト太陽電池は4種類の異種溶剤性インクを4層に積層する 「積層3D構造体」で各層を非接触塗布できる インクジェット工法が最大に活躍する

Perovskite solar cells maximize the use of inkjet method, which allows non-contact application of each layer in a "3D stacked structure" of four different types of solvent-based inks.

山崎 智博

Tomohiro YAMAZAKI

株式会社ワイ・ドライブ

Y-Drive CO., LTD.

【要約】

本報告は、ペロブスカイト太陽電池を構成する4種類の異なる溶剤性インクを「積層3D構造体」で4層に積層するプロセスに関するもので、各層をインクジェットによる非接触塗布工法で枚葉印刷を実現する。異なる種類とは溶剤系インクに分散・溶解した半導体系・金属系・非プロトン系極性溶媒などを1層毎に結晶化・硬化しながら数層重ねて積層3D立体構造の半導体FETや発光素子や発電・受光素子が電氣的に機能する印刷工法を実現する。プリンテッドエレクトロニクスの分野である。非プロトン系極性溶媒に溶けた材料は、従来のインクジェット工法では塗布困難であったが、これらを克服するヘッドが販売されてきた。

キーワード: ペロブスカイト太陽電池, プリンテッドエレクトロニクス, 積層, 極性溶媒, インクジェット

【Abstract】

It relates to the process of layering four layers of four different types of solvent-based inks that constitute perovskite solar cells in a “stacked 3D structure”, where each layer is printed on a single substrate using a non-contact inkjet application method. The different types are semiconductor, metallic and non-proton polar solvents dispersed or dissolved in solvent-based inks, which are crystallised and hardened layer by layer to realise a printing process in which semiconductor FETs, light-emitting elements, power-generation and light-receiving elements in a stacked 3D structure function electrically. This is the field of printed electronics. Materials dissolved in non-proton polar solvents are difficult to apply using conventional inkjet methods, but heads that solve these problems have been marketed.

Key words: perovskite solar cells, printed electronics, lamination, polar solvents, inkjet

1. 概要

4DFFと異種溶剤性インク積層3D(立体)構造体。異なる種類の溶剤系インク(半導体・金属を含む)を1層毎に結晶化・硬化しながら数層重ねて立体構造の半導体FETや発光素子が電氣的に機能する素子等を印刷工法で製作する。

プリンテッドエレクトロニクス技術は現在は失速しているが、ペロブスカイト太陽電池の登場によって、印刷工法による電氣的素子がプリンテッドエレクトロニクスを牽引すると考えている。最近の報告では、太陽電池の他に、ペロブスカイト半導体FET・発光素子なども発表されている。

ペロブスカイト太陽電池は塗布型有機 EL パネルと非常によく似た構成である。有機 EL 素子の積層構造は、基板の上に陽極、正孔輸送層、発光層、電子輸送層、

陰極が順に重ねられた構造である。

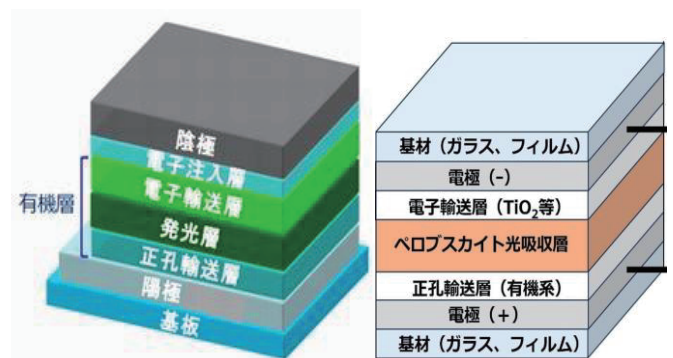


Fig1. OLED (Organic EL Device) Fig2. Perovskite solar cell

基板: ガラスやフィルムが用いられる。

陽極: 透明電極(例:ITO)で、正孔を注入する

正孔輸送層(HTL): 正孔を発光層へ輸送する

発光(発電)層(EML):発光(発電)材料

電子輸送層(ETL):電子を発光層へ輸送する。

陰極:電子を注入し、素子全体を構成する。

正孔輸送層・発電層(ペロブスカイト層)・電子輸送層・封止膜の4層がインクジェット塗布対象である。

これらは、塗布型有機ELパネルで確認されている

2. 積層3D 構造体のペロブスカイト太陽電池の構成

ペロブスカイト太陽電池とインクジェット工法構成では、幾つか課題解決が必要である。ペロブスカイト層のヨウ化鉛+DM SOは銅系金属と接触で有機王水化するも、インクジェットはこれに耐性のある製品が発表されている。主な溶媒には非プロトン系極溶媒のDMSO/DMF/アセトニトリル/NMP/ME K/アニソール/他が使用可能である。

- ・低粘度～高粘度へ要求する⇒1～85cps
 - ・ペロブスカイト半導体製作をインクジェット化
 - ・ペロブスカイトTFTの製作報告⇒移動度大きい
 - ・ペロブスカイト発光素子の製作報告⇒全印刷
- 関連材料メーカーも多数存在する
- ・封止材/バリアフィルム:積水、MORESCO麗光、キャノン、東レ、日本ゼオン
 - ・ペロブスカイト用金属系インク:三菱マテリアル三菱化学、デンカ、日本精化他

インクジェットヘッドやインク流路には

- ・ヨウ素化鉛+銅系材料部材に起因する有機王水の腐食性耐性が要求される(有機王水を生成しないアセトニトリル系では要求しない)
 - ・必ずしも循環仕様である必要はない。
 - ・大面積塗布には、600dpi/1024ノズル等が要求される
 - ・1024ノズル塗布の300mm⇒G8等の大面積化へ
 - ・ペロブスカイト結晶化法⇒DMSO/DMF溶剤に多い
 - ①貧溶媒(トルエン)(高効率化期待)
 - ・アセトニトリル溶剤に多い
 - ②120℃熱昇華法 ③N₂エアータ出
 - ・有機半導体塗布技術と似た構成⇒ホール・電子輸送層⇒同じ名前が実用化されている
 - ・溶剤に分散された金属系材料⇒多数のTiO₂ SnO₂等の事例。、他SiN_x封止膜
- 使用可能なヘッドは、コニカミノルタ社・リコー社Dimatix社・EPSON社と少ない、数機種のみである。

3. ペロブスカイト太陽電池の製作工程

産業技術総合研究所から抜粋

<https://www.nedo.go.jp/content/800017593.pdf>

ペロブスカイト太陽電池の作製工程

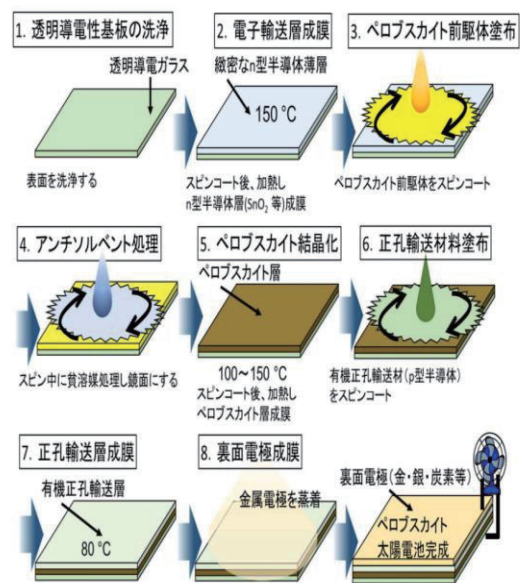


Fig3. Spin-coater production process

4. (株)ワイ・ドライブの考える

インクジェット枚葉塗布ペロブスカイト工程

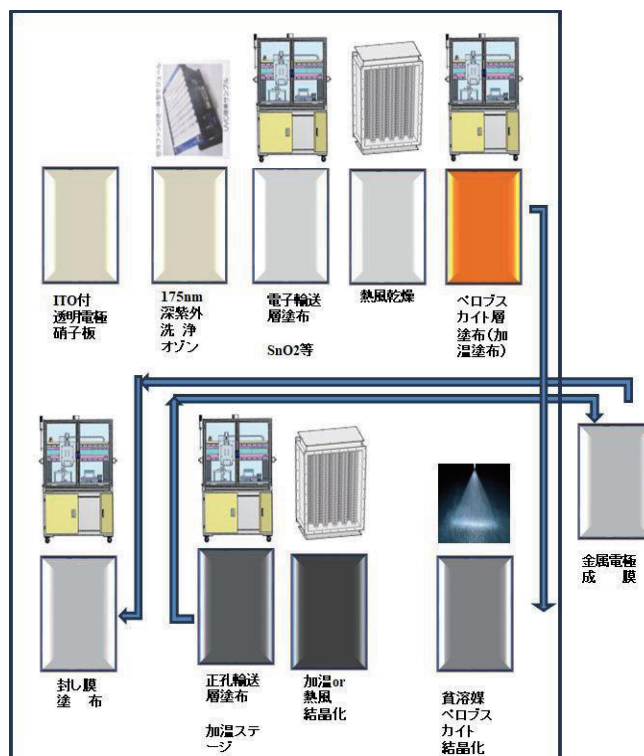


Fig4. Inkjet sheet-fed coating process

ITO透明電極付硝子、波長175nmUV光源で表面改質・洗浄、ペロブスカイト液などに接液しないインク循環系、SnO₂・TiO₂等のインク、N₂ガス噴霧、貧溶媒塗布機、熱風加熱。

製作工程環境:湿度10%以下、クリーンルーム。

オゾン・有機溶剤排気機能

・ロール to ロール工法では難易度が高い「貧溶媒結晶化」がインクジェット工法では可能で液晶や有機EL工程に近い
※ヨウ化鉛系の有機王水耐性が重要。

※高効率化可能なDMSO/DMFが使用可能

現在、公表されているペロブスカイト製作法

特徴	スリットダイコーティング	スプレーコーティング
塗布方法	連続的に押し出して塗布	霧状に噴霧
適用範囲	広範囲(全面塗布)	広範囲(マスクで局所塗布可)
膜厚の均一性	高い(精密制御可能)	中程度(乾燥プロセス次第)
材料利用効率	高い(無駄が少ない)	低い(飛散が多い)
パターン形成	不可(全面塗布向け)	可(マスクで対応)
製造速度	高速(R2R適応可)	中速(基板サイズ次第)
適用例	積水化学・東芝ES・カネカ	アイシン

インクジェットコーティング	被塗布面	発表面積
液滴を個別に噴射	フィルム	積水、リコー
全面塗布(精密なパターン可)		東芝ES、カネカ、
膜厚の精密制御容易		エネコート
最高(必要な分だけ使用)		中国企業
可能(デジタル制御)	ガラス	パナソニック、アイシン
最大1m/秒程度		中国企業
パナソニックHD・リコー		

Table1. Published perovskite fabrication methods.

5. インクジェット工法による使用する設備を開発した

- ① 塗布面を親水化・洗浄、波長175nm深UV光源が必須
- ② ペロブスカイト液などに接液しないインク流路・循環系と、負圧変動が非常に僅少な負圧制御器
- ③ 溶媒耐性のあるインク流路設計
- ④ 貧溶媒塗布機、N₂ガス噴霧機等の機構
- ⑤ インクジェットヘッドの詰まりやインク材料固化を事前に把握するノズル欠陥検査



Fig5. 175nm light source



Fig6. SUS gear pump

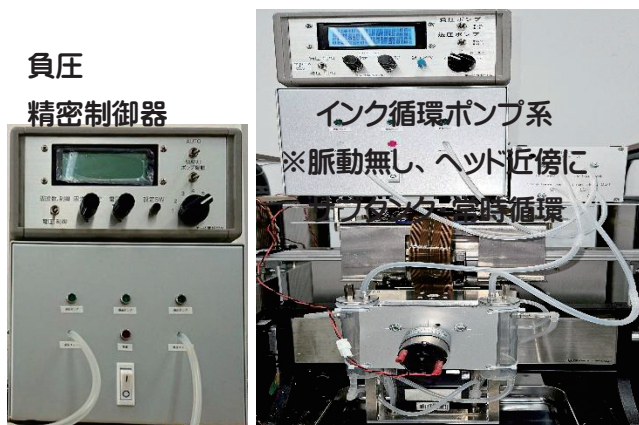


Fig7. negative pressure

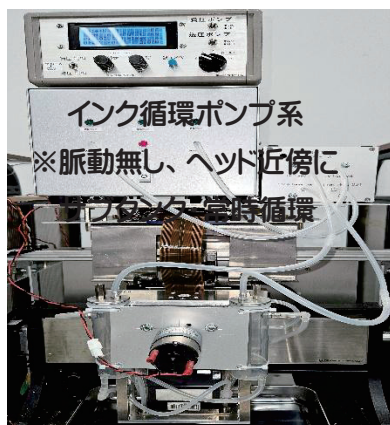


Fig8. Ink Circulation Controller

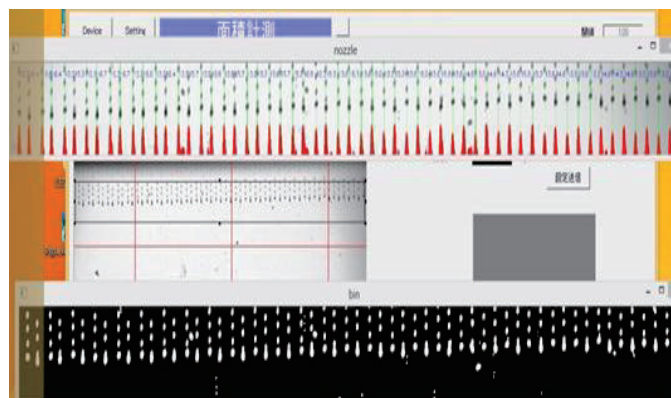


Fig9. non-discharge nozzle defect inspection.

ペロブスカイト太陽電池300mm塗布機を製作

- ※. 貧溶媒塗布による結晶化装置製作可能
- ※. 加熱昇華による結晶化機能付属可能
- ※. 電子輸送層・正孔輸送層膜塗布可能
- ※. SnO₂系・TiO₂系溶剤インク吐出可能
- ※. 封止用 SiN_x 膜の塗布も可能
- ※. N₂ エアー吐出ノズル搭載可能



Fig10. 300 mm coating machine for perovskite solar cells.

参考文献

産業技術総合研究所から抜粋

<https://www.nedo.go.jp/content/800017593.pdf>

問合せ

〒575-0021 大阪府四條畷市南野1丁目 14 番 16 号
16-14,1chome,minamino,shijyonawate,Osaka 575-0021
Japan

E-mail. yamazaki.tomohiro@y-drive.biz

環境配慮型の難燃性軽量低コスト壁面装飾建材を実現する 3D プリンター成形用粉体材料の開発

Research on SLS 3D-print molding for fire retardant decorative building materials

木村 真束¹, 伊藤 彰浩², 仙波 健², 奥平 有三³, 田中 達也³

Mazuka Kimura¹, Hiroaki Ito², Takeshi Semba², Yuzo Okudaira³, Tatsuya Tanaka³

¹FES 株式会社, ²京都産業技術研究所, ³同志社大学

¹FES Inc., ²Kyoto Municipal Institute of Industrial Technology and Culture, ³Doshisha University

【要約】

本研究はセルロースの炭化作用を利用することにより難燃性を高めた 3D プリント成形に関するものである。成形法として、樹脂粉体をレーザー照射により溶融・再結晶する SLS 方式 (Selective Laser Sintering Method) を用い、樹脂として PP (ポリプロピレン) を使用した。セルロースを重量比率で 30% から 50% の範囲で混合した 3D 成形サンプルについて、UL94 規格に準拠した燃焼試験を行った結果、V-0 レベルを達成し、不燃剤の配合率を従来の 1/3 に大幅に低減できた。難燃性を高めた 3D プリント成形部材は、非住宅の壁面材、天井材等への使用拡大が期待される。

キーワード: 3D プリント成形, SLS, 難燃性, セルロース, 炭化, 限界酸素指数, UL94 燃焼試験

【Abstract】

This research concerns 3D printed molding with enhanced fire retardancy by utilizing the carbonization of cellulose. The molding method used is SLS (Selective Laser Sintering Method), which melts and recrystallizes resin powder using laser irradiation; PP (polypropylene) was used as the resin. A 3D printed molded samples containing over 30% cellulose in weight ratio achieved V-0 in the UL94 combustion test, and the mixing rate of the conventional flame retardant was significantly reduced to 1/3 of the previous level. It is expected to be used in public facilities where fire retardancy is required.

1. 序論

金型が不要でデザイン変更が容易な 3D プリント成形品について、難燃性が要求される非住宅分野の壁面材などへの使用ニーズが拡大している。

本研究では樹脂に複合したバイオ材料が燃焼時に炭化することにより、燃焼が抑制されるという原理を 3D プリント成形に応用する[1]。3D プリント成形法として、樹脂粉体をレーザーにより焼結する SLS (Selective Laser Sintering) 方式を用いる[2] [3]。

炭化用材料として、低コストのバイオ材料である粉末セルロースを用い、その配合比率を変えて燃焼性を評価し、不燃剤の使用割合を低減した 3D プリント用の複合樹脂粉体材料の可能性を検討する。

2. 材料と実験法

2.1 実験に使用した材料

樹脂として、PP (ホモポリプロピレン: (株) プライムポリマー J108M) を使用した。その DSC (示差熱分析計) の計測結果を図 1 に示す。融点は 166.0°C、結晶化温度は 130.8°C で、その差は約 36 度あり、30 度以上必要とされる SLS 方式 3D プリント法に適することを確認した。

炭化材料として、粉末セルロース (日本製紙 (株) KC フロック W-100G) を使用し。粉末セルロースの SEM 写真を図 2 に示す。粉末セルロースの長さは約 30~150 μm 、直径は約 10~30 μm 。不燃剤としてポリリン酸アンモニウム (APP)、相溶化剤として マレイン酸変性 PP を用いた。実験に用いた複合材料の配合比を表 1 に示す。

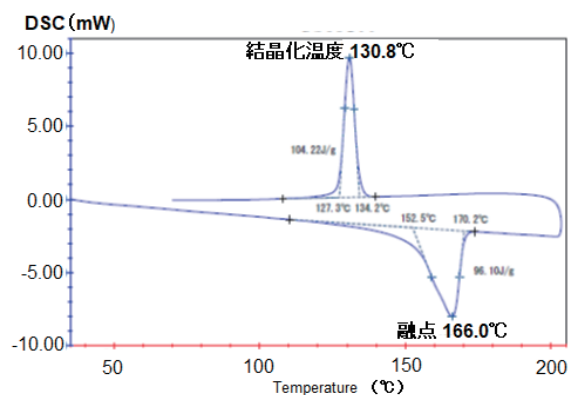


Fig.1. DSC of PP (polypropylene)

粉末セルロースの配合比率は 30~50%、不燃剤の比率は 30~10% の範囲で変えた。

二軸混練押出し機 (スクリー径 24 mm) を用いて、混練温度 180°C で表 1 に示した複合材料のペレットを試作した。その後、冷凍粉砕により平均粒径約 80 μm に粉砕し、3D プリント用材料として用いた。

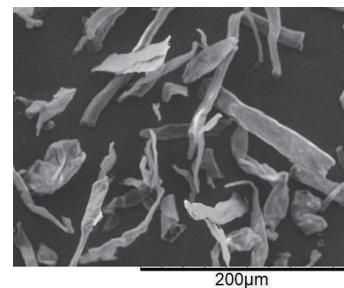


Fig.2. SEM photograph of cellulose powders used in the experiment

Table 1. Composition of materials used in the experiment

材料 記号	PP樹脂	相溶剤 MAP	粉末 セルロース CP	不燃剤 APP	試験用成形サンプル	
					3D プリント 成形	射出成形
P0	100	0	0	0	—	○
P1	36.7	3.3	30	30	○	○
P2	36.7	3.3	40	20	○	○
P2.5	36.7	3.3	45	15	○	○
P3	36.7	3.3	50	10	○	○
P4	70	0	0	30	—	○

重量比率 (%) ○ 試作

2.2 3Dプリント成形装置

SLS方式の3Dプリント成形装置として、FES(株)保有の3D Systems 社製 ProX500を使用した。成形槽は381×330×457 mmで、粉碎した粉体を150 μm毎に積層したあとレーザーで溶融し、3Dプリント成形を実施した。そのプロセスを図3に示す。

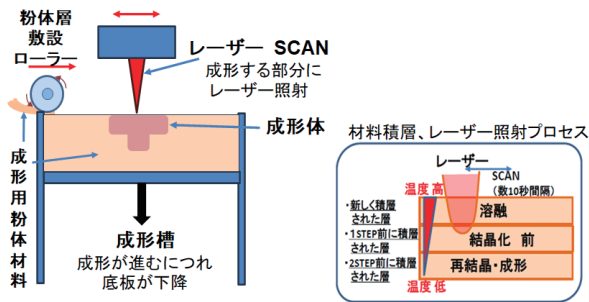


Fig.3. 3D print molding Process of SLS method

2.3 射出成形による試験サンプル成形

3D成形サンプルと比較するため、射出成形によりサンプルを成形した。射出成形の型締力は30トン、ノズル温度は190℃、金型温度は40℃とした。

2.4 材料の難燃性評価

2.4.1 限界酸素指数(LOI)の計測

材料が燃焼を継続する最低酸素濃度(%)である限界酸素指数(LOI: Limiting Oxygen Index)を測定した。燃焼サンプルは幅10mm×厚4mm×長さ150mmとし、JIS K7201-2に準拠し、和歌山県工業技術センターで計測した。図4に示すように、サンプルをガラス管内に設置し、酸素濃度を変化させ、燃焼の継続性を見る。LOIに対応した材料の可燃性の目安を表2に示す[4]。



Table 2. Relation between LOI and material flammability

LOI (%)	材料の可燃性の目安
22以下	燃える。可燃性。
22~27	燃えるが、自己消化性あり。
27以上	難燃性。

Fig.4. Measuring apparatus for Limiting Oxygen Index

2.4.2 UL94 規格による難燃性試験

UL94 規格は、プラスチックの燃焼性をテストする安全試験であり、難燃性が高い順に6ランク(5VA, 5VB, V-0, V-1, V-2, HB)がある。この規格は、家電や自動車、建築材料などにも適用されている[5]。実用製品に関して、V-0以上(図5参照)の難燃性が要求される場合が多い。幅10~13mm、厚さ4mm、長さ150mmの3Dプリント、および射出成形サンプルを用いた。図5に示すように水平試験と垂直試験があり、V-0レベルについては、炎を10秒間2回あてたときの合計の燃焼時間が平均10秒以内、且つ滴り落ちた材料が引火しないことが要求される。

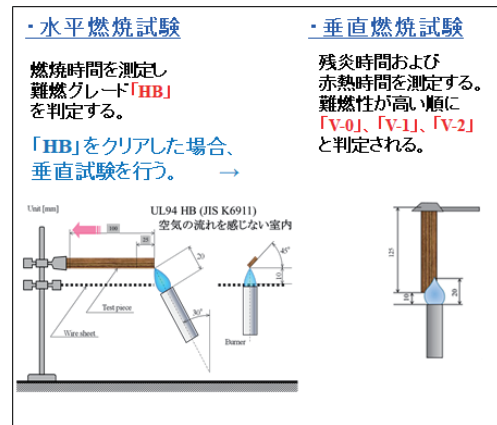


Fig.5. Combustion test based on the UL94 standard test

3. 結果と考察

3.1 酸素指数試験、及び UL94 規格燃焼試験の結果

表1に示した6種類(P0~P4)の材料からなる射出成形サンプル、および3Dプリント成形サンプルについて、限界酸素指数 LOI の計測結果を図6に示した。P1,P2,P2.5,P3(表1)の4種類の成形サンプルについてみれば、不燃剤 APP の比率が低くなるに従い、LOIの値が低下しているが、射出成形サンプルについては、26%以上、3Dプリント成形サンプルについては23%以上となり、自己消化性を確保しているレベルである。不燃剤 APP と炭化作用のある粉末セルロースの相乗効果によるものと考えられる。

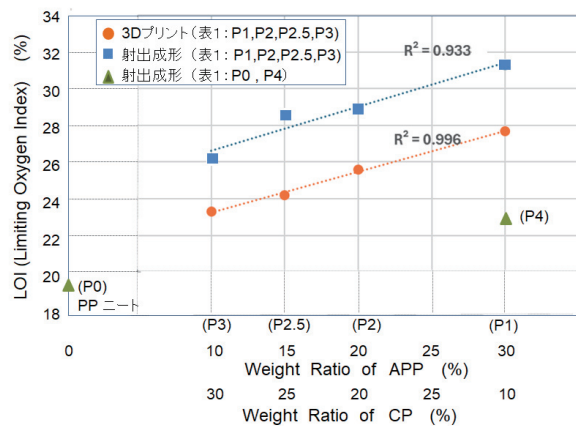


Fig.6. Measurement results of LOI as a function of APP ratio

UL94規格に準拠した燃焼試験を行った結果を表 3 に示す。射出成形サンプル 4 種類のサンプルについて

Table 3. Results of UL94 combustion test

材料 記号	不燃剤 APP 配合比率 (%)	粉末セルロース CP 配合比率 (%)	射出成形 サンプル	3Dプリント 成形サンプル
P1	30	30	V-0	V-0
P2	20	40	V-0	V-0
P2.5	15	45	V-0	V-1
P3	10	50	V-0	V-1

は V-0 を達成したが、3D プリント成形サンプルでは、粉末セルロースの配合比率が 30% (P1)、および 40% (P2) が V-0 を達成したが、45%以上の P2.5、P3 では V-1 レベルとなった。粉末セルロースの配合比率が大きい P2.5、P3 の材料で、V-0 を達成するために燃焼前のサンプルの空隙率、及び燃焼後のサンプルの炭化層を解析した。

3.2 成形サンプルの空隙率

試験サンプル内の空隙は燃焼時、酸素を供給し、燃焼の継続に寄与すると考えられる。図 7 に燃焼前の各試

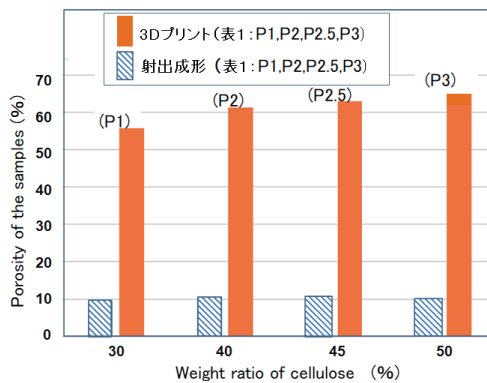


Fig.7. Porosity of the samples as a function of weight ratio of cellulose

験サンプルの空隙率を示す。射出成形サンプルの空隙率は約 10%で、ほぼ一定であるが、3D プリント成形サンプルの場合、空隙率が 55%から 65%と大きい。これは 3D プリント成形サンプルの LOI が全体的に低下した要因であると推定されるが、射出成形サンプルの LOI からの低下の割合はほぼ一定で射出成形サンプルと 3D 成形サンプルの LOI の回帰直線はほぼ平行であることから、セルロースの配合比率の増加による 3D プリント成形サンプルの空隙率の増加は LOI に直接対応していないことが読み取れる (図 6 参照)。

空隙率以外に 3D プリント成形サンプルの LOI に影響を与える因子があると考えられる。次に、UL94 燃焼試験後の試験サンプルの炭化層の厚さに着目し、分析を実施した。

3.3 燃焼後サンプルの炭化層の厚さ評価

射出成形サンプルと 3D プリント成形サンプルについて、UL94 の燃焼試験後に断面を顕微鏡で観察し、炭化層 (char) の厚さを計測した。その結果を図 8 に示す。

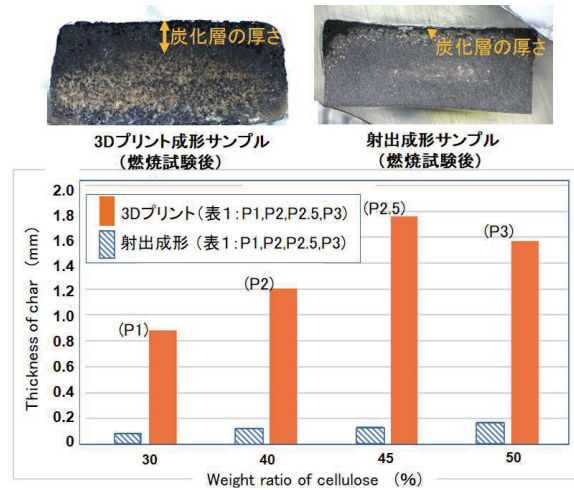


Fig.8. Thickness of char after combustion test

炭化層が厚いほど燃焼の継続が阻害されると考えられる。図 8 によると、射出成形サンプルの炭化層厚さは 0.2 mm 以下であるのに対し、3D プリント成形サンプルでは 0.8~1.8 mm となり、特にセルロース配合比率が高い P2.5、P3 で顕著であった。この炭化層増加が空隙率増加による LOI 低下を相殺していると推測される。

3D 成形サンプルについて、炭化層の厚さが厚くなる現象を追究する。図 9 に、射出成形サンプル、及び 3D プリント成形サンプルについて、UL94 の燃焼試験の燃焼前と燃焼試験後の断面の状態を示す (サンプルは P2)。

射出成形サンプルの場合は、燃焼後の炭化部分は比較的平滑な状態が保たれている。それに対し、3D プリント成形サンプルの場合は、燃焼後は空隙が増加し、粉体

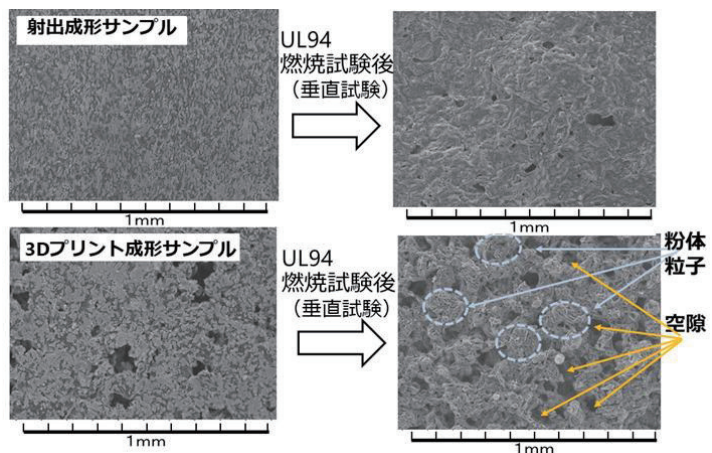


Fig.9. Comparison of micro-structures of char between molding sample and 3D print sample before and after combustion test

粒子の形状が残っている。3Dプリント成形時のレーザー照射により、粉体粒子表面のPPが熔融し、隣接する粉体粒子と融着・固結され、成形体が形成される。PPは可燃性が高いため(LOI=19.4%:図6参照)、この空隙は粒子間で結合したPPが先に燃焼したことにより生じた空隙であると推測される。粉体粒子は、レーザー照射によるPPの溶出により、セルロースの含有率が高くなり、燃焼時には炭化が進み、燃えにくくなり、粒子形状を保持して残ったものと推定される。このような現象により、3Dプリント成形サンプルの場合、炭化層が厚くなったものと考えられる。この状態変化を模式的に図10に表す。

この推論を確かめるには、燃焼後のサンプルの粒子表面の炭化状態の分析、燃焼前後の化学分析により、主にPPが燃えたことを確かめることが必要であるが、これが確かめられれば、流れ性(MFR: Melt Flow Rate)の大きいPPをベース樹脂として使用すれば、3Dプリント成形品の難燃性をさらに高められる可能性がある。

3.4 混練時の炭化促進、及び粉末セルロースの微細化による難燃性向上の検討

二軸混練押出し機により、表1に示す複合材料のペレットを製作する場合、混練押出し機の温度を高く設定することにより、混練時点で粉末セルロースの炭化が進むと考えら

れる。これまで述べた実験では、混練時の温度を180℃に設定し複合材料ペレットを試作したが、190℃に温度を上げた状態で、ペレットを試作し難燃性を評価した。

また、粉末セルロースについては、不燃剤APPとの相乗効果を高める目的で、さらに微細化された粉末セルロースを用いた(日本製紙(株)KCブロックW-200GK)。図2の粉末から比べてさらに微粉化され、直径は約15μm以下、長さは約50μm以下の粉末である。

配合材料として、表1に示したP2.5(不燃剤APP15%,粉末セルロース45%),及びP3(不燃剤APP10%,粉末セルロース50%)を用いて、3Dプリント成形サンプルの限界酸素指数LOIを計測し、続いてUL94規格に基づく燃焼試験を実施した。その結果を表4に示す。混練温度が190℃で微細化粉末セルロースを用いた場合、P2.5、P3の材料とも、LOIは高くなり、UL94規格による燃焼試験はV-0を達成した。高混練温度、セルロース微細化によって、難燃性の向上することが分かった。難燃性向上のメカニズム、及びそれぞれの寄与度を解明し、さらに難燃

性向上につなげることが今後の課題である。

Table 4. Experimental results of LOI and UL94 combustion test

材料記号	混練温度 180℃		混練温度 190℃ 粉末セルロース微細化		
	LOI (%)	UL規格 燃焼試験	LOI (%)	UL規格 燃焼試験	垂直試験 燃焼時間
P2.5	23.8	V-1	25.6	V-0	0.5秒以下
P3	23.4	V-1	24.2	V-0	約1秒

4. 結言

バイオ材料であるセルロースを樹脂に複合した材料を用いたSLS法による3Dプリント成形体は、セルロースの炭化作用により、難燃性が向上する。限界酸素濃度(LOI)を指標として用い、成形体の空隙率、炭化層の厚さが難燃性に与える効果を解明した。難燃性セルロースの配合比率50%、不燃剤の配合比率10%でUL94規格の難燃レベルV-0を達成した。

5. 今後の展開

燃焼時のバイオ材料の炭化現象が3Dプリント多孔質成形体の難燃性能に与える影響を詳細に解明し、難燃材としての実用化につなげる。

PLA(ポリ乳酸)などのバイオ樹脂をベース樹脂として用い、バイオ材料の使用比率を高めた難燃3Dプリント成形体の実用化研究を進める。

参考文献

1. K. Matsumoto, T. Tanaka, et al. "A mechanism for fire retardancy realized by a combination of biofillers and ammonium polyphosphate in various polymer systems," Cellulose, Vol.28(6), pp.3833-3846, (2021)
2. I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker & M. Kyorassani, Additive Manufacturing Technologies, Springer (2021)
3. <https://www.3d-tech.org/blog/pvbi6e43v>
SLS方式3Dプリンターの仕組みと産業応用:最新動向と将来展望, 3Techs
4. <https://www.djklab.com/service>
5. <https://detail-infomation.com/flame-retardant-grade/>

謝辞

本研究は、「経済産業省 成長型中小企業等研究開発支援事業 JPJ005698」(令和5年度~7年度)の支援をいただき遂行いたしました。関係者の方々に感謝申し上げます。

浮力と沈降制御による中空構造ゲルの創出— 4D プリンティングに向けた P-DN ゲルの造形技術開発

Creation of hollow gel structures through buoyancy and sedimentation control:

Development of P-DN gel molding technology for 4D printing

小松 宙央, 古川 英光

Sora KOMATSU, Hidemitsu FURUKAWA

山形大学

Yamagata University

【要約】

近年 4D プリンティングの発展に伴い、外部刺激により膨潤・収縮するハイドロゲルが注目されている。我々は、数種類のハイドロゲルを Direct ink writing(DIW)方式および Stereo Lithography Apparatus(SLA)方式で造形する技術を開発している。従来 DIW 方式による中空構造造形はサポート材が必要だが、ハイドロゲルの場合、硬化後に PLA のように容易に除去できず課題となっていた。そこで、ステージをバスタブ内に設置し、内部の水溶液の粘度を制御して沈降を抑え、浮力を活用することで DIW 方式でありながらサポート材無しでの中空構造造形法の確立を目指す。

キーワード: 4D プリンティング, ハイドロゲル, DIW 方式, SLA 方式, 粘度制御, 中空構造

【Abstract】

In recent years, with the advancement of 4D printing, hydrogels that swell and contract in response to external stimuli have garnered significant attention. We have developed techniques to fabricate several types of hydrogels using both Direct Ink Writing (DIW) and Stereolithography Apparatus (SLA) methods. While conventional DIW hollow structure fabrication requires support materials, hydrogels pose a challenge because, unlike PLA, they cannot be easily removed after curing. Therefore, we aim to establish a support-free hollow structure fabrication method using DIW by placing the stage inside a bath, controlling the viscosity of the internal aqueous solution to suppress sedimentation, and utilizing buoyancy.

Keywords: 4D printing, hydrogel, DIW method, SLA method, viscosity control, hollow structure

1. 緒言

3D プリンティングは、3D-CAD 等で作成されたデジタルモデルに基づき、静的な三次元構造物を造形する技術である。一方、4D プリンティングはこれを拡張した概念であり、材料として外部環境からの刺激に応答して形状や機能が変化する知的材料を用いる点に特徴がある[1,2]。

近年、この知的材料としてハイドロゲルが注目されている。ハイドロゲルは、多量の水を含んだ三次元高分子網目構造を有し、外部の温度変化などに応答して膨潤・収縮する特性を持つ。また、高い含水率や生体適合性から、ソフトアクチュエータやドラッグデリバリーシステムなど、生物医学分野への応用も期待されている[3]。

ハイドロゲルの 3D 造形には、主に SLA 方式や DIW 方式が用いられる。中でも DIW 方式は、より高強度なゲル構造体の作製に適している。しかし、DIW 方式はノズルから材料を押し出しながら積層する手法であるため、下層に支持構造を持たない中空構造やオーバーハング構造といった複雑な形状の造形が困難であるという課題があった。

そこで本研究では、DIW 方式におけるこの課題を解決し、複雑な形状の造形を可能とする新たな手法として

「浮力方式」を提案する。概要図を Fig.1 に示す。

2. 浮力方式

2.1 造形原理

本研究で提案する「浮力方式」は、DIW 方式を応用した新しい造形手法である。

まず、粘性を調整した支持液で満たした容器内に造形ステージを配置する。ステージ上に造形を行い、支持構造がない空間へゲル材料を吐出する際には、支持液の高い粘性がブレーキのように作用し、抵抗力を生み出す。この抗力がゲル材料に働く重力と拮抗することで、材料の沈降を効果的に抑制する。

そして、材料が支持液上に一時的に浮いている状態で光を照射して硬化させる。これにより、従来法では困難であった複雑な形状の造形を可能とする。

また、本手法が材料の沈降制御において密度ではなく支持液の粘性を利用する理由は、将来的に支持液と造形材料の両方にゲルを用いる複合材料造形への展開を想定しているためである。一般に、ゲルの物性を維持したまま密度を大きく調整することは困難であるのに対し、粘性の調整は比較的容易に行える。したがって、本研究ではその技術的な拡張性を考慮し、粘性の調整による沈降制御を採用した。

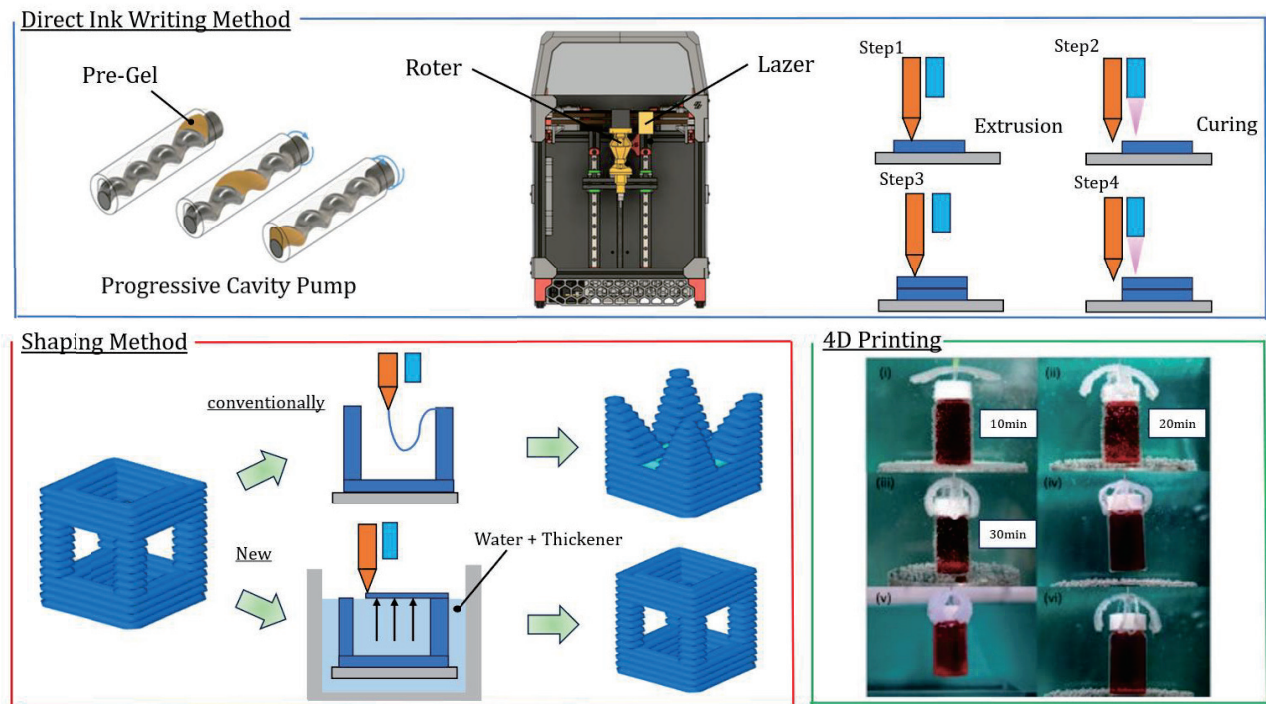


Fig. 1 Research Summary (DIW, Shaping, and 4D Printing [2])

2.2 造形材料

本研究では、造形材料として P-DN(Poly-Double Network)ゲルを、支持液には増粘剤としてキサンタンガムを添加した水溶液を用いた。

P-DN ゲルの組成は、モノマーとして N, N-Dimethylacrylamide (DMAAm), 架橋剤として N, N'-Methylenebis acrylamide (MBAA), 光重合開始剤として Diphenyl(2, 4, 6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide (TPO)を使用した。

支持液の増粘剤としてキサンタンガムを選定した理由は、低濃度で効率的に溶液の粘性を高めることができ、かつ P-DN ゲルの光硬化反応を阻害しないためである。

また、作製した P-DN ゲル溶液、および支持液として用いたキサンタンガム水溶液の密度を測定した。P-DN ゲル溶液の密度は 1.05[g/mL], キサンタンガム水溶液の密度は 1.00[g/mL]であった。

3. 実験方法

本研究では、造形評価、沈降測定、および沈降解析を行った。造形評価として、まず Fig. 2 に示す寸法の中空構造モデルを浮力方式を用い造形した。次に、このモデルをマイクロ CT スキャナで撮影し、得られた三次元データに基づき形状を評価した。

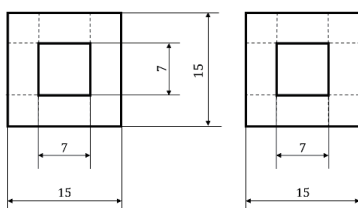


Fig. 2 Cube Dimensions

今回の造形に使用した 3D プリンタの造形条件を Table. 1 に示す。

Table. 1 Shaping Conditions

ノズル移動速度[mm/s]	700
ノズル径[mm]	0.92
層高さ[mm]	0.65
乗数 [-]	1.00
レーザー移動速度[mm/s]	700
光量[mW]	78
レーザースポット径[mm]	0.4

浮力方式の支持体であるキサンタンガム水溶液は濃度が低い方から 0.07w%, 0.08w%, 0.09w%, 0.10w%で作成したものを使用する。今回使用する水溶液の粘度を測定した結果を Fig.3 に示す。

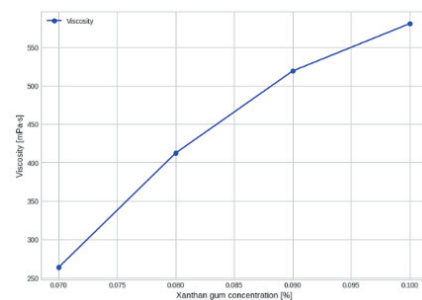


Fig. 3 Relationship between Xanthan Gum Concentration and Viscosity

Fig.3 からキサンタンガム溶液の濃度 0.1%以下では濃度と粘度が比例的な関係にある事が示される。

次の沈降測定については、P-DN ゲル溶液は高粘性であるため、単一液滴の滴下による沈降速度の直接測

定は困難であった。したがって本研究では、2つの支持構造物の間に、一定距離の支持されない空間を持つ試験片を作成した。この空間に橋を架けるようにゲル材料を吐出し、その際に生じる材料の鉛直方向の変位 (Fig. 4 における X) を沈降距離として測定した。

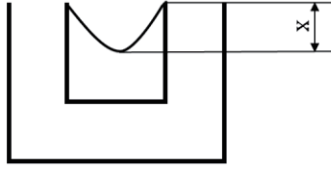


Fig. 4 Settling Distance

最後に沈降解析についてはゲル溶液をノズル直径 0.92[mm]の球体であると仮定し、その球体が異なる粘度の支持体に対して沈降する速度を解析した。

なお、この支持されない区間の距離は 2.76 mm であり、これは解析で用いた球体モデル直径の 3 倍に相当する。

4. 実験結果及び考察

4.1 造形結果

実際に撮影した画像を Fig. 5 に示す。

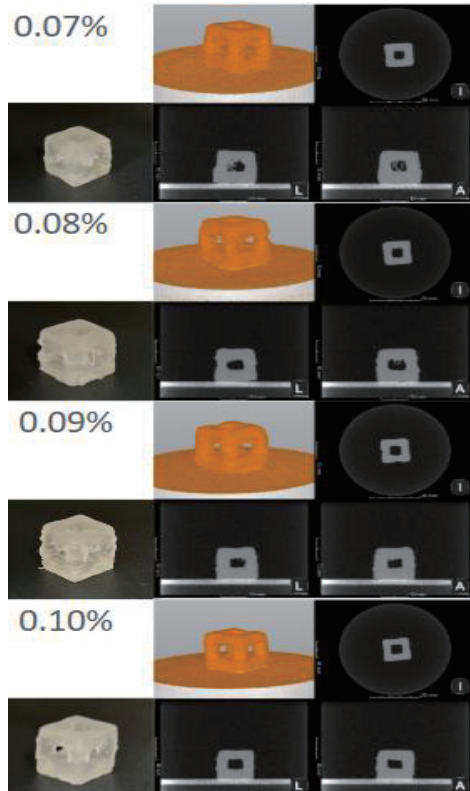


Fig. 5 CT scan image

0.07w%の支持体では P-DN ゲル溶液の沈降が起こり形状の形が崩れているが、濃度が上がるにつれ徐々に沈降量が少なくなっていく、0.10w%の水溶液では P-DN ゲル溶液の沈降は十分に制御できていると言える。

このことから支持体の粘度が造形に関係し、0.10w%の支持体の粘度があれば形状を崩さずに造形が出来る事が示された。

4.2 沈降測定

本測定は支持構造のない空間で行った。沈降した鉛直距離は、解析で用いた球体モデル 3 個分の直径に相当する為、Table 2 には測定された全体の沈降速度を 3 で除算し、球体 1 個あたりの等価的な沈降速度として算出したものも記載する。

Table. 2 Measurement Results

濃度[%]	0.07	0.08	0.09	0.10
沈降時間[s]	11	11	11	11
沈降距離[mm]	4.5	3.5	2.7	2.0
沈降速度[mm/s]	0.41	0.32	0.25	0.18
1 滴分速度[mm/s]	0.17	0.11	0.08	0.06

Table.2 より測定値は粘度の高い溶液での沈降速度が小さくなった。

4.3 沈降解析

今回の沈降制御について式を用いて解析した。今回はノズル径の 0.92[mm]を直径とする球体モデルでの沈降として解析する。流体抵抗を(F_d)重力を(F_g)浮力を(F_b)とし、力の釣り合い式(1)を示す。

$$F_d = F_g - F_b \quad (1)$$

(1)を密度と体積を用いて式(2)に示す。キサンタンガム水溶液の密度を ρ_1 P-DN ゲル溶液の密度を ρ_2 とすると

$$F_d = (\rho_2 - \rho_1) \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (2)$$

一方で抵抗力(F_d)は物体の速度式(V_t)と液滴の半径(r)、抗力係数(C_d)を用いて次のようにも表せる。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_1 v_t^2 C_d \pi r^2 \quad (3)$$

べき乗則流体の中を物体がゆっくり動く場合、抗力係数 C_d は「一般化レイノルズ数 (Re_p)」とべき乗則指数 n に依存する。補正係数 $X(n)$ と稠度係数 K を用いて式を簡略化すると次の式(4)のように示せる。[4]

$$F_d = \frac{12\pi K X(n) r^{2-n}}{2^n} v_t^n \quad (4)$$

(3), (4)の連立方程式を解き、式を簡略化すると次の式(5)が得られる。

$$V_t = \left[\frac{g(\rho_2 - \rho_1) r^{n+1} 2^n}{9 K X(n)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

この式を用い得られた速度で溶液での P-DN ゲル溶液の沈降速度を算出する。密度 ρ_1 , ρ_2 は 2 章 2 節材料で測定したものを, r は Table. 2 に示したノズル直径から算出した値を使用する。べき乗則指数 n と稠度係数 K はレオメーターで測定したものを使用する。算出結果を Table. 3 に示す。

Table. 3 Calculation Results

濃度[%]	0.07	0.08	0.09	0.10
乗則指数 n [-]	0.654	0.601	0.493	0.463
稠度係数 K [PaS ⁿ]	0.123	0.146	0.180	0.199
沈降速度 V_t [mm/s]	0.055	0.046	0.021	0.012

Table. 3 より, 沈降速度は粘度の高い方がずり応力が働き速度が遅くなっていることが分かった。

Table. 2 と Table. 3 から球体モデル 1 滴分の沈降速度を示したグラフを Fig.6 に示す。

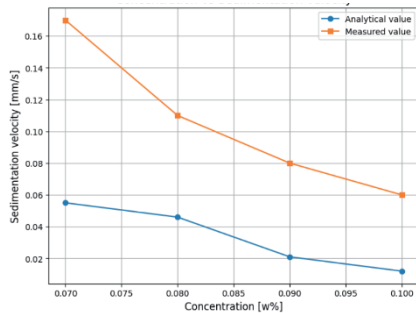


Fig.6 Settling Velocity

Fig.6 から測定結果と解析結果を比較したところ, すべての条件下において, 測定値が解析値を上回るという一貫した傾向が見られた。

この乖離が生じる主な要因は, 解析モデルと実際の造形プロセスとの間に本質的な相違があるためだと考えられる。すなわち, 本解析は単一粒子の自由沈降を仮定しているのに対し, 実際の造形では材料が連続的に吐出されることによる集団的, あるいは流体的な挙動が発生し, 単独の場合よりも沈降が促進された事を示唆している。

上記の要因に加え, 以下の 2 点も測定値と解析値の乖離の要因として挙げられる。第一に, ゲルの膨潤である。測定をゲルの硬化直後に行っているため, 支持液中でのゲルの膨潤が体積および密度を変化させ, 測定に影響を与えた可能性がある。第二に, ノズルからの吐出が挙げられる。ノズルからゲル溶液を吐出している為に初速度が加わり, 単に水面にゲル溶液を乗せたものよりも沈み始めが大きく示される可能性が有る。

5. 結言

本研究では, P-DN ゲルを材料として使用し, 新たに提案した浮力方式により, 従来の DIW 方式では困難であった中空構造の造形に成功した。これによりゲル溶液

よりも低密度の支持液中において, 支持液の粘性を調整する事によって材料の沈降を制御できる事が実証された。

今後の展望として, 支持液の粘性や密度, およびゲル材料の物性値に基づき沈降挙動を理論的に予測するモデルを構築することを目指す。これにより, 造形モデルのスケールや異なる材料においても 3D 造形が可能になる。

また, 本手法で作製された高強度な中空構造体は, 4D プリンティングやソフトロボットの構成要素として有望である。さらに, 血管や臓器など複雑な内部構造を模した手術練習用の生体モデルといった, 医療分野への貢献も大いに期待される。

謝辞 本稿で紹介した研究の一部は, 「NEDO 先導研究プログラム/マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004), 内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第 3 期/バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO) (JPNP23025), JSPS 科研費(基盤 A JP23H00498, JP25H00890, 基盤 C JP24K12997, JP24K15231), ムーンショット農林水産研究開発事業(MS511)等によって支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 古川英光, 蒲生秀典, “3D プリンティングから 4D プリンティングへーデジタルファブリケーションの新たな展開ー”, STI Horizon 7(2), 35-40 (2021)
- [2] MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa, “4D printing of shape - memory hydrogels for soft - robotic functions”, Advanced Materials Technologies 4(8), 1900071 (2019)
- [3] Yuting Dong, Shancheng Wang, Yujie Ke, Liucheng Ding, Xianting Zeng, Shlomo Magdassi, and Yi Long, “4D Printed Hydrogels: Fabrication, Materials, and Applications”, Advanced Materials Technologies 5(6), 2000034 (2020)
- [4] Amir Heydari, Elhameh Narimani, Fatemeh Pakniya, “Explicit Determinations of the Colebrook Equation for the Flow Friction Factor by Statistical Analysis”, Chemical Engineering & Technology 38(8), 1387-1396 (2015)

ソフトアクチュエータの機能性向上に向けた一軸伸長流れによる 温度応答性ハイドロゲルの造形手法の構築

Fabrication Method of Temperature-Responsive Hydrogels using Uniaxial Extensional Flow
for Improving the Functionality of Soft Actuators

福田 真生¹, 中畑 伯斗², 関口 翔斗², ウォービー ウィリアム海アレクサンダー²,
倉科 佑太², 田川 義之²

Masaki FUKUDA¹, Hakuto NAKAHATA², Shoto SEKIGUCHI², William Kai Alexander WORBY²,
Yuta KURASHINA², Yoshiyuki TAGAWA²

¹東京農工大学, ²東京農工大学大学院

¹Tokyo University of Agriculture and Technology, ²Graduate school of Tokyo University of Agriculture and Technology

【要約】

本研究では、一軸伸長流動を付与可能な装置を構築し、化学架橋型温度応答性ハイドロゲルの収縮挙動に及ぼす冷却条件およびハイドロゲルを引き上げる加速度条件の影響を調査した。試料台に室温の金属を用いた場合、ゲルは白濁したが、 -20°C に冷却した金属を用いることで透明性が高いゲルを得ることができた。さらに、加速度を増加させると収縮率が大きくなり、特に 1 G で最大値が得られた。これらの結果は、高分子鎖の配向制御が収縮特性を向上させること有効であることを示しており、今後は高分子鎖の向きを一方向に揃えることで、より把持力の高いアクチュエータ材料の造形への応用が期待される。

キーワード: 4D 造形, 高分子配向, NIPAAm, 一軸伸長流

【Abstract】

In this study, we developed an apparatus capable of applying uniaxial extensional flow and investigated the effects of cooling conditions and acceleration during lifting on the shrinkage behavior of chemically cross-linked thermo-responsive hydrogels. When a room-temperature metal stage was used, the gels became opaque, whereas a transparent gel was obtained by employing a metal stage cooled to -20°C . Furthermore, the shrinkage ratio increased with increasing acceleration, reaching its maximum at 1 G . These results indicate that controlling the orientation of polymer chains is effective in enhancing shrinkage properties. Future work will focus on utilizing polymer chain orientation control to improve gripping force, aiming at applications as actuator materials.

Keywords: 4D printing, Polymer orientation, NIPAAm, Uniaxial extensional flow

1. 序論

3D プリンティングは複雑な構造体を精密に作製できるが、従来は単一材料に限られ、主に構造設計の工夫に依存していた。一方、ハイドロゲルや形状記憶ポリマー (SMP) などのソフトアクティブマテリアル (SAM) は大きな変形を示し、多様な応用が期待されてきた。しかし、製造上の制約から単純な形状に限られていた。近年、3D プリンティングと SAM を組み合わせた 4D プリンティング技術が登場し注目されている[1]。4D プリンティングでは、刺激応答性材料を用いることで 3D 造形物に時間依存的な機能性を付与でき、再生医療やソフトロボティクスへの応用が期待されている[2]。しかし現状では物を掴んで維持する力(把持力)が不足し、アクチュエータとしての実用化には課題が残されている。我々はこの課題解決のため、高分子鎖の配向制御に着目している。ゲル内部の高分子配向を揃えることで収縮速度の向上、変形量の増大、機械的強度の強化が

期待できる[3][4][5]。従来は化学的改良が中心であったが、ゲル化過程における配向制御は容易ではない。そこで注目されているのがゲル硬化時に一軸伸長流動を与える方法であり[3][4]、高分子鎖の配向によって収縮挙動を制御できる。Nakajima らは物理ゲルを用いて、伸長流動が収縮特性を向上させることを報告したが[5]、化学架橋型ゲルにおける効果は不明である。本研究では、化学架橋型の温度応答性ハイドロゲルに一軸伸長流動を与えることで効果的に配向させ、把持力向上につながる新たな造形手法の構築を目指した。本稿ではその前段階として、冷却条件の影響、加速度条件による収縮率の変化についての実験結果を報告する。

2. 概要

2.1 実験装置

図 1(a)に構築した一軸伸長流動下ゲル造形装置の概略図、(b)にその写真を示す。本装置では、電動アク

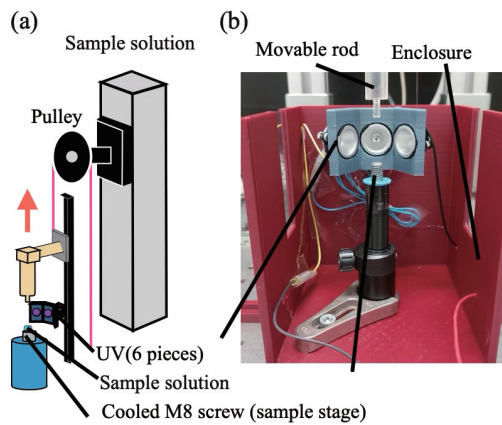


Fig. 1. (a) Schematic of extensional flow gelation apparatus
(b) Photograph of extensional flow gelation apparatus

チュエータ(EC-DS6XMAH, IAI)により可動棒を鉛直上向きに一定加速度で移動させ、試料台上の試料溶液に一軸伸長変形を与えることができる。可動棒はリニアガイド上の可動ステージに取り付けられ、糸で吊り下げられている。糸はアクチュエータに接続された滑車を通して固定されており、この機構により試料溶液に最大 2 G の加速度を付与可能である。硬化用の LED UV ライト(OSV1XDE5E1S, 365 nm, Optosupply)は試料硬化装置の囲いに固定されている。この際、6 つの UV ライトの照射光の交点が、硬化させる試料台の中心になるようにジグで固定されている。2 台の直流電源装置(P4K-80, 松定プレジジョン)により UV ライトおよびアクチュエータの駆動を同期制御し、タイミングを 0.1 s 単位で調整することが可能である。今回の実験装置の可動棒は光造形方式 3D プリンター(Form 3+, formlabs), UV ライト固定用ジグや囲いは熱積層型 3D プリンター(A1 3D プリンター, Bambu Lab)で作成した。また、試料台は金属を冷凍庫で冷やしてから用いた。

2.2 ハイドロゲルの調製

本研究で使用する温度応答性ハイドロゲルの試料溶液の調製方法について説明する。温度応答性ハイドロゲルとは温度によって時間的な動作をするものである。モノマーには N-イソプロピルアクリルアミド(NIPAAm, 7.5% [w/v])を用い、架橋剤として N,N'-メチレンビスアクリルアミド(MBAA, 0.375% [w/v])を添加した。さらに、ゲルに粘弾性を付与するため、これらをスターラー(CHPS-170DF, ASONE Co. Ltd.)により攪拌しながら、0.8% [w/v] のポリアクリル酸ナトリウム(Sodium polyacrylate: SPA, 重合度 2–2000–70,000)水溶液に溶解した。水溶液内の塊が小さくなったところで、スターラーを 140 rpm に設定し、24 時間攪拌した。均一な溶液に調製後、冷蔵庫(4 °C)で保存した。調製した溶液は、光重合開始剤 Omnirad 1173(Irgacure 1173, 0.5% [v/v])を添加後に窒素バブリングにより脱酸素し、冷蔵庫(4 °C)で 12 時間安置した。試料溶液に紫外線(365 nm)を照射することで NIPAAm のラジカル重合と MBAA による架橋反応が進行し、透明度の高い網目構造を有す

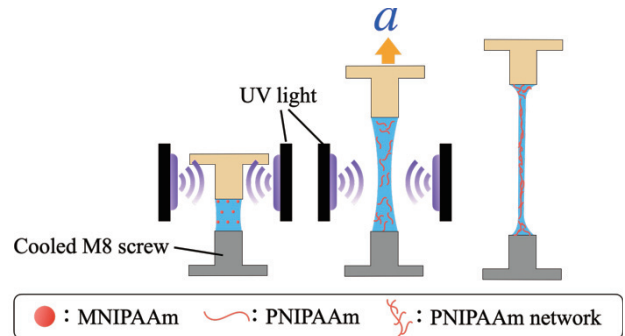


Fig. 2. Synthesis procedure of the thermo-responsive hydrogel

る化学架橋型ゲルが形成される。なお、NIPAAm は約 32 °C に下限臨界溶液温度(LCST)を示すことが知られており、この温度を境にゲルは吸水・脱水による膨潤・収縮動作を起こす。本実験での温度応答性は NIPAAm の膨潤・収縮動作のことを指す。

2.3 実験方法

2.3.1 一軸伸長流動下におけるハイドロゲルの造形

作成した伸長流動装置によるハイドロゲル合成手順を図 2 に示す。まず、PC ソフトウェア(IAI ツールボックス)を用いてリニアガイドの初期位置を設定し、引き上げ距離 14.6 mm と所定の加速度を指定した。冷却した金属を実験系の試料台下部に固定し、5 μ L の試料溶液をマイクロピペットで滴下した。UV ライト照射と同時にアクチュエータで引き上げを行い、終了後も 2.5 s 照射を継続してゲル化させた。得られたハイドロゲルは切り出してシャーレ内の純水中で 1 時間膨潤させた。本研究では、試料台冷却によるゲル形成への影響、加速度条件の違いによる収縮率および同条件での再現性を評価した。試料台冷却によるゲル形成への影響を調べるため、金属の温度が室温(24 °C)と−20 °C で比較し、加速度は 0.2 G に設定した。加速度条件による収縮率の変化についての実験では 0.01 G, 0.1 G, 1 G に設定し、それぞれ 3 回ずつ繰り返し測定を行った。

2.3.2 性能評価手法

温度応答性を評価する際の加熱・撮影法の概略図を図 3 に示す。ホットプレート(PC-400D, CORNING)の上部に 0.5 mm のアルミ板を敷き、ガラス容器の底部を均一な温度分布となるように加熱した。スマートフォンのカメラ(A52, Galaxy)を用いて、ガラス容器中のハイドロゲルを観察した。はじめにカメラは、ガラス容器の側面からライトを照射し、室温でのハイドロゲルを撮影した。その

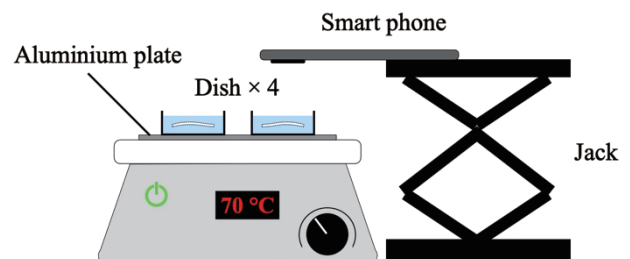


Fig. 3. Method of evaluating thermal responsiveness (swelling/shrinkage measurement)

後、ホットプレートを 70℃に設定し、1 時間加熱した。加熱後、室温と同様な手順でゲルを撮影した。撮影した加熱前と後の写真については、ImageJ を用いて長さを算出した。具体的には、ImageJ の Segmented Line という機能を用いた。Segmented Line では点と点の間を直線で引くことができる。これを用いてハイドロゲルの長軸方向の中心軸を意識しながら点を取っていき、最終的に引いた直線の長さをハイドロゲルの長軸方向の長さとした。

3. 実験結果と考察

3.1 試料台冷却によるゲル形成への影響

試料台冷却によるゲル形成への影響を確認するため、試料台として室温 24℃の環境にあった金属と-20℃の冷凍庫に約 24 時間置いた金属を使用した場合を比較する。図 4 はそれぞれのねじを用いてハイドロゲルを作成した時の写真である。室温 24℃に放置しておいた金属を使用した場合には白濁し、途中で球のようなものができていることがわかる。一方で、-20℃の冷凍庫に約 24 時間放置した金属を使用した場合は光の透過性が高く、途中で球ができることなく、まっすぐにハイドロゲルが作成できていることがわかる。室温 24℃に放置しておいた金属を使用した場合に白濁してしまう原因として、UV ライトの熱によりハイドロゲルを伸ばしている時の温度が高くなってしまっている可能性が挙げられる。本実験で使用している UV ライトは出力が強力であるがゆえに発熱も大きくなってしまっている。本実験で使用している NIPAAm は 33℃以下に下限臨界溶液温度 (Lower Critical Solution Temperature, LCST) があり、33℃よりも高い温度では白く白濁して収縮する。よって、UV ライトの熱によって温まったことで、伸ばしているハイドロゲルが下限臨界溶液温度に近づき、白濁したと考えられる。また、温度が高くなることで光重合の反応スピードが上がり、不均一な網目構造が作成されたことで白濁している可能性がある。途中で球状のゲルが作成された点については、白濁したハイドロゲルの方が下側の液糸が細いことがわかる。これより、本来であれば、引き上げられた後に上方の試料溶液の一部が下方に垂れ、それが UV ライトによって硬化することで直線状になると考えられる。一方、白濁が生じた場合には、光重合反応の

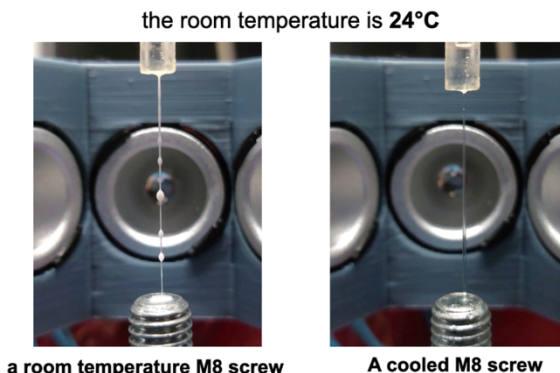


Fig. 4. Effect of M8 screw temperature on the properties of the fabricated hydrogels

進行速度が上昇した結果、垂下途中の試料溶液が硬化し、球状となったと考えられる。白濁したハイドロゲルは不均一な網目構造を有することで、膨潤時に水分子の入る隙間が無くなる。NIPAAm は 33℃以上で水分子を離すことで収縮するが、白濁したハイドロゲルでは膨潤時に水分子を持てないため、収縮率が低下する。そのため光の透過性の高いハイドロゲルを作ること、水分子の入る隙間を確保でき、収縮率を増加させることができる。よって-20℃に冷やした金属を使用した方法はハイドロゲルの温度応答性の増大に有効であると考えられる。

3.2 加速度を変化させた時の収縮率の変化

本研究では、加速度を 0.01 G, 0.1 G, 1 G と変化した条件下で収縮率の挙動を調べた。図 5 は縦軸が収縮率 $[-]$ 、横軸が対数で加速度 $[G]$ を示した片対数グラフである。収縮率については、加熱前を l_0 、加熱後を l として、 $(l_0 - l)/l_0$ で示したものである。今回の結果として、加速度を増加させると収縮率も大きくなり、特に加速度が 1 G の場合に収縮率の最大値が得られた。これより加速度の違いがハイドロゲルの収縮挙動に影響を与えることが明らかとなった。この結果は、伸長の加速度によりゲルに作用した力がゲル内部の高分子構造の形成に影響を与え、収縮挙動を制御できる可能性を示唆している。また、図 5 より同加速度でのばらつきが大きく、0.01 G の標準偏差で 0.152 である。0.01 G での収縮率の平均 0.414 に対しての割合で考えると約 36 %のばらつきとなる。本実験における収縮率のばらつきには、主に 2 つの要因が考えられる。まず 1 つ目は、加熱によって収縮したハイドロゲルが三次元的に複雑な形状となることである。その結果、画像上での長さ測定において、奥行き方向の巻き数などが不明確になり、測定値にばらつきが生じた。角度を変えて撮影した画像も用いたが、ピン트가合わず有効に利用できなかった。この問題に対しての解決策として、ゲルの形状を工夫する方法と画像取得・解析を工夫する方法の 2 通りが考えられる。その中でも今回は技術的な難易度から、ゲルの形状を工夫する方法を考

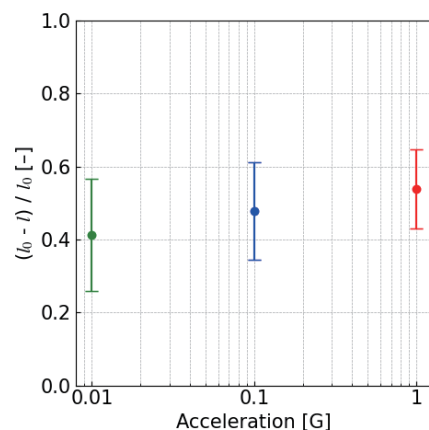


Fig. 5. Thermo-responsive shrinking behaviors of hydrogel fiber, measured three times at each acceleration

える．具体的な方法として，シャーレ内の純水の水位をゲルに覆い被さる高さにすることで，三次元的に動く空間を減らし，三次元的な構造の形成を抑制する方法を検討している．また，伸長後に切り出すハイドロゲルの長さを短くすることで，ゲルが丸くならにくいようにすることで，三次元的な構造の形成を抑制する方法を検討している．2 つ目は，実験に使用した金属の温度管理が不十分であった点である．本実験では，金属を -20°C の冷凍庫で約 24 時間保持した後，取り出して 1 分以内に実験を行った．しかし，9 回分の実験に用いた試料台の金属は，実験開始時に温度を統一していなかったため，収縮率にばらつきが生じた可能性がある．この対策として，熱電対で温度を測定し，一定温度に達した時点で実験を開始する方法が有効であると考ええる．さらに，ペルチェ素子のように温度を制御できる装置を導入することで，ねじを一定温度に保持し，再現性の高い実験を実現できると期待される．

4. 結言

本研究では，作成した一軸伸長流動装置を用いて化学架橋型温度応答性ハイドロゲルを合成し，その収縮挙動に及ぼす冷却条件の影響および引き上げ加速度の影響について検討した．その結果，試料台を冷却することで透明性の高いハイドロゲルが得られ，UV 照射による発熱の影響を抑制できることを明らかにした．また，加速度を増加させることで収縮量が増大することが確認され，高分子鎖配向による性能向上の可能性が示された．一方で，3 次元的な形状変化や金属温度のばらつきにより，再現性に課題が残された．今後は同加速度でのばらつきを抑えるために，定量的な計測手法の改善を行うことで，より再現性高くハイドロゲルを造形することができる．

参考文献

1. T. Gao, G. J. Gillispie, J. S. Copus, G. Kumar, K. Joon, J. K. Yoo, S. H. Lee, J. Jang, D.-W. Cho, H. J. Qi, Three-dimensional printing of shape memory hydrogels with internal structure, *Scientific Reports* 6 (2016) 31110.
2. F. Momeni, S. M. Mehreze, X. Guo, “A review of 4D printing”, *Materials & Design*, (2017), Vol. 122, pp. 42-79.
3. R. Yoshida, K. Sakai, T. Okano, Y. Sakurai, “Comb-type grafted hydrogels with rapid deswelling response to temperature changes”, *Nature*, (1995), Vol. 374, No. 6519, pp. 240-242.
4. P. Lin, X. Ma, C. Wang, H. He, L. Zhang, “Freezing molecular orientation under stretch for high mechanical strength but anisotropic hydrogels”, *Small*, (2016), Vol. 12, No. 32, pp. 4386-4392.

5. S. Nakajima, T. Katoono, T. Sato, H. Shin-oda, T. Kawai, M. Takata, S. Yamasaki, “Stimuli-responsive hydrogel microfibers with controlled anisotropy”, *Angewandte Chemie*, (2012), Vol. 124, No. 32, pp. 8066-8071.

Direct Ink Writing 3D プリントを活用した珊瑚礁の再生

Direct Ink Writing 3D Printing for Coral Reef Restoration

長友大輔¹, 北島千朔², 斉藤一哉²

Daisuke NAGATOMO¹, Chisaki KITAJIMA², Kazuya SAITO²

¹ 国立台湾師範大学, ² 九州大学

¹National Taiwan Normal University, ²Kyushu University

【要約】

気候変動や海洋汚染により世界のサンゴ礁は急速に減少しており、生物多様性の喪失や沿岸地域の生態系機能の低下が深刻な問題となっている。本研究ではサンゴ礁再生のための新たな人工構造のデザインと製作手法を提案する。具体的には、陶磁材料やセメント、循環型マテリアルを用いた DIW (Direct Ink Writing) 方式の 3D プリントを活用し、環境適合性と構造効率を備えた人工サンゴ礁ユニットを設計・製作する。本プロジェクトでは、「水槽内でのサンゴ培養システム」と「海中設置型の人工サンゴ礁構造」という 2 方向を設定し、九州大学と台湾師範大学、台湾成功大学においてワークショップを実施した。今後は実験的に海洋環境下でのサンゴ着生や成長への影響を評価し、地域適応型の再生支援システムとしての展開を目指す。

キーワード: セラミック 3D プリント, サーキュラーマテリアル, モデリング, アルゴリズムデザイン

【Abstract】

Coral reefs around the world are rapidly declining due to climate change and marine pollution, leading to serious problems such as the loss of biodiversity and the degradation of ecosystem functions in coastal regions. In this study, we propose a novel design and fabrication method for artificial structures aimed at coral reef restoration. Specifically, we utilize Direct Ink Writing (DIW) 3D printing with ceramic materials, cement, and circular materials to design and fabricate artificial reef units that combine environmental compatibility with structural efficiency. The project was carried out through workshops at Kyushu University, National Taiwan Normal University, and National Cheng Kung University, focusing on two approaches: coral cultivation systems in aquaria and underwater artificial reef structures. Future work will experimentally evaluate the effects of these structures on coral settlement and growth under marine conditions, with the goal of developing a regionally adaptive system for reef restoration.

Keywords: Ceramic 3D Printer, Circular Materials, Modeling, Algorithmic Design 3D

1. はじめに

Direct Ink Writing (DIW) 方式 3D プリントはペースト状またはスラリー状の材料を押し出す方式のため、樹脂や金属だけでなく、セラミック、コンクリート、バイオ材料、廃棄物由来の複合材など、多様なマテリアルに対応可能である。特に循環型マテリアルとの親和性が高く、台湾成功大学では粉砕した牡蠣殻、死んだサンゴ、産業副産物などを混合したスラリーを直接押し出し、大型 3D プリンターでの成形に成功している。

著者らは、九州大学と台湾師範大学においてそれぞれ DIW 方式 3D プリントを活用したサーキュラーデザインについて研究を行ってきた。九州大学の研究室では、生物模倣工学応用を目的としたセラミック 3D プリンティングに取り組んでおり、NTNU の研究室では、消費財廃棄物の再利用に DIW 3D プリンティングを応用する研究¹が進められている。2024 年からは UAAT-KOOU (台湾と九州・沖縄の大学間連合) の支援を受け、DIW 3D プリントと AI 技術を用いたサーキュラーマテリアルの活用について共同研究をスタートさせている。本発表では 2025 年度に実施しているセラミック 3D プリントや建築用 3D プリンティングを応用した珊瑚礁再生技術に関するワー

クショップについて報告を行う。

2. 珊瑚礁の再生

気候変動による海水温上昇や海洋汚染、沿岸開発の影響により、世界のサンゴ礁は急速に減少し、生物多様性の喪失や沿岸生態系機能の低下が深刻な課題となっている。とくにサンゴの成長は遅く、一度失われた群集の自然回復には長い時間を要するため、積極的な再生技術の開発が求められている。本研究プロジェクトでは珊瑚礁が再生する際の足場となる構造体を AI 技術やアルゴリズムデザインツールでモデル化し、DIW 3D プリントで造形するワークショップを行った。最初に行ったオンラインセミナーでは台湾海洋大学の識名教授から珊瑚礁の再生支援についてのレクチャーを受け、6 月に九州大学に 7 月に台湾成功大学でワークショップを行った。識名教授のレクチャーを基に、アイデアの方向性として以下の 2 つの方針を与えた。

- ① 水槽内でのサンゴ培養において珊瑚の断片を植えるポッド (Fig. 1)
- ② 海中に設置する珊瑚礁の足場 (Fig. 2)

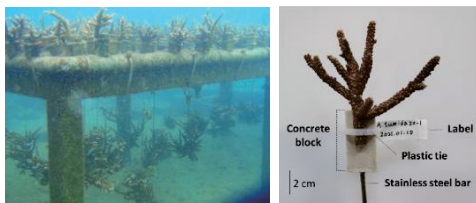
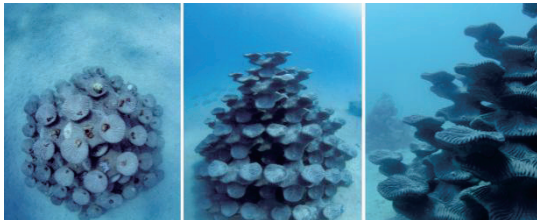


Fig. 1. Direction ①: Culturing Coral System

Fig. 2. Direction ②: Artificial Coral Reef Structure²

3. 九州大学でのワークショップ

第1回ワークショップは2九州大学、台湾師範大学、台湾成功大学から20名の学生が参加し、2025/5/7-9に九州大学大橋キャンパスで行われた。参加者は上記の①、②の方針を基に、3DCAD、アルゴリズムデザインツールを用いて構造体をそれぞれ設計し、大橋キャンパスセラミックラボの陶芸用3Dプリンタ(SYNOSOURCE-2020)を用いて試作品の出力を行った。Fig. 3に成果物の一部を示している。さらに、本ワークショップでは、2次元イメージから3次元モデルを生成するAI技術の応用も試みた。これは、3Dプリンティングに不可欠な3Dモデリング技術の習得に伴う学習上の障壁を緩和し得る可能性について検証する試みである。著作権等の観点から課題は残されているものの、創造性を補助するツールとしての有用性は十分に裏付けられた。AI技術の応用例の一部をFig. 4に示す。

4. 台湾成功大学でのワークショップ

第2回ワークショップは、2025年6月18日から20日にかけて台湾成功大学で実施された。本ワークショップでは、第1回の研究成果を解析するとともに、台湾成功大学と産学連携研究を行っているC-CUBEが所有するDIW方式3Dプリンタ(EVERPLAST EM3-6030-CM)を用いて、原寸大の人工珊瑚礁プロトタイプ製作を試みた。C-CUBEでは、産業副産物であるスラリーを代替コンクリートとして活用する研究を進めており、本研究でもその材料をDIW方式3Dプリンタで使用した(Fig. 5)。また、本ワークショップでは、DIW方式3Dプリンティングにおける最大の課題である傾斜角度や開口部の設計上の考慮について、実践的な知識を講義として組み込み、その内容を実寸大人工珊瑚礁の設計に反映させた。さらに、最終日には実際の3Dプリンティング現場に立ち会い、問題点の改善や今後の設計発展に関する討論を行うなど、DIW方式3Dプリンタの特徴である高速性を活かした学習と検証の場となった。ワークショップの内容の一部をFig. 6に示す。

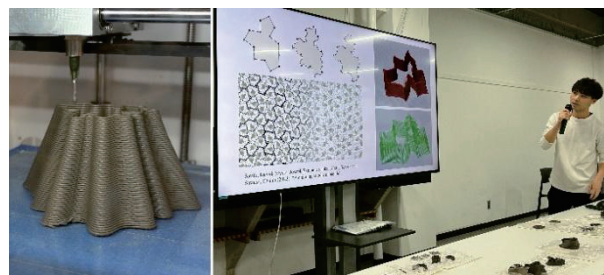


Fig. 3. Outputs of the first workshop.

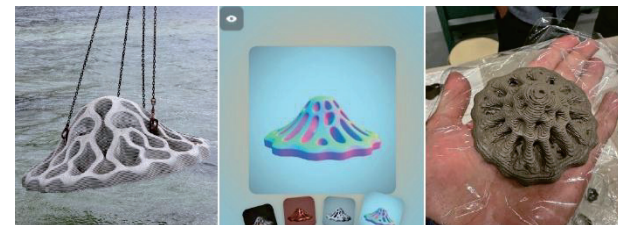


Fig. 4. Application of derivative AI technologies to DIW printing.



Fig. 5. Research on the utilization of industrial by-products conducted at C-CUBE.

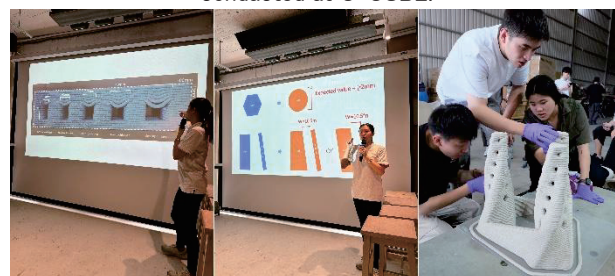


Fig. 6. Outputs of the second workshop

5. まとめ

九州と台湾においてDIW3Dプリンティング技術とAI、サーキュラーマテリアルを用いた珊瑚礁再生プロジェクトに関する国際ワークショップを実施した。プロトタイプを含む成果物は2025年10月に台湾師範大学で展示予定である。今後は台湾と九州の離島におけるフィールドスタディや、構造体を実際に海中設置して実証実験を行う計画である。

参考文献

1. D. Nagatomo, et al., "Bottom-Up Circular Economy with the Alternation of Recycling Plastic Waste in CE Strategies by Adapting Open-Source Design and Adaptive Manufacturing", World Design Assembly 2023 Research and Education Forum, Japan, (2023, Oct).
2. Leef design Lab, <https://www.reefdesignlab.com/> (2025/9/11 Access)

ジッパーを取り付けた円環型の帯による負曲率曲面模型の作成

Fabrication of Hyperbolic Plane Models Constructed from Zippered Annular Strips

山崎玲美, 割鞘奏太, 舘知宏

Tamami YAMASAKI, Kanata WARISAYA, Tomohiro TACHI

東京大学大学院

The University of Tokyo

【要約】

負曲率曲面は自然界に数多く存在し、その形を模倣し平面の材料から作成しようとする取り組みは過去に多くなされてきた。その一例として、同一の円環の内と外をつなげると負曲率曲面が生まれることが知られている。本研究ではまず、同一の円環からなる負曲率曲面において、接続方法により形状が変化することに着目し、そのメカニズムを解明した。また、円環の内側と外側を接続可能なジッパーを設計し、円環のエッジにジッパーを取り付けた形状を3D プリントで複数造形し、様々な負曲率曲面へと組み換え可能な幾何学模型を作成した。これにより、単一のパーツから様々な負曲率曲面を容易に作成することを実現した。

キーワード: 負曲率曲面, 微分幾何, 3D プリンティング, ペーパークラフト, ジッパー

【Abstract】

Surfaces with negative curvature are abundant in nature, and many attempts have been made to reproduce their forms using flat materials. One known method is to generate a hyperbolic plane model by connecting the inner and outer edges of annuli. In this study, we first focused on how the shape of such annular hyperbolic planes varies depending on the connection method and clarified the underlying mechanism. We then designed a zipper that allows the inner and outer edges of an annulus to be joined and produced multiple identical 3D-printed parts with zippers attached to the annular edges. This enabled us to construct geometric models that can be reassembled into various hyperbolic planes. In doing so, we realized an easy way to create multiple types of hyperbolic plane models from a single component.

Keywords: hyperbolic plane, differential geometry, 3D printing, papercraft, zipper

1. 序論

自然界には、Fig. 1 のケイトウや、レタス、サンゴ、アサガオのような鞍型曲面から生じる over curvature な現象が多くみられる。これらは、differential growth という現象により生まれており、成長率の勾配により、ある地点まではガウス曲率が負な曲面を形成し、ある地点を境に面内に収まらなくなり、面外変形が起こりひらひらとした曲面形状が生成される。



Fig. 1. Flower of Celosia Forming a Surface of Negative Curvature

その形状の美しさに魅了され、平田晃久による「からまりしろ」の哲学による建築[1]、Nervous Systemによるジュエリー[2]など、多くの作品が制作されている。ガウス曲率が一定で負曲率な曲面は、数学的には Hyperbolic space (すなわち負曲率曲面) の三次元の埋め込みととらえられる。この数理模型を平面の紙から作る方法は、Beltrami や Thurston により提案された[3]。また、hyperbolic space 三次元で造形する方法として、Taimina

によるかぎ針編みで作成する方法[3]や、子ども用プレイマットを用いる方法[4]が考案されている。さらに、Ono, Kamijo, Kase *et al* (2024)によって、曲げシザーズ構造を用いた動的に成長する一定負曲率曲面の設計方法が確立された[5]。

本研究では、まず、William Thurston による環状の紙から作られた hyperbolic space において、端部の接合方法を変えることによって形状変化が起こることを報告し、そのメカニズムを解き明かす。また、曲線ジッパーを作成し、形状変化メカニズムにより設計した形状を面とジッパーを一体に3D プリントすることで、組み換え可能な幾何学模型を製作する。これにより、制作の難しい一定不曲率曲面を容易に作成することが可能となり、また、単一の部材から様々な形状の一定負曲率曲面への組み換えが可能となる。

2. 円環状の紙帯からできる hyperbolic space

2.1. William Thurston のモデルの分析

Thurston は Fig. 2 のように複数の円弧状の紙帯の外と内を接ぎ合せるとあわせると、hyperbolic space の3次元での埋め込み形状が現れることを発見した[3]。それを基に作品制作やワークショップが行われ、様々な形状が試された。

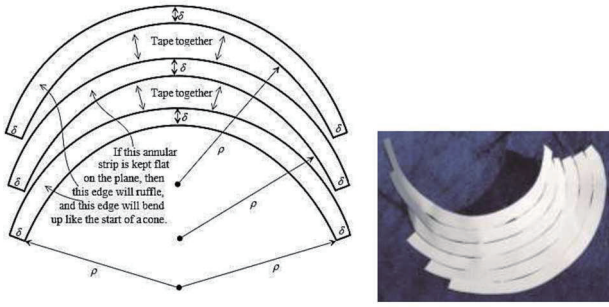


Fig. 2. Annular strips for making an annular hyperbolic plane (reprinted from [3])

それらの曲面はすべて一定負曲率曲面の近似である。以下にその導出を示す。円環の外側の半径を R 、内側の半径を r とする。ガウスボンネの定理より、

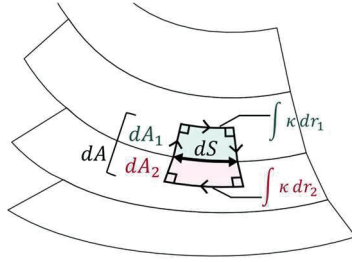


Fig. 3. Proof of constant negative curvature

$$2\pi = \oint \kappa dr + \sum_{i=1}^4 \theta_i + \int K dA$$

$\sum_{i=1}^4 \theta_i = 2\pi$ であることを踏まえ、以下のように変形でき、

$$K = -\frac{\oint \kappa dr}{dA} = -\frac{\int \kappa dr_2 - \int \kappa dr_1}{dA_1 + dA_2}$$

実際に計算すると、

$$K = -\frac{8}{R^2 + 6Rr + r^2}$$

ここで、 $r = kR$ ($0 < k < 1$)とおくと、

$$K = -\frac{8}{R^2(k^2 + 6k + 1)}$$

すべての接合部において同様のことが成り立つため、一定負曲率曲面であるといえる。また、 $k \rightarrow 1$ のとき、 $K \rightarrow -1/R^2$ となり、擬球と同様の曲率を示す。

3. 接合方法の違いによるバリエーション

3.1. 円環状の紙帯からできる hyperbolic model の分類

Thurston のアイディア[3]を基に、実際に様々なモデル制作を行なった。そのうち、今回は紙帯の接合部の対称性が保たれる範囲で作成したモデルを取り扱う。モデル形状を以下の Type A,B,C のグループに分けて説明する (Fig.4)。

Type A: 円環で円錐の一部を作り、平行に接ぎあわせていったモデル

Type B: 1本の円環を作りその外と内を接ぎ合せて螺旋状に巻いていったモデル

Type C: 複数本の円環の内と外を接ぎ合せてから、螺旋状に内と外を接ぎ合せていったモデル

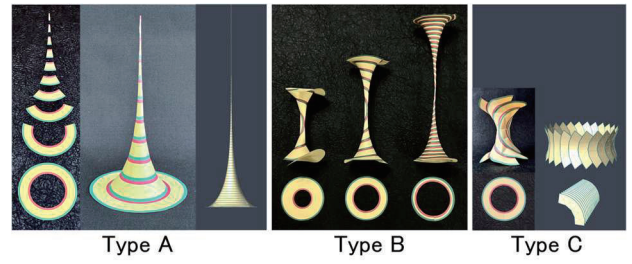


Fig. 4. Classification of the paper models

3.2. 形状変化メカニズム

3.2.1. 製法による形状の特徴

Type A は先端が無尽遠へと伸びていくのに対し、Type B,C は最も径が小さいところを軸に上下対称な有限な形になる。

Type Bにおいては、内周と外周での接合は 2π の差をつけて始める。最も径が細くなる部分においてはこの差が0となり、上端においては差が -2π となる。これにより、下端が平たい状態から、中央部の細い部分を通り、上端で再び平たくなるという形状が生まれる。これらをふまえ、最も径が細くなるまでに必要な周数 x は、 $x = R/(R-r) = 1/(1-k)$ と求まり、作成に必要な本数が予測できる。この $k \neq 1$ の時に x が有限の値を持ち、有限長さで最も細い径が現れ、巻き向きの反転が起こる。 $k = 1$ であるとき、 $x = \infty$ となり反転が起こらずに、永遠に端部が細くなり伸びていき Type A のような形状が生まれる。



Fig. 5. Process of type B model construction and its characteristics

次に、Type C の場合を考える。この時、帯同士は $1/N$ 本ずつずれた位置関係で接合をはじめ、 N 本で 2π の差がつくようにする。この場合 Type B 同様に、上下対称形の形が生まれる。最も径が細くなるまでに必要な周数 x は $x = R/N(R-r) = 1/N(1-k)$ と求まり、Type A,B と同様に $k \neq 1$ の時に反転が起こり、 $k = 1$ であるとき端部が無尽遠に伸び、反転が起こらない。

3.2.2. 形状変化の理論式

本研究での紙帯モデルは、一定負曲率曲面の近似であることを考慮し、形状変化を表す理論式をもとめる。一般的にガウス曲率が負で一定な回転体は $\alpha = 1/\sqrt{-K}$ としたとき以下の式で表すことができる。

$$x(u) = Ae^{\frac{u}{\alpha}} + Be^{-\frac{u}{\alpha}}$$

$$z(u) = \int_0^u \sqrt{1 - (x(u)')^2} du$$

曲面上の位置パラメータ u を、接ぎ合わせ部のうち径が最大な部分を $u = 0$ 、最小の部分を $u = u_0$ 、径が最小である中央部の太さパラメータ $x(u_0)$ を $x(u_0) = x_0$ と定義する。形状においける条件を基に α 、 β を求めると以下ようになる。

$$\alpha = \frac{x_0}{2} e^{-\frac{u_0}{\alpha}}, \quad \beta = \frac{x_0}{2} e^{\frac{u_0}{\alpha}} \quad \left(x_0 = \frac{2\alpha}{e^{\frac{u_0}{\alpha}} - e^{-\frac{u_0}{\alpha}}} \right)$$

この式は、 $u_0 \rightarrow \infty$ のとき $\alpha = 0$ となり、擬球を表す。

$\alpha = 1$ において、 u を変数と見たときの式の解をもつ範囲の z 軸周りの回転体は、 u_0 の値に応じて Fig. 6 のように形状が変化する。

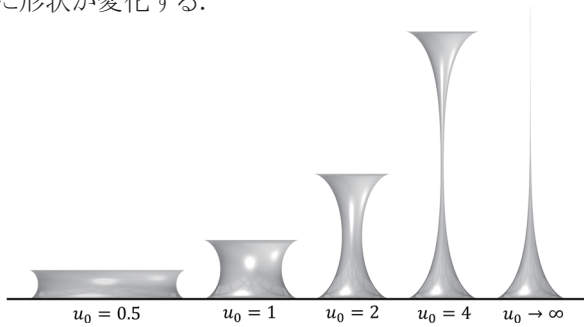


Fig. 6. Shape Variation with Variable u_0

紙モデルにおいては、 $R = 1$ において、 k, N がパラメータとなり形状が変化する。最も細い部分での週の長さに着目すると、理論式と紙モデルの間には、 $2\pi x_0 = (1 - k)RN$ が成り立つ。

また、紙モデルにおいては $\alpha = R\sqrt{(k^2 + 6k + 1)}/8$ である。理論式の $u = 0$ 、 $2u_0$ はそれぞれ、紙モデルの接合部の端部、 $u = u_0$ は中央の最もくびれ部分に対応している。(Fig. 7)

ここで一例として、 R 、 k を固定値($R = 10$, $k = 0.8$)とし、 $0 \leq z < z(u_0)$ の範囲で紙の模型を作成した。擬球を近似したモデルの $z-x$ 平面上の測地線の内、片方を切り、スライダを取り付け、 N が実数値をとるようにスライドさせることで、曲率不変な条件における N の変化による形状変化を再現することができた(Fig. 8)。

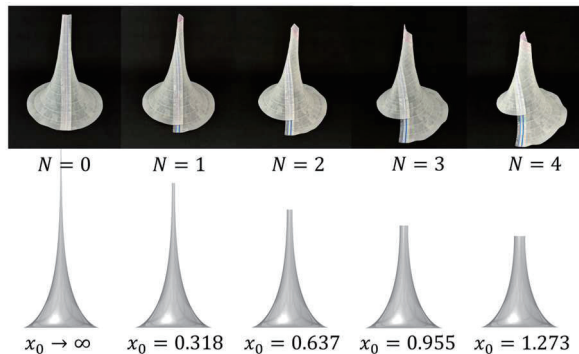


Fig. 8. Paper model enabling shape variation

4. 幾何学模型のファブリケーション

以上で示してきた理論を使って、幾何学模型のファブリケーションを行った。模型を構成するパーツは円環の外と内を接合するジッパーと円環状の面から構成されている。両者を一体となった状態を3D プリントして作成し、その後組み立てを行った。そのため、同形状で異なる曲率を接続可能な円環状のジッパーが必要となった。

平面上の曲線ファスナーとして YKK による EXCELLA® Curve がある[6]。このファスナーは、接合後に平面上の曲面を形成する。そのため、接合後にジッパーが立体形状を構成する本模型には適さない。また、Ryo Masuda *et al.* (2024)によるジッパーを取り付けたデキスタイルは、平面で作成され、組みあがった後に立体形状を構成する[7]。しかしこの設計手法では、本模型における曲率が常に変化する接合部を、同一形状の務歯(むし)から作成することは不可能である。そのため、外側と内側の務歯がそれぞれ同一形状で、平面状の曲線で造形した後に接合すると三次元曲線になるジッパーの設計を試みた。これにより、全く同じ円環から様々な形状への組み換えが可能になることを期待する。

4.1. ジッパーのモデル化

ジッパーの務歯と面、スライダのプログラムを Rhinoceros の plug in の Grasshopper にて作成した。プログラムに複数の変数を設け、試作を繰り返し適切なパラメータを探した。設計の流れを以下に示す(Fig. 9)

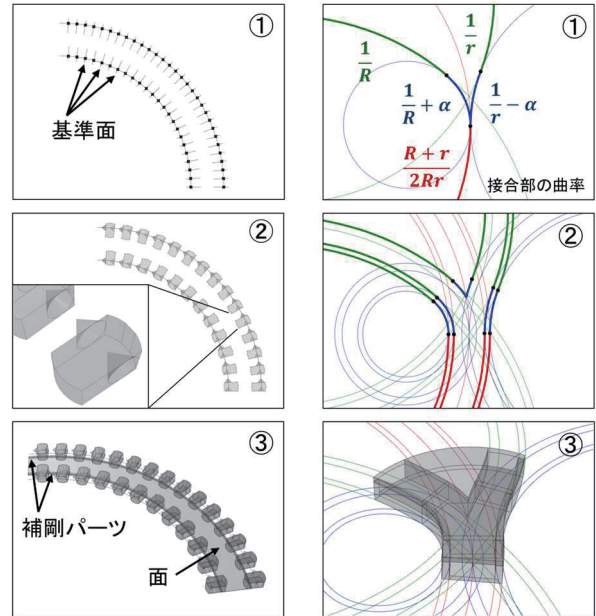


Fig. 9. Design procedure of the zipper

<務歯と面>

- ①外、内の円弧を一定の長さで分割し、分割点と中心点を結ぶ線上に基準面を配置する。
- ②分割したセグメント1つおきに務歯を配置する。
- ③務歯の寸法を踏まえて適切なオフセットをとり、面と補剛パーツを配置する。

務歯を円錐形にすることで曲率がある程度大きくてもジッパーが外れることを防いだ。また、務歯に丸みをつけることで、かみ合わせる際の抵抗を小さくした。さらに、補剛パーツを設けることで、スライダーの入り口での面外変形を少なくして、ジッパーの絡まることを防いだ。

<スライダー>

①ジッパーの接合部が通る線を作図する。それぞれの円弧の曲率は Fig. 9 に示すとおりで、それぞれの接合部の円弧がなめらかにつながるようにする。

②①の作図線の務歯の寸法でオフセットし、スライダーの形状を作図する。

③②の線を基に部分ごとにソリッドを作成し、それを結合することでスライダーを設計する。

4.2. ファブリケーション

模型の作成は、ジッパーに TPU for AMS フィラメント、スライダーに PETG Translucent を用い、Bambu Lab の X1-Carbon で 3D プリントをおこなった (Fig. 10)。今回は $k = 0.8$, $R = 7.5$ で半円を 20 本造形し、 $N = 10$ と $N = 20$ の間で組み換え可能な幾何模型とした (Fig. 12)。



Fig. 10. 3D-printed zipper parts

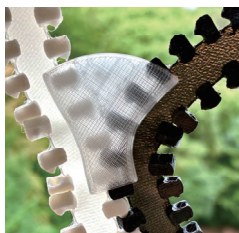


Fig. 11. Zipper engagement



$k = 0.8, N = 10$ $k = 0.8, N = 20$

Fig. 12. Reconfigurable geometric model

制作を通じて、問題点が明らかになった。まず、ジッパーの接合自体が1本同士の場合はスムーズに行えるが (Fig. 11)、もうすでに複数つながっている面同士においては、面の硬さや接合部の3次元曲線が変化するために、本研究のスライダーでは対応できなかった。そのため、多くの部分で手作業により務歯をはめ込む作業を行った。また、ジッパーが絡まることがあり、それによりジッパーに負荷がかかり、面部分の伸びや破損につながった。今後の研究としては、制作過程における曲率変化に対応できるスライダーの形状を考える必要がある。また、やわらかい一方破れにくい面部分の材料や、ジッパーに負荷をかけにくい務歯の形状やパラメータの検討が必要である。

5. 結論

本研究では、円環状の紙帯から作成可能な一定負曲率曲面に関して、紙帯の寸法や接続方法を変化させると形状変化が起こるメカニズムを明らかにした。また、異なる半径を持つ円弧を、任意の位置でのつけ外し可能なジッパーを提案し、同一の円環からなる、組み換え可能な幾何模型を実現した。一方、ジッパーの設計・制作にはいくつかの問題点が残っており、だれもが気軽に触って遊べる幾何模型の実現に向け、形状や材料のさらなる検討が必要である。

謝辞

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR232T の支援を受けています。

本研究にあたって、「個と群」(文理融合ゼミナール)にて野老朝雄氏にご指導を賜り、その成果が本研究へとつながりました。また、館研究室のスタッフ・先輩の皆様にはファブリケーション機材に関する助言と技術的支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

1. 平田 晃久 建築設計事務所, WORKS, <https://www.hao.nu/works/>, (accessed 2025-09-14)
2. Nervous System, “Floraform - an exploration of differential growth”, 2015, <https://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=6721>, (accessed 2025-09-14)
3. David W. Henderson, Daina Taimina, *Experience Geometry: Euclidean and Non-Euclidean with History*, Chapter 5. Straightness on Hyperbolic Planes, Books by Independent Authors, 2020, <https://doi.org/10.3792/euclid/9781429799850>
4. Honors College to Present 'Math Circus', University of Arkansas, <https://news.uark.edu/articles/57514/honors-college-to-present-math-circus->, (accessed 2025-09-14)
5. Fuki Ono, Haruto Kamijo, Miwako Kase *et al.* “Growth-induced transformable surfaces realized by bending-active scissors grid”, Architectural Intelligence, vol 3, 2024, <https://doi.org/10.1007/s44223-024-00065-0>
6. YKK 株式会社, EXCELLA Curve, 2011, <https://ykkdigitalshowroom.com/jp/item/162/>, (accessed 2025-09-14)
7. Ryo Masuda, Yuta Noma, Koya Narumi, “Computational Design and Fabrication of 3D Printed Zippers Connecting 3D Textile Structures”, UIST Adjunct '24, 2024, Article No. 20, pp 1 - 3, <https://doi.org/10.1145/3672539.3686743>

Additive Manufacturing of High-resolution Poly(butylene succinate) Scaffolds via Melt Electrowriting

Tong Sun, Liu Yang, Simon Luposchainsky, Huali Lu, Shinichi Yagi, Huaizhong Xu

Kyoto Institute of Technology

【Abstract】

Poly(butylene succinate) (PBS) is a biodegradable polymer applied in tissue engineering. Many methods for processing PBS have resolution limitations or introduce defects that render them unsuitable for such use cases. Melt electrowriting (MEW) is a novel 3D printing technology to fabricate high-resolution scaffolds. This study investigates the printability of PBS with different crystallinities and melt mass flow rates via MEW to make the material available for a wider range of tissue engineering applications. The results show PBS pellets with high crystallinity and low mass flow rates can be processed for at least 24 h, with consistent morphology and stable flow rate. These findings expand PBS processing methods and improve long-term printability in MEW of various polymers.

Keywords: melt electrowriting, poly(butylene succinate), crystallinity, melt mass flow rate, printing stability

1. Introduction

Poly(butylene succinate) (PBS) is a biobased and biodegradable polyester, which can be made by the polycondensation of bio-based succinic acid and fossil-based 1,4-butanediol [1]. As a semi-crystalline polymer, PBS exhibits a melting point of approximately 115 °C, and its glass transition temperature ranges from -45 °C to -10 °C [2]. The macromolecular chain of PBS involves repeating units of butylene succinate ($C_8H_{12}O_4$), making PBS have excellent characteristics, including good biocompatibility and biodegradability, and the mechanical performance of PBS is even similar to that of low-density polyethylene [3,4]. Besides, its high extrusion speeds and short moulding cycles make it suitable for multiple forming processes [3].

Conventional processing methods to achieve PBS products include solution electrospinning (SES) [5] and fused deposition modeling (FDM) [6]. PBS scaffolds produced by SES have high fiber-specific surface areas since the nano- or micro-scale fiber diameter, which is beneficial for cell attachment [7]. Nevertheless, the randomly arranged pore size and potential organic solvent residues restrict the cell culture and proliferation [8]. In contrast, PBS scaffolds achieved by FDM perfectly avoid organic residual, and the pore sizes within scaffolds are customised. However, the diameter of fibers fabricated using FDM is limited to 100 μm since die swelling for non-Newtonian polymeric melt, which shows restriction on heart valve regeneration and so on [9,10]. Thus, new methods are urgently needed to fabricate high-resolution microscale PBS scaffolds.

Melt electrowriting (MEW), combined with SES and

FDM, has great potential to deal with these problems. Scaffolds fabricated by MEW have fiber diameters below 1 μm [11] and fiber spacings less than 25 μm [12]. And the adjustable porosity and interconnectivity within scaffolds provide ideal access for cell migration and nutrient transport [13]. While printing, polymers were melted in the print head above their melting points. A suitable air pressure extrudes the molten polymer through the nozzle, and an applied voltage is used to drag the melt into a jet that passes through the nozzle to the collector zone, depositing on the moving collector [14].

However, melt-electrowriting is a time-consuming process involving melt with a low mass flow rate (0.5-20 $\mu L/h$) and prolonged exposure to high temperatures, which poses a serious challenge to the polymer's thermal stability [9]. The stability of mass flow using MEW for long-term printing is highly dependent on the properties of the molten polymer, especially its crystallinity and melt mass flow rate (MFR). Polymers with high crystallinity have a molecular arrangement that benefits thermal stability and consistent melting behaviour, which helps maintain a stable flow during long-term printing [10]. Besides, while printing MEW scaffolds using polymers with high MFR, the required melting temperature for achieving stable jet behaviour is at a low stage, reducing the risk of the polymer's thermal degradation. It is a pity that few literatures focus attention on the role of crystallinity and mass flow rate of polymers on MEW printing, especially for long-term processing.

Herein, we selected PBS pellets as a candidate for MEW applications for the first time, demonstrating controlled crystallinities and reasonable mass flow rates

to tailor the printability for MEW. Controlled heat treatment time changed the crystallinities of the material, and low melt mass flow keeps the processing temperature at a low level, both of which can help reduce the risk of thermal degradation while processing. Significantly, since all the pellets were commercially available in large quantities, this method can be easily adopted by other laboratories or used directly in commercial productions.

2. Experimental

Materials: Two models of poly(butylene succinate) (FZ91PM, PBS_91; FZ71PM, PBS_71) were supplied by Mitsubishi Chemical Corporation (Tokyo, Japan). These two PBS have the same melting point (115 °C, ISO 3146) and density (1.26 g/cm³, ISO 1183). The mass flow rates are 5 g/10 min for PBS_91 and 22 g/10 min for PBS_71 (190 °C, 2.16kg, ISO 1133).

Preparation of PBS with various crystallinity: PBS pellets were placed in a vacuum oven at 100°C for different treatment times. The crystallinities of as-treated pellets were evaluated by a differential scanning calorimeter (DSC) device.

MEW processing: A customized melt electrowriting device was used for MEW processing (Fig. 1). About 1 g of as-treated PBS pellets were loaded into a 3 mL stainless-steel syringe equipped with a stainless-steel nozzle (30 G for PBS_91 and 25 G for PBS_71) and preheated to the processing temperature for 30 min to ensure complete melting. the collector was a glass plate with a 3 mm thickness. The printing parameters were: 3.5 kV applied voltage, 100-200 kPa nitrogen pressure, 2 mm nozzle-to-collector distance, melt temperatures were 140 °C for PBS_71 and 200 °C for PBS_91, collector temperatures were 50 °C, and the printing speed was set at 2 mm/s for PBS_91 and 6 mm/s for PBS_71.

Characterization: The morphologies of PBS MEW scaffolds (9 mm×9 mm) were recorded by a scanning electron microscope (SEM, Hitachi S-3400 N, Hitachi, Co., Ltd., Tokyo, Japan). Jet images while printing the first layers of scaffolds were recorded by a CCD camera (XW200, Shenzhen Hayear Electronics, Co., Ltd., China) to evaluate the jet lag angle variation via ImageJ software (Fig.1). The mass flow rate of the jet was calculated from the mass of as-printed scaffolds, measured by an electronic balance (XS105 DualRange, Mettler Toledo, Switzerland). The volume flow rate (Q_v) was calculated by the equation of $Q_v = Q_m / \rho$, where Q_m refers to the mass flow rate of the jet, and ρ refers to the density of PBS melt. The molecular weight analysis of all samples was performed using gel permeation chromatography (GPC, Shimadzu, Co., Ltd., Kyoto, Japan). Dynamic viscosity measurements of PBS melt were performed on a

rheometer (Rheosol-G1000T, UBM, Co., Ltd., Kyoto, Japan). The melting point and crystallinity of PBS pellets and as-printed PBS scaffolds were measured on a differential scanning calorimeter (DSC 3100SA, Netzsch, Yokohama, Japan).

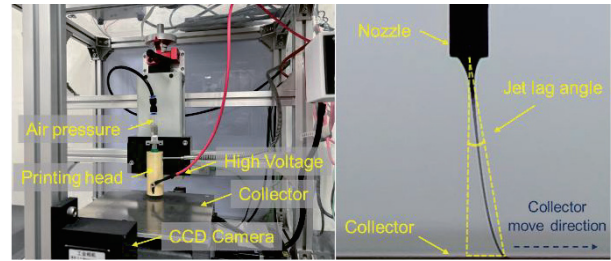


Fig.1. MEW device and jet images while printing.

3. Results and discussion

3.1 The printability of PBS with various crystallinities

PBS_91 pellets were used for carrying on the study on the printability of PBS with various crystallinities. DSC test results are shown in Fig. 2A. PBS_91 pellets, both before and after thermal treatment, have characteristic dual melting behaviour, with two distinct endothermic peaks observed in the DSC curve [15]. The first melting peak, located at the lower temperature (from 89.1 °C to 98.5 °C), shows a gradual shift toward higher melting temperatures and clear increases in peak area with increasing drying periods. And the second melting peak, appearing around 113.7 °C, remained relatively constant in both position and intensity. The lower temperature peak typically corresponds to less perfect or smaller crystallites formed during cooling or secondary crystallization, while higher temperature peaks are associated with more thermodynamically stable, larger crystals, generated from the melting-recrystallization-remelting process [16]. Thus, the crystallinity of PBS_91 pellets has a clear increase from 63.3% to 73.1% with increasing drying periods.

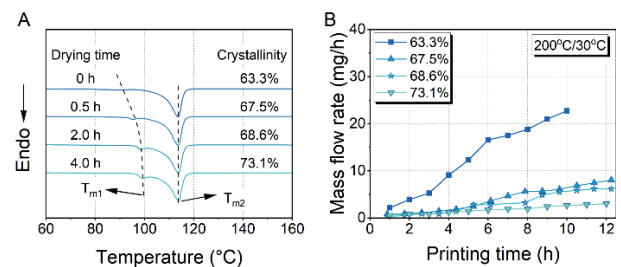


Fig. 2. (A) DSC curves of PBS_91 pellets after various drying periods. (B) The mass flow rate of PBS_91 pellets with various crystallinities for long-term printing.

To evaluate how the crystallinity of polymer affects the printing stability, PBS_91 pellets with different crystallinities were processed at 200 °C/30 °C (melt temperature/collector temperature). Fig. 2B shows that

PBS_91 pellets with the crystallinity of 63.3% exhibited a vast difference in mass flow, swept from 2.14 mg/h to 22.73 mg/h. In comparison, pellets with the crystallinity of 73.1% exhibited only a slight variation in 10-hour printing (from 0.57 mg/h to 2.66 mg/h). These results demonstrated that polymers with high crystallinity maintain stable melt mass flow during MEW processing. Thus, a crystallinity of 73.1% was adopted for the subsequent experiments to ensure the stable MEW printability using PBS_91 pellets.

3.2 The printability of PBS with different mass flow rates

Based on the previous discussion, PBS_91 and PBS_71 pellets were dried in a vacuum oven to get the highest crystallinity (73.1% for PBS_91 and 74.5% for PBS_71). To achieve a stable jet during MEW processing, the minimum melting temperatures for PBS_91 and PBS_71 were 200 °C and 140 °C, respectively, with all collector temperatures set at 50 °C. SEM images of PBS scaffolds are shown in Fig. 3. In the early stages of MEW printing, PBS_91 scaffolds exhibited fiber breakage and irregular fiber stacking. With long-term processing, the fibers gradually aligned vertically, and the scaffold structure became more defined in 5-hour printing. However, fiber misalignment emerged after 24-hour printing, resulting in a decrease in structural fidelity. Despite these, fibers within all the PBS_91 MEW scaffolds remained tightly stacked in the remaining 19-hour printing. In contrast, PBS_71 scaffolds consistently maintained vertically aligned fibers and a well-organized internal structure throughout the 24-hour process. Additionally, fibers within scaffolds partially adhere to each other, resulting in pores in the scaffolds after long-term manufacturing.

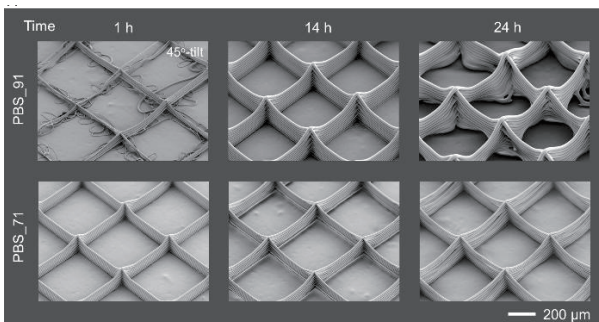


Fig.3. SEM images of MEW scaffolds fabricated by PBS_91 and PBS_71 for different printing periods.

These distinct morphologies are closely associated with the evolution of jet dynamics during printing. For PBS_91, the jetting angle decreased unevenly from approximately 45° to nearly 0° over time (Fig. 4A). A large initial jet lag angle indicated a significant velocity

mismatch between the polymer jetting speed and the collector movement, causing excessive stretching of the jet by the moving collector. This mismatch resulted in fine fiber diameter or even fiber breakage (Fig. 3). As printing continued, this velocity difference between the jet speed and collector movement was gradually reduced, leading to a corresponding decrease in the jet lag angle and an increase fiber diameter within MEW scaffolds (Fig. 3A).

For PBS_71, the jet lag angle increased rapidly from 0° to 32° within the first 3-hour printing period, followed by a slow and steady rise over the remaining 21 hours (Fig. 4A). During this steady printing phase, the melt volume flow rate increased only slightly (from 3.0×10^{-3} cm³/h to 3.5×10^{-3} cm³/h), which is significantly stable than that observed in PBS_91 (Fig. 4B). This small change in volume flow rate indicated a relatively constant velocity difference between the jet and the collector, contributing to consistently high-defined scaffold structures (Fig. 3). Thus, MEW scaffolds fabricated using PBS_71 show superior printability and structural integrity, compared to those produced by PBS_91.

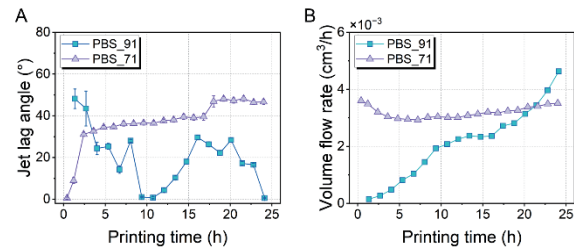


Fig. 4. (A) The jet lag angle and (B) volume flow rate of the jet while printing MEW scaffolds using PBS_91 and PBS_71 for long-term printing.

The changes in volume flow rate of these two models of PBS melt are closely associated with the complex viscosity of the PBS melt. As is shown in Fig. 5A, the complex viscosity of PBS_91 melt decreased sharply from 98.5 kPa to 0.3 kPa, whereas PBS_71 melt exhibited a more moderate reduction from 32.7 kPa to 10.9 kPa. The stability of polymer complex viscosity ensures a consistent volumetric flow rate. The variation of the molecular weight of polymers plays an essential role in their different viscosity behaviour. As is shown in Fig. 5B, the molecular weight of scaffolds fabricated by PBS_91 decreases rapidly from 4.5×10^5 to 1.8×10^5 (decreased by 2.7×10^5) in 3-hour printing and then decreases gradually to 1.1×10^5 in the remaining 21 hours, which is much unstable than that of PBS_71 (ranges from 1.7×10^5 to 1.5×10^5). This may be because PBS_91 was processed at 200 °C, while PBS_71 was printed at 140 °C. Since these two models of PBS have the same melting point (150 °C), the higher melting temperature accelerated the thermal

degradation of PBS_91 melt, leading to a rapid decrease in viscosity, whereas the lower melting temperature allowed PBS_71 melt to have a slower degradation, maintaining stable viscosity for longer printing.

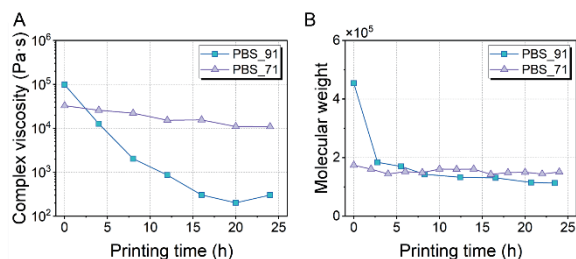


Fig.5. (A) The complex viscosity of the jet and (B) the molecular weight of scaffolds after long-term printing.

4. Conclusion

This study systematically evaluated the printability of PBS with different crystallinities and melt mass flow rates using the MEW device. PBS with high crystallinities were found to reduce the risk of thermal degradation during printing, thereby supporting long-term MEW processing. PBS pellets with a high mass flow rate enabled continuous MEW processing for over 24 hours under low melting temperatures, producing scaffolds with consistent volumetric flow rates and well-defined structures, which are superior to their low-flow-rate pellets.

Reference

1. S. Kato, T. Ueda, T. Aoshima, N. Kosaka, S. Nitta, BioPBS™ (Polybutylene Succinate), in: A. Künkel, G. Battagliarin, M. Winnacker, B. Rieger, G. Coates (Eds.), *Synthetic Biodegradable and Biobased Polymers*, Springer International Publishing, Cham, 2023: pp. 269–304.
2. L. Aliotta, M. Seggiani, A. Lazzeri, V. Gigante, P. Cinelli, A Brief Review of Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Its Main Copolymers: Synthesis, Blends, Composites, Biodegradability, and Applications, *Polymers* 14 (2022) 844.
3. M. Barletta, C. Aversa, M. Ayyoob, A. Gisario, K. Hamad, M. Mehrpouya, H. Vahabi, Poly(butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications, *Progress in Polymer Science* 132 (2022) 101579.
4. M. Fritz, T. Lauschke, T. Schlebrowski, L. Beucher, P. Schweyen, B. Alenezi, B. Hahn, G. Dierkes, T. Ternes, C.B. Fischer, Photoaging phenomena of biodegradable polybutylene succinate and conventional low density polyethylene by artificial weathering – A comparative surface study, *Applied Surface Science* 590 (2022) 153058.
5. A. Tsimliaraki, S. Svinterikos, C. Panayiotou, S.I. Marras, I. Zuburtikudis, L. Papadopoulou, PBSA/layered silicate nanocomposites and the role of nanoclay on their electrospun fibrous structure, *IJNM* 6 (2010) 291.
6. B. Niang, N. Schiavone, H. Askanian, V. Verney, D. Ndiaye, A.B. Diop, Development and Characterization of PBSA-Based Green Composites in 3D-Printing by Fused Deposition Modelling, *Materials (Basel)* 15 (2022) 7570.
7. L. Huang, L. Chen, H. Chen, M. Wang, L. Jin, S. Zhou, L. Gao, R. Li, Q. Li, H. Wang, C. Zhang, J. Wang, Biomimetic Scaffolds for Tendon Tissue Regeneration, *Biomimetics* 8 (2023) 246.
8. T.D. Brown, P.D. Dalton, D.W. Hutmacher, Direct Writing By Way of Melt Electrospinning, *Advanced Materials* 23 (2011) 5651–5657.
9. X. Zhou, Y. Feng, J. Zhang, Y. Shi, L. Wang, Recent advances in additive manufacturing technology for bone tissue engineering scaffolds, *Int J Adv Manuf Technol* 108 (2020) 3591–3606.
10. N. Udomluck, W.-G. Koh, D.-J. Lim, H. Park, Recent Developments in Nanofiber Fabrication and Modification for Bone Tissue Engineering, *IJMS* 21 (2019) 99.
11. K.F. Eichholz, I. Gonçalves, X. Barceló, A.S. Federici, D.A. Hoey, D.J. Kelly, How to design, develop and build a fully-integrated melt electrowriting 3D printer, *Additive Manufacturing* 58 (2022) 102998.
12. L. Du, L. Yang, H. Lu, L. Nie, Y. Sun, J. Gu, S. Fujiwara, S. Yagi, T. Xu, H. Xu, Additive manufacturing of ultrahigh-resolution Poly(ϵ -caprolactone) scaffolds using melt electrowriting, *Polymer* 301 (2024) 127028.
13. S. Limmahakhun, A. Oloyede, K. Sitthiseripratip, Y. Xiao, C. Yan, 3D-printed cellular structures for bone biomimetic implants, *Additive Manufacturing* 15 (2017) 93–101.
14. J.C. Kade, P.D. Dalton, *Polymers for Melt Electrowriting*, *Advanced Healthcare Materials* 10 (2021) 2001232.
15. Z. Qiu, T. Ikehara, T. Nishi, Melting behaviour of poly(butylene succinate) in miscible blends with poly(ethylene oxide), *Polymer* 44 (2003) 3095–3099.
16. M. Yasuniwa, T. Satou, Multiple melting behavior of poly(butylene succinate). I. Thermal analysis of melt-crystallized samples, *J Polym Sci B Polym Phys* 40 (2002) 2411–2420.

木粉含有フィラメントによる気化冷却構造の評価

Evaluation of Evaporative Cooling Structures Using Wood Powder-Containing Filaments

吉田 和生, 古川 英光

Kazuki Yoshida, Hidemitsu Furukawa

山形大学

Yamagata University

【要約】

本研究は木粉が含有された 3D プリント用フィラメントを用いたメッシュ構造を作成し気化熱による冷却性能を調査する。本実験で使用するフィラメントは吸水性に優れており、構造体内に十分な量の水分を保持することができる。メッシュ構造に風を当て、温度変化を観察することで冷却性能の評価を行うことで、風や気温に応じて「呼吸するように冷却性能を発現する」4D 的なふるまいを示す環境負荷の少ない持続可能性の高い冷房装置の開発を検討する。将来的には、3D プリント技術を用いることで、構造体の形状や寸法を柔軟に設計でき、複雑形状や空力特性を考慮した構造設計が可能となり、経済的かつ持続可能な冷却方法への発展を目指す。

キーワード: 3D プリント用フィラメント, メッシュ構造, 気化, 冷却,

【Abstract】

This study investigates the cooling performance of a mesh structure created using wood powder-containing 3D printer filament through evaporative cooling. The filament used in this experiment exhibits excellent water absorption, enabling it to retain sufficient moisture within the structure. By applying airflow to the mesh structure and observing temperature changes to evaluate its cooling performance, we explore the development of an environmentally sustainable, low-impact cooling device exhibiting 4D-like behavior—where cooling performance “breathes” in response to wind and ambient temperature. In the future, utilizing 3D printing technology will enable flexible design of the structure's shape and dimensions, allowing for structural designs that incorporate complex shapes and aerodynamic characteristics. This aims to advance toward an economical and sustainable cooling method.

Keywords: 3D printer filament, mesh structure, Vaporization, Cooling,

1. 序論

日本には古来より、打ち水や風穴といった気化熱を応用した冷却方式が存在する[1][2][3]。しかし、近年は地球温暖化の影響により、冷房需要が増大し、それに伴う電力消費の増加が大きな社会課題となっており、二酸化炭素の排出量削減や温度上昇の問題などによるエネルギー問題も発生している[4]。このことから、環境負荷の少ない冷却方式が求められており、エネルギー負荷を低減しつつ快適な居住環境を実現するためには、電力に依存しない、あるいは依存度を低減できる新しい冷却技術の開発が課題となっている[5]。

そこで、本研究では、3D プリントを用いて作製した木粉を含有したポリ乳酸 (Poly-Lactic Acid, PLA + Wood) 材料のメッシュ構造体を作成した。この構造体で使用する木粉を含有するポリ乳酸フィラメントは、一般的なポリ乳酸フィラメントと比較して吸湿性に優れており、構造体に十分な水分を保持することが可能であると考えられる。

3D プリント技術を活用することで、構造体の形状や寸法を容易に設計でき、複雑な形状や空力特性を考慮した設計が可能になる。また、使用用途に応じた寸法設計や意匠性、インテリアデザインなどの芸術的側面との融合適正があり、多様な目的に対応した構造体の作成が可能である[6]。

本研究では、構造体の形状変化により冷却性能に与える影響を評価し、環境負荷の少ない持続可能な冷却システムの開発を目指す。Fig. 1 に本研究の概要図を示す。

2. フィラメントの材料選定

本研究に先立ち、気化冷却に適した 3D プリント用フィラメントの吸水性を調査した。対象とした材料は、熱可塑性ポリウレタン (Thermoplastic polyurethane, TPU)、ポリ乳酸 (Poly-Lactic Acid, PLA)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)、および木粉を含有したポリ乳酸 (Poly-Lactic Acid + Wood, PLA + Wood) の 4 種類である。これらは

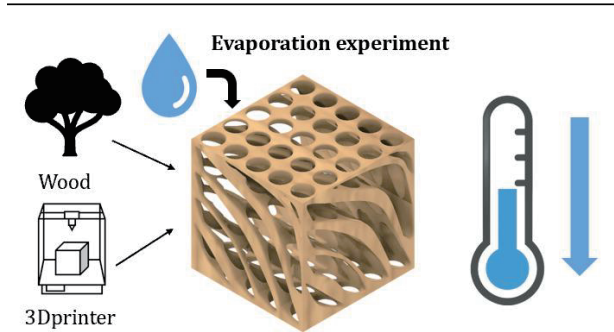
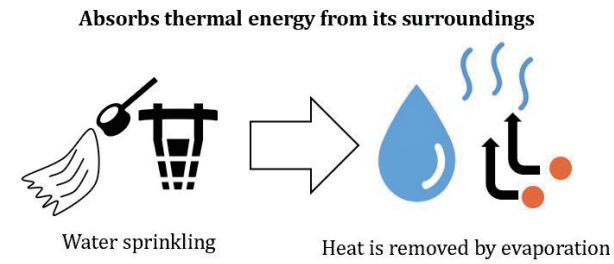


Fig. 1. Schematic Diagram of the Experiment

市販されている代表的なフィラメントであり、機械的特性が異なるだけでなく、吸湿性においても差異があることが予想される。

各試料は同一形状の $50 \times 50 \times 2$ [mm] の寸法の物体をそれぞれのフィラメントのばらつきを抑えるため実験サンプルを各 3 個造形した。その後、Bambu Lab 製 3D プリンタの Dry Filament 機能により乾燥処理を 70°C で 12 時間行った。その後、水に 24 時間浸漬し、その重量増加量を測定し吸水量を評価した。

実験の結果を Table. 1 に吸水前のフィラメントの重さの平均値、Table. 2 に吸水後のフィラメントの平均値と吸水した増加量を示す。

TPU や ABS はほとんど水分を保持せず、PLA は吸水したが、木粉を含有したフィラメントは他のフィラメントと比べ高い吸水量を示し、保持した水分が蒸発する過程での気化冷却効果が最も期待できる材料であることが確認された。

この結果を踏まえ、本研究の本実験では木粉含有フィラメントを用いてメッシュ構造体を造形し、その気化冷却性能の評価を行う。

Table 1. Filament before water absorption

Materials	TPU	PLA	PLA+Wood	ABS
Weight[g]	5.882	5.921	5.350	4.801

Table 2. Filament after water absorption

Materials	TPU	PLA	PLA+Wood	ABS
Weight[g]	5.939	5.993	5.463	4.827
Increase[g]	0.057	0.072	0.113	0.026

3. 実験

3.1 実験手順

本研究では、造形したメッシュ構造体の気化冷却効果を評価するため、以下の手順で実験を行う。

まず、木粉含有 PLA フィラメントを用いてメッシュ構造体を造形する。印刷条件は各メッシュ同一条件とした。メッシュ構造寸法の詳細は Fig. 2 に示す。

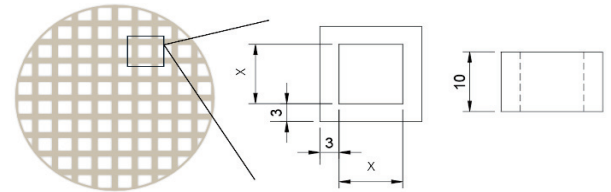


Fig. 2. Dimensions of the mesh structure

Fig. 2 のメッシュの間隔 X をそれぞれ 20[mm]. 10[mm]. 7[mm]. 5[mm]. 3[mm]とした。

小型風洞内にサーキュレーターを設置し、その前後に温度計を設置した。これにより、吸気と排気の温度差を比較することで、気化冷却による温度低下を評価した。

実験風景を Fig. 3 に示す。

実験は構造体を水に浸漬して十分に吸水させた後、吸水した構造体をサーキュレーターの前部に固定し送風を行うことでメッシュ表面からの蒸発を促進させる。2 時間連続で行い、メッシュの隙間寸法を変更して比較した。これにより、メッシュ構造の違いが冷却効果に与える影響を確認する。

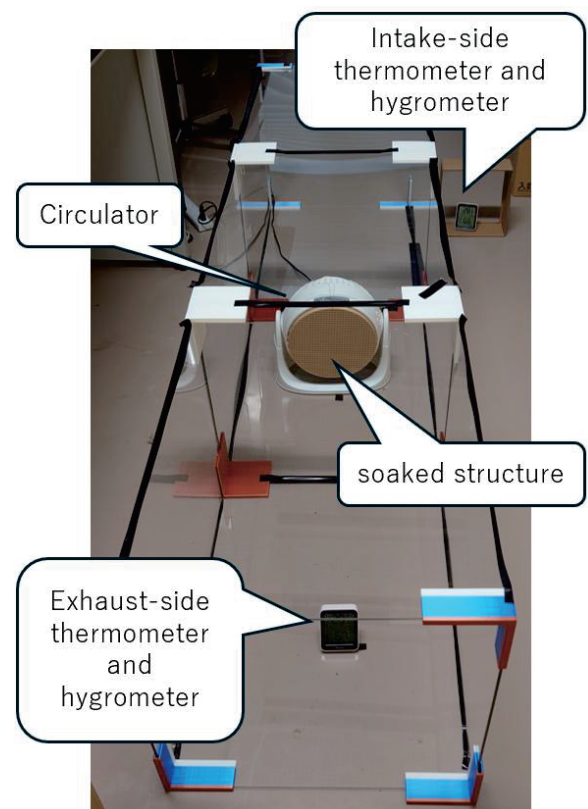


Fig. 3. Experimental scene

また、今回作成したメッシュ構造の隙間に対して風速の変化を測定するために送風シミュレーションも併せて実施した。シミュレーションの条件は、今回実験で使用するサーキュレーター風の平均から 4[m/s]で行った。

3. 2 実験結果

測定された温度変化を Fig. 4, 湿度変化を Fig. 5 に示す。

メッシュ間隔が 20[mm]では、温度低下は 0.2[°C]下がり、10[mm]では、0.3[°C]下がった。また、実験開始から各構造体は約 5 分で温度上昇が確認された。一方、7[mm]の間隔では温度低下は 0.1[°C]下がり冷却効果は 20 分を超えても持続した。5[mm]の間隔では温度低下は 0.3[°C]下がり、約 60 分間冷却効果が確認された。また、3[mm]の間隔では温度低下は 0.3[°C]下がり 30 分を超えて冷却効果が持続することが確認された。

以上の結果から、柱幅を一定とした条件の中では 5[mm]間隔のメッシュ構造体が冷却効果時間と温度変化量の 2 つにおいて最も高い冷却効果を示し、設計によって冷却性能が変動することが分かった。

次に、シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。

各メッシュの隙間の幅が、狭くなるほど通気性が悪くなることが分かった。特に、3[mm]間隔では他のメッシュ構造体に比べ後方の流れる流速の幅が狭くなっており大きく減速していることが分かった。

4. 考察

本研究では、メッシュの隙間寸法を変化させた構造体を用いて、気化による冷却効果を測定した。その結果隙間寸法が 5[mm]の時もっとも温度低下を維持できることが確認された。

この結果から、メッシュの隙間が 3[mm]であるとフィラメント含有量は多くなり水分保持量が十分であるが、シミュレーション結果より、メッシュの隙間が密となっており通気の抵抗が増加し、気化を促す気流が阻止されたため、冷却効果が十分に発揮されなかったと考えられる。

また、10[mm]を超える隙間では風の流れは円滑に流れるがフィラメントの総量が減少したことによる水分保持量の低下により、冷却効果を維持出来なかったと考えられる。

以上のことから、3D プリントによるフィラメントメッシュ構造体はその構造内の通気性(風速)とフィラメントの総量に依存する水分保持量に相関が見られると考えられる。

さらに、本実験では相対湿度 60~70%弱の範囲で実施したが、湿度が高い場合には気化が十分に行われず、冷却効果が下がる可能性がある。これは、空気中の水蒸気分圧が高くなることで気化することが難しくなり、気化熱が減少するためと考えられる。

以上の考察より、構造体を利用した気化冷却はメッシュ寸法を変更することによっておこる水分保持量と

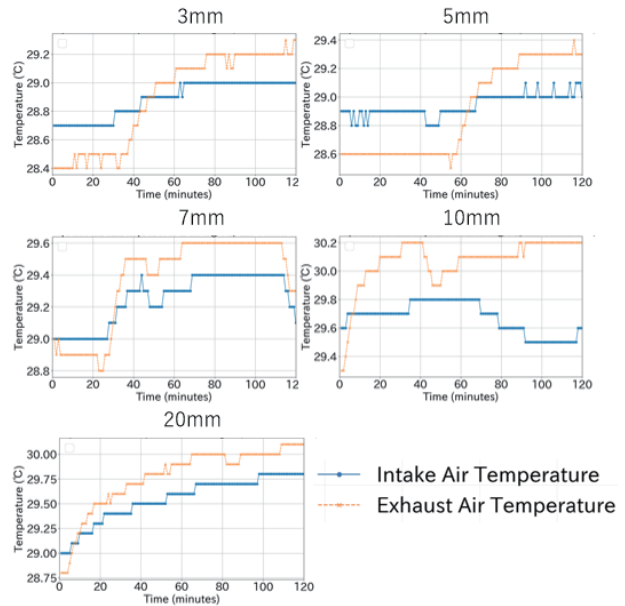


Fig 4. Temperature changes

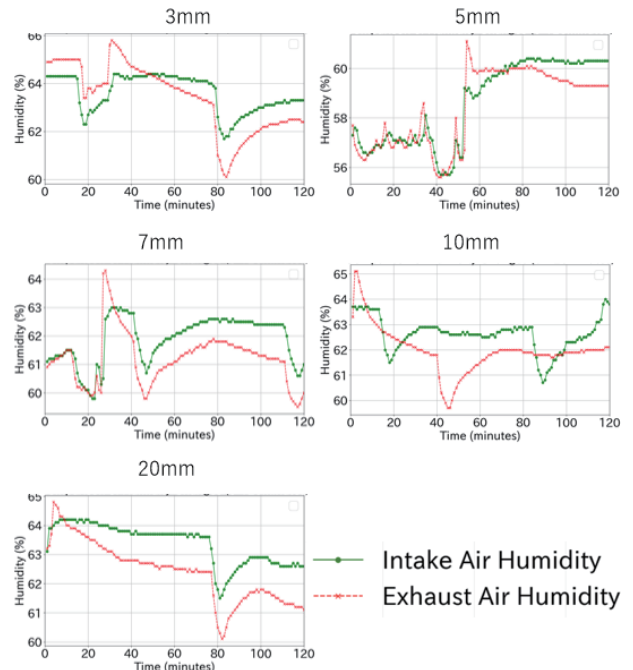


Fig 5 humidity changes

通気性の変化によって影響を受け、それらを調整することによって、温度変化量を自由に調整することが出来る可能性がある。

5. 結言

本研究では、3D フィラメントを用いた構造体を利用した気化冷却はメッシュ寸法を変更することによって起こる水分保持量と通気性の変化によって影響を受け、それらを変化させることによって、温度変化量を自由に調整することが出来ると考えられる。

今後は、冷却性能の向上を追求するため、メッシュ構造だけでなく井桁構造など、より複雑な構造の作成をすることによりフィラメント含有量を多くし水分保持量を増

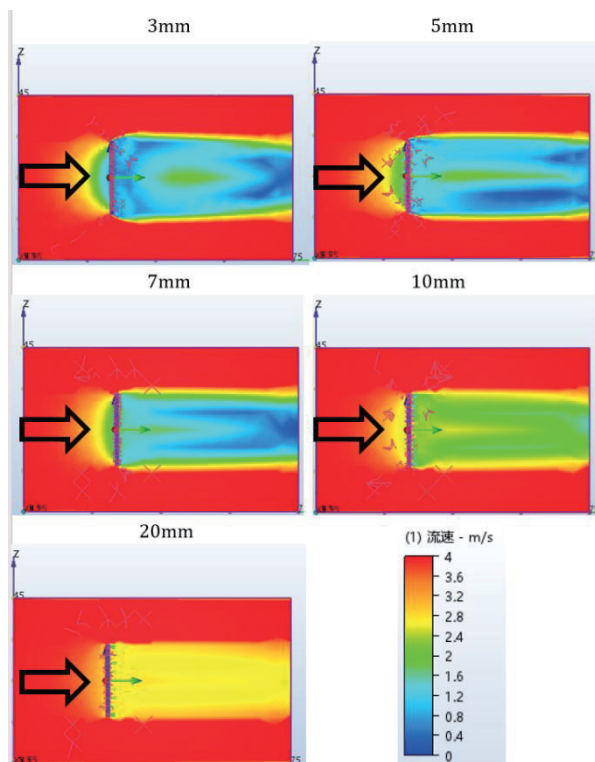


Fig 6. Simulation results

加させ、かつ風の流れをできるだけ遮らず、通気性を損なわない構造を作成することで、より気化冷却の温度低下に優れた形状を模索したい。

また、冷却効果の持続性向上を目的とした、構造体内部に水を貯留可能とする中空構造の設計や、水を外部から持続的に供給できる流路形状を作成することで、より長時間の安定した冷却性能の実現を目指したい。

さらに、3D プリンタを活用した視覚的な魅力や意匠性を備えたデザインの追求に取り組むことで、機能性と美観を両立した環境調和型製品としての実用性を高めるとともに、生活空間や公共空間における幅広い利用可能性を探索していきたい。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、「NEDO 先導研究プログラム／マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004)、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期／バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO)(JPNP23025)、JSPS 科研費(基盤 A JP23H00498, JP25H00890, 基盤 C JP24K12997, JP24K15231)、ムーンショット農林水産研究開発事業(MS511)等によって支援を受けたものである。

参考文献

1. S. Asai, Japan Water Forum, “Chronological Table of ‘Uchimizu’ (Excerpt),” PDF document, [Online]. Available: https://www.uchimizu.jp/archive/uchimizu_nenpyo.pdf. [Accessed Sep. 2, 2025].

2. H. Nakajima, Gunma Prefectural World Heritage Center, “The value of the Arasune Wind Cave as World Heritage: Japanese wind caves” [in Japanese], Bulletin of the Gunma Prefectural World Heritage Center, no. 4, pp. 79-98, Mar. 2024. [Accessed Sep. 2, 2025].
3. M. Kato, Y. Kuwasawa, N. Ishii, K. Hino, T. Hashimoto, S. Nagai, K. Ikeda, F. Mochida, Y. Kogiso, T. Shimada, M. Kusumoto, M. Miyazato, H. Suzuki, M. Kurihara, and Y. Igarashi, “The effect of ‘Green Curtain’ for life environment improvement,” Building Research Data, no. 180, Building Research Institute, Mar. 2017. [Online]. Available: <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/180/all.pdf>. [Accessed: Sep. 12, 2025].
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. [Accessed: Sep. 12, 2025]. [Accessed: Sep. 2, 2025].
5. Japan Meteorological Agency, Climate Change Monitoring Report 2024, Tokyo, Japan: Japan Meteorological Agency, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/>. [Accessed: Sep. 12, 2025].
6. H. Takahashi, “Gray-scale and Moiré using Thickness Control in Bridge Structure of Fused Deposition Modeling 3D Printers,” Journal of the Society for Art and Science, vol. 23, no. 2, pp. 2:1-2:13, 2024. [Online]. Available: <https://www.art-science.org/journal/v23n2/v23n2-2/artsci-v23n2-2.pdf>. [Accessed: Sep. 12, 2025].

Precision-Controlled Elastic Poly(L-lactide-co- ϵ -caprolactone) Scaffolds via Melt Electrowriting

Liu YANG, Huaizhong XU, Shinichi SAKURAI

Kyoto Institute of Technology

【Abstract】

This study systematically investigated the effects of collector temperature and turning radius on the printing accuracy of Poly(L-lactide-co- ϵ -caprolactone) (PLCL) scaffolds during Melt electrowriting (MEW), achieving continuous fabrication for up to 46 hours. Dynamic mechanical analysis revealed pronounced environmental responsiveness, with scaffold stiffness reduced by 90% under physiological conditions compared to room temperature, while immediate elastic recovery increased from $\sim 70\%$ to $\sim 85\%$. A 12-month in vitro degradation study in PBS showed progressive surface roughening, fiber breakage, and reduced mechanical strength, with a temporary increase in tensile modulus. This combination of precise MEW fabrication, environment-responsive mechanics, and tunable biodegradability makes PLCL highly promising for advanced tissue engineering and soft robotics.

1. Introduction

Poly(L-lactide-co- ϵ -caprolactone) (PLCL) is a biodegradable copolymer known for its elasticity and tunable mechanical properties, making it an ideal material for applications requiring dynamic functionality, such as in tissue engineering and soft robotics [1]. Its glass transition temperature (T_g) near physiological conditions enables the development of materials with environmentally responsive mechanical behavior. Melt electrowriting (MEW) is a high-precision additive manufacturing technique capable of processing polymer melts into fibrous scaffolds with highly architectural fidelity. [2] Previous research has explored the MEW printing of PLCL, but the resulting scaffolds exhibited low fidelity. [3] In this study, a comprehensive framework for the MEW of PLCL is established, encompassing both the development of a stable process for complex architectures and the characterizations of their environmentally responsive mechanical properties.

2. Experimental

A schematic of the MEW device is shown in **Fig. 1A**. The manufacturing process for PLCL scaffolds was systematically optimized by investigating key geometrical parameters (**Fig. 1B** and **1C**). Using the optimized process, scaffolds with complex 3D structures - including patterned designs and foldable kirigami-like architectures - were fabricated (**Fig. 1D-G**). The mechanical properties, including long-term printing stability and dynamic cyclic behaviors, were evaluated using a universal testing machine under two distinct environmental conditions: room temperature (23°C , 50% relative humidity (RH)) and physiological conditions (37°C , 95% RH).

Additionally, in vitro degradation experiments were

conducted on PLCL scaffolds for 12 months to expand their application scenarios. The specific experimental method was as follows: scaffolds printed at the same time were placed in glass bottles containing 5 mL of phosphate-buffered saline (PBS, pH=7.4). They were then incubated at a constant temperature of 37°C with shaking at 70 rpm. At different time points during the hydrolysis process (2 weeks, 1 month, 2 months, 3 months, 4 months, 5 months, 6 months, 8 months, and 12 months), the scaffolds were removed and characterized for morphology and performance using scanning electron microscopy (SEM) and mechanical testing.

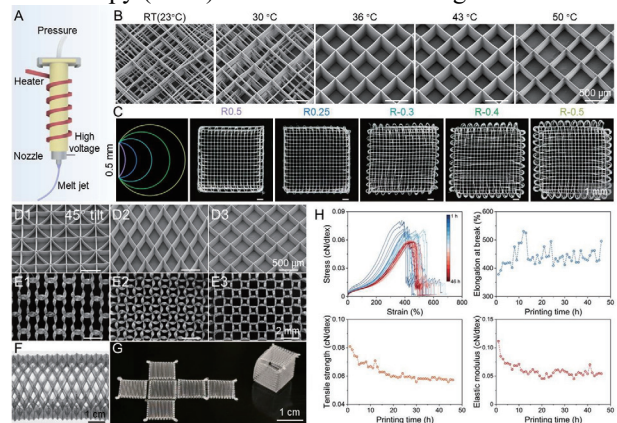


Fig.1 (A) Schematic of the MEW device. (B) Effect of collector temperature on scaffold morphology. (C) Influence of toolpath turning radius on printing fidelity. (D-G) Representative examples of complex scaffolds architectures. (H) Mechanical property analysis of scaffolds during a continuous 46-hour printing test.

3. Results and Discussion

A stable and precise MEW process for PLCL was established. By optimizing toolpaths and thermal parameters, defect-free scaffolds with consistent

microarchitectures were successfully fabricated, as confirmed by long-term printing trials (**Fig. 1H**). The stability of this process was validated through a continuous 46-hour printing test, which yielded scaffolds with remarkably consistent tensile strength and modulus over the entire fabrication period.

Dynamic mechanical characterization (**Fig. 2**) revealed pronounced environmental modulation. Compared to room condition (23°C, 50% RH), the scaffold stiffness decreased by approximately 90% under physiological conditions (37°C, 95% RH), while the immediate elastic recovery improved from ~70% to ~85%. The recovery rate also showed strong dependence on relaxation time, approaching near-complete recovery after sufficient rest, reflecting the material's viscoelasticity. Moreover, the scaffolds demonstrated excellent cyclic durability, achieving stable and repeatable mechanical response (maximum force and hysteresis) after an initial conditioning cycle. This combination of environmental sensitivity and mechanical stability is critical for dynamic applications.

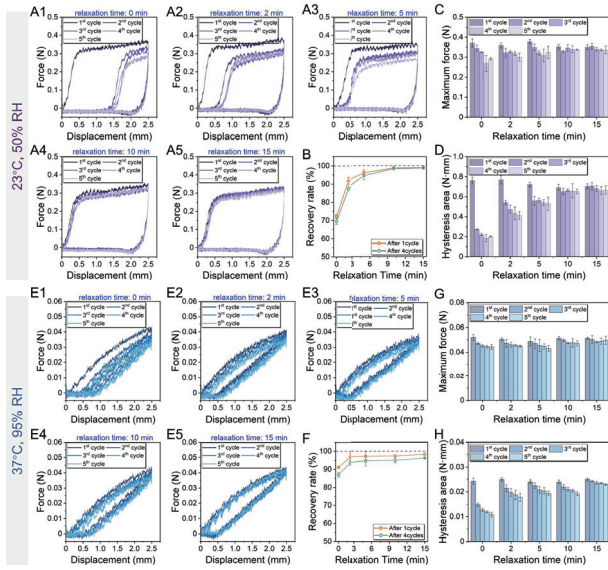


Fig. 2 Dynamic mechanical characterization and environmental modulation of PLCL scaffolds. (A-D) Cyclic tensile testing performance under room conditions (23°C, 50% RH). (E-H) Cyclic tensile testing performance under physiological conditions (37°C, 95% RH).

As hydrolysis progresses, the surface of the scaffold became increasingly rough (**Fig. 3A**). At 2 months, broken fibers were observed, and by the 4 months, obvious microcracks appeared on the fiber surface. These cracks grew more severe with time, showing the gradual degradation of the PLCL scaffold in PBS. **Fig. 3B** reveals the changes in mechanical properties during degradation. In general, both elongation at break and ultimate tensile strength decreased over time, while the

tensile modulus first increased and then decreased. Notably, in the first month of hydrolysis, the scaffold's elongation at break decreased relatively rapidly, but the ultimate tensile strength changed little; after 1 month, the tensile strength significantly decreased. This behavior can be explained by the decrease in molecular weight and chain rearrangement during hydrolysis, together with changes in crystallinity. These factors reduced the ductility and strength of the scaffold, while chain rearrangement caused a temporary rise in modulus.

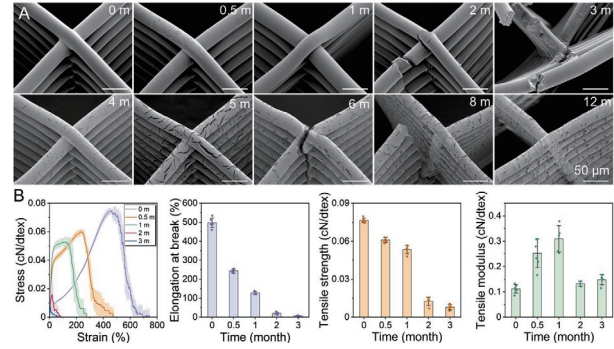


Fig. 3 The degradation behavior of PLCL scaffolds in PBS solution. (A) Microstructural changes. (B) Changes in mechanical properties.

4. Conclusion

This study established a precise MEW process for PLCL, enabling the fabrication of complex 3D fiber scaffolds with high structural fidelity and long-term printing stability. PLCL exhibited remarkable environment-responsive mechanics, with reduced stiffness and enhanced elastic recovery under physiological conditions compared to room temperature. A 12-month in vitro degradation study further confirmed gradual hydrolysis and loss of strength, highlighting the scaffold's potential for biomedical applications requiring environmental sensitivity and controlled biodegradability.

Reference

1. W. B. Han, G. J. Ko, K. G. Lee, et al. "Ultra-stretchable and biodegradable elastomers for soft, transient electronics", *Nature communications* (2023), 14(1), 2263.
2. B. L. Devlin, S. Kuba, P. C. Hall, et al. "A melt electrowriting toolbox for Automated G-Code generation and toolpath correction of flat and tubular constructs", *Advanced Materials Technologies* (2024), 9(22): 2400419.
3. R. Sanchez Diaz, J. R. Park, L. L. Rodrigues, et al. "Highly elastic scaffolds produced by melt electrowriting of poly (L-lactide-co-ε-caprolactone)", *Advanced Materials Technologies* (2022), 7(4), 2100508.

折り紙に基づくメカニカルメタマテリアルが示す剛性の方向依存性

Directional Dependence of Stiffness in Origami-Based Mechanical Metamaterials

植田大樹¹, 峯杉賢治², 石村康生¹, 安田博実²
Daiki Ueda¹, Kenji Minesugi², Kosei Ishimura¹, Hiromi Yasuda²

¹早稲田大学, ²宇宙航空研究開発機構
¹Waseda University, ²Japan Aerospace Exploration Agency

【要約】

近年注目されているラティスや折り紙構造をはじめとしたメカニカルメタマテリアルは、構成部材が空間上に複雑に配置される傾向にあり、機械特性は顕著な方向依存性を示す。本研究では、周期性を有する折り紙構造に着目し、剛性の三次元空間での方向依存性を詳細に調べた。方向により異なる機械特性の解析では、有限要素法を用いた数値的均質化法を導入し、弾性係数行列を求めることで、空間上の全方向についてヤング率を計算した。また、剛体折り紙モデルを用いて、特定方向の剛性評価を解析的に行うことで、幾何パラメータや折り目の折りたたみ角度の違いが異方性に与える影響について詳細に調べた。

キーワード: 折り紙, メカニカルメタマテリアル, 剛性, 均質化法

【Abstract】

Mechanical metamaterials, including lattice and origami structures, have recently gained significant attention. Such structures typically exhibit complex three-dimensional arrangements of their constituents and possess strong direction-dependent mechanical properties. In this study, by focusing on periodic origami structures, we examine their anisotropic behavior, specifically directional Young's modulus. We introduce a numerical homogenization approach based on the finite element method to analyze the elastic stiffness matrix of origami structures and evaluate Young's modulus in all spatial directions. Furthermore, by employing a rigid origami model, we analytically assessed the stiffness along specific orientations. Our numerical analysis results provide insights into how geometric parameters and folding angles influence the distribution of Young's modulus.

Keywords: Origami, Mechanical metamaterial, Stiffness, Homogenization method

1. 序論

ラティスや折り紙構造に基づくメカニカルメタマテリアルは、その特異な機械的性質から、近年注目を集めている。メカニカルメタマテリアルとは、負のポアソン比のような、通常の自然界の材料では発現しない性質を有する材料のことであり、特に折り紙構造には、マルチステイブル¹⁾やセルフロック²⁾など様々な機械的性質が報告されている。また、折り紙構造には、繰り返し単位であるユニットセルを周期的に組み合わせることでテセレーションを形成するものがあり、ユニットセルの幾何形状により構造全体の機械特性も変化する。そのため、折り紙構造に基づくテセレーションでは、ユニットセルの設計・解析が重要になる。

また、設計・数値解析だけではなく、近年の3Dプリンティング技術の発展とともに、従来は困難であった、複雑な形状を有するメカニカルメタマテリアルの製作が容易になりつつある。例えば、空間充填を有する折り紙のテセレーションは紙のような平面材料から製作する場合煩雑な作業が伴うが、3Dプリンティングでは容易に3次元形状を造形することが可能である。こうした背景により、折り紙構造のさらなる工学的応用が見込まれるが、その機械特性を3次元空間上の全方向に対して把握する研究は比較的限られている。

そこで本研究では、空間充填の特性を有する折り紙構造である Tachi-Miura Polyhedron (TMP)³⁾に注目し、有限要素法を用いた数値的均質化法により、空間の全方向についてのヤング率を解析する。特に、幾何パラメータや折りたたみ角度の違いによるヤング率の分布の

変化を明らかにする。さらに、こうした異方性の変化のなかでヤング率の空間分布が一様になる、すなわち等方性となることはあるのかについても考察する。

2. TMP の構造

TMP は Miura-ori⁴⁾を基にしたユニットセルからなる周期的な構造であり、空間充填の性質を有する^{3,5)}。TMP の折りたたみの過程を Fig.1(a)に示す。TMP は剛体折り紙とよばれ、変形が折り目のみによって生じ、面が曲げなどの変形を伴わない折り紙構造である。

TMP のユニットセルは Fig.1(b)に示すように、長さ l, m, d および角度 α を幾何パラメータとする 2 枚のシートからなる。折りの挙動を表すのに、折りたたみ角 $\theta_M, \theta_S, \theta_G$ を Fig.1(c), (d)で示すように定義した。ただし、これらの折りたたみ角には以下の関係が存在する⁶⁾。

$$\tan\left(\frac{\theta_G}{2}\right) = \tan\alpha \cos\theta_M \quad (1)$$

$$\sin\left(\frac{\theta_G}{2}\right) = \sin\alpha \cos\theta_S \quad (2)$$

式(1)と(2)より、1つの角度を定義すれば残りの角度も決まるため、折りたたみ角については、1つの角度のみで表すことができる。そこで本研究では、TMP の折りたたみ角として θ_M を用いることとする。 θ_M による形状の違いを Fig.1(e)に示す。なお、 $\theta_M = 0^\circ, 90^\circ$ の状態は、材料の厚みを考慮しなけれ

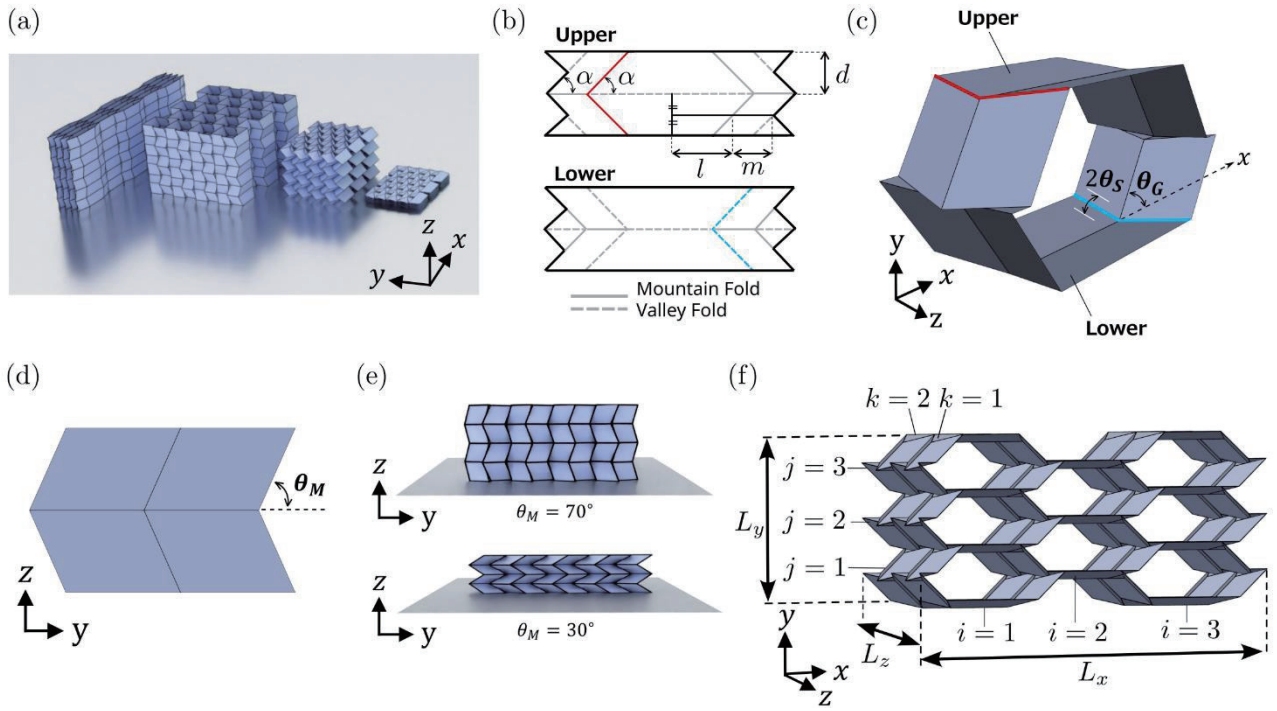


Fig.1. (a) Folding process of TMP. (b) Geometric parameters of TMP. (c) TMP unit cell showing the definitions of folding angles θ_S and θ_G , based on the upper and lower sheets introduced in (b). (d) Definition of θ_M in $y-z$ plane. (e) Side views of the TMP tessellations at different folding angles θ_M . (f) Arrangement of unit cells in the tessellation.

ば平らな状態であり、TMP はその 2 つの状態の間で連続的に変形することができる。また、テセレーションの x, y, z 軸方向の長さ L_x, L_y, L_z およびテセレーションを構成するそれぞれの軸方向のセルの数を Fig. 1 (f) に示す。

3. 有限要素法を用いた均質化法での剛性評価

任意の方向のヤング率を求めるために、有限要素法を用いた数値的均質化法を導入し⁷⁾、解析を行った。これにより、ある初期折りたたみ角 θ_{M0} での、任意の方向に対するヤング率を計算した。また、幾何パラメータのひとつである α と初期折りたたみ角 θ_{M0} によってヤング率の方向依存特性がどのように変化するかを詳細に調べた。ここではその他の幾何パラメータとして、 $l = 18, m = 18, d = 15$ を用いた。

TMP の形状とそのときのヤング率の解析結果を Fig. 2 に示す。ここで、空間上の任意の方向のヤング率 E を 3 次元座標空間の原点からその方向における距離に対応させ、コンター図として可視化した。ただし、ヤング率はある形状における全方向に関しての最大値 E_{max} で正規化した値を用いている。そのため、プロットした形状が球の場合、ヤング率は方向によらず一定であることを意味する。また、Fig. 2 では、TMP の形状の座標系の向きをヤング率のコンター図の座標系と対応させている。

TMP の幾何パラメータとして $\alpha = 70^\circ$ 、折りたたみ角として $\theta_{M0} = 40^\circ$ を用いた場合のヤング率の解析結果を Fig. 2. (a) に示す。空間上の方向によってヤング率の値が異なり、剛性に関して TMP が強い異方性を有していることがわかる。特に z 軸方向から見た際のコンター図をプロットした Fig. 2 (a) 中のインセット (i) からわかるように、 x 軸方向のヤング率

が他の方向に対して大きく (Fig. 2 (a) の (ii) 参照)、ヤング率のコンター図が扁平した形状となることがわかる。また TMP の幾何パラメータを変化させ、 $(\alpha, \theta_{M0}) = (65^\circ, 50^\circ)$ とした場合は、ヤング率の高い方向が y 軸方向に (Fig. 2 (b))、 $(\alpha, \theta_{M0}) = (75^\circ, 60^\circ)$ とした場合は z 軸方向となることがわかる (Fig. 2 (c))。このように、幾何パラメータや折りたたみ角を変えることで、それに応じてヤング率の異方性が大きく変化することがわかる。

4. 解析的アプローチによる剛性評価

前章での幾何パラメータの違いによる異方性への影響を詳しく調べるため、TMP を剛体折り紙としてモデル化することで、解析的にヤング率を算出した。この計算において、仮想仕事の原理を用いて TMP の剛性を導出する⁵⁾。ここで、折り紙のモデル化として、折り目を回転ばねであると仮定し、その単位長さ当たりのばね定数を k とする。折り目は、その折り角度を θ_M または θ_S で表すことができ、それぞれの折り目に関しての回転ばねにおける初期角度を θ_{M0} および θ_{S0} としたときの、 x, y, z 方向の荷重 F と変位 u の関係は、 $i = x, y, z$ として式 (3) のように計算される。

$$F_i \delta u_i = 4n_m k (\theta_M - \theta_{M0}) \delta \theta_M + 4n_s k (\theta_S - \theta_{S0}) \delta \theta_S \quad (3)$$

ここで、 n_m, n_s はそれぞれ θ_M, θ_S が折りたたみ角となる折り目の長さの総和 (テセレーションを構成する全セルにおける総和) を表す。ここで、 x, y, z 方向のテセレーションの長さ (Fig. 1 (f) における L_x, L_y, L_z) と断面積を考慮し、応力とひずみの関係 ($E = \sigma/\epsilon$) を用いることで、それぞれの方向のヤング率 E を計算した。なお、ここで計算されたヤング率は、ある初期

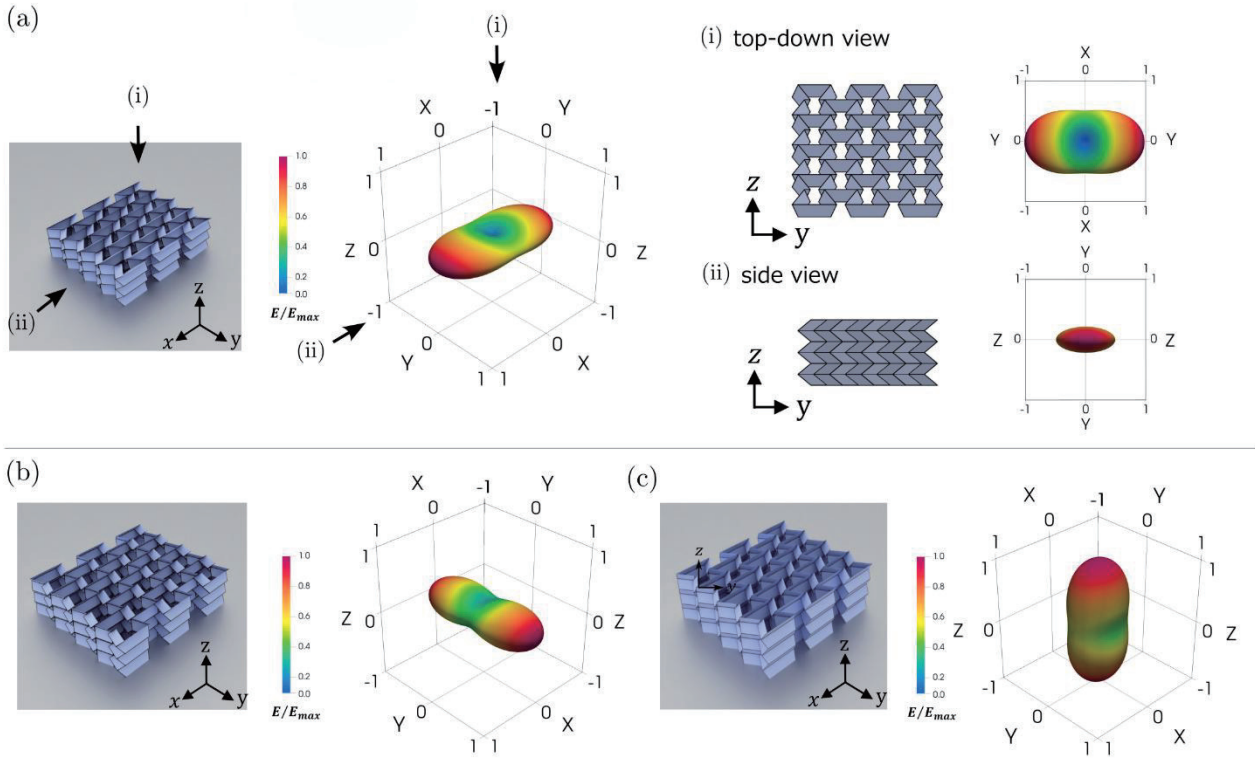


Fig.2. Directional Young's modulus. Three different configurations of TMP; (a) $\alpha = 70^\circ, \theta_{M0} = 40^\circ$, (b) $\alpha = 65^\circ, \theta_{M0} = 50^\circ$, and (c) $\alpha = 75^\circ, \theta_{M0} = 60^\circ$.

角度に対応するテセレーションの形状でのヤング率を表す。以上より、 x, y, z 軸方向のそれぞれのヤング率 E_x, E_y, E_z を次のように得る。

$$\frac{E_x}{E_z} = \frac{\{2(l/m) + \cos \theta_{G0}\}^2 \cos^2 \theta_{M0}}{(\cos \theta_{G0} + 1)^2 \sin^2 \theta_{G0} \sin^4 \theta_{M0} \tan^2 \alpha} \quad (4)$$

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{\cos^2 \theta_{M0} \tan^2 \theta_{G0}}{4 \sin^4 \theta_{M0} \cos^4 (\theta_{G0}/2) \tan^2 \alpha} \quad (5)$$

なお、これらの導出では TMP のサイズによらないバルクとしての性質を調べるため、セルの数 (Fig.1(f)における i, j, k) が無限大であるとして計算した。これらの剛性比を用いて、折りたたみ角の初期値を変化させたときの遷移を導出した。さらに、そのときの空間上の全方向に関するヤング率を FEM 解析で求め、 x, y, z 軸方向のヤング率の比と比較する。

Figure3(a), (b)は、初期折りたたみ角の違いによる異方性の変化が顕著であった。幾何形状の異なる2つの TMP ($\alpha = 80^\circ$ および 71.6°)の剛性比 E_x/E_z および E_y/E_z を初期折りたたみ角 θ_{M0} の関数としてプロットした結果を示している。ここで、図中の点線は剛性比が1のラインを示しており、図中上段の全方向におけるヤング率のプロットは、対応する折りたたみ角での FEM の解析結果を示している。

これらの結果から分かるように、初期折りたたみ角を変化させるとヤング率の分布形状も大きく変化する。Figure3(a)では、 $\theta_{M0} = 35^\circ$ のときに x 軸方向の剛性が高い分布となっているが、初期折りたたみ角の増加に合わせて異方性も変化し、次第に y 軸方

向の剛性が高くなる。また、 $\theta_{M0} = 60.3^\circ$ において $E_x/E_z = 1$ となり、このとき FEM 解析でヤング率の分布を調べると、 xz 平面上でのヤング率の分布が一樣となることが分かる。このように、TMP のヤング率の分布は顕著な方向依存性を示し、折りたたみ角の変化に合わせて異方性も変化することがわかる。

一方で、 $\alpha = 71.6^\circ$ の場合 (Fig. 3(b))、折りたたみ角が小さい領域では先ほどの傾向と同様に θ_{M0} の増加に応じて剛性比は2つとも減少しているが、 θ_{M0} が大きくなると E_y/E_z に関しては増加を示す。特に、 $\theta_{M0} = 54.7^\circ$ において E_x/E_z と E_y/E_z は同一の値となる。このときの剛性比は $E_x/E_z = E_y/E_z = 1$ 、すなわち $E_x = E_y = E_z$ となる。さらに、このような x, y, z 軸の3方向で剛性が同一となる交点 $(\alpha, \theta_{M0}) = (71.6^\circ, 54.7^\circ)$ において、FEMによりヤング率を詳細に解析すると、全方向に対して等しい分布、すなわち等方性になることがわかる (Fig. 3(b)のインセット図を参照)。これらの結果から、幾何パラメータや初期折りたたみ角の違いが TMP の空間上の方向に依存した機械特性に大きな影響を与えることが明らかとなり、異方性の制御が可能であることが示唆される。

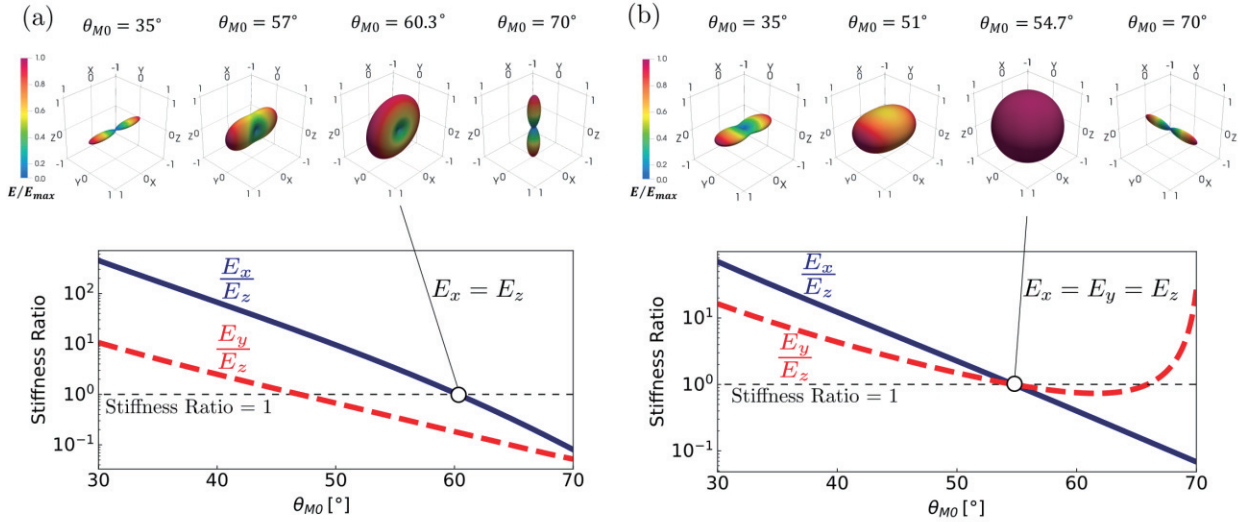


Fig. 3. Tunability of directional Young's modulus. The stiffness ratio (E_x/E_z and E_y/E_z) is calculated analytically for two different configurations; (a) $\alpha = 80^\circ$. and (b) $\alpha = 71.6^\circ$. The upper inset surface plots show the directional Young's modulus obtained from the FEM analysis.

5. 結論

本研究では、周期構造を有する折り紙構造(特にTMP)のユニットセルに着目し、剛性の三次元空間での方向依存性を詳細に調べた。空間上の全方向に関してのヤング率をFEMによる数値的均質化法により解析を行い、幾何パラメータや折りたたみ角の違いによる形状の変化が、TMPの異方性にどのように影響を与えるのかを調査した。数値解析の結果から、TMPは空間上の方向によりヤング率が異なり、強い異方性を示すことがわかった。また、剛体折り紙モデルを導入し、3方向の剛性に関して解析的に求めることで、折りたたみ角がヤング率に与える影響を詳細に調べた。解析結果から、TMPの幾何パラメータは同じでも、折りたたみ角が変化すると方向依存な特性が大きく変化し、2方向に関しては同一の剛性、または3方向すべて同一の値となる場合があることが分かった。そのなかでも、3方向で同じ剛性となるケースをFEM解析の結果と比較すると、ヤング率が全方向で均一となる等方性を示す場合があることが分かった。これらの結果から、適切なパラメータの設定により、TMPの異方性を制御できる可能性が示される。本研究の結果から剛性の方向依存性の特徴を積極的に活用することで、目的に応じた最適な構造材料の設計が可能となることが期待される。

謝辞

本研究は科研費(JP24K00770)の助成を受け実施した。

参考文献

1. Chunlong Wang, Hongwei Guo, Rongqiang Liu, Zongquan Deng, Yan Chen, Zhong You, "Reconfigurable origami-inspired multistable metamorphous structures", Science Advances 10 (2024) eadk8662.

2. Hongbin Fang, Shih-Cheng A. Chu, Yutong Xia, Kon Well Wang, "Programmable self-locking origami mechanical metamaterials", Advanced Materials 30 (2018) 1706311.
3. Koyo Miura, Tomohiro Tachi, "Synthesis of rigid-foldable cylindrical polyhedra", Symmetry: Art and Science (2010) 204-213.4.
4. Koryo Miura, "Method of packaging and deployment of large membranes in space", Proceedings of the 31st Congress of the International Astronautical Federation (IAF-80-A31), (1980) 1-10.
5. H. Yasuda, J. Yang, "Reentrant origami-based metamaterials with negative Poisson's ratio and bistability", Physical Review Letters 114 (2015) 185502.
6. Hiromi Yasuda, Thu Yein, Tomohiro Tachi, KōryōMiura, Minoru Taya, "Folding behaviour of Tachi-Miura polyhedron bellows", Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 469(2159) (2013) 20130351.
7. 寺田健次郎, 「数値材料試験」, 丸善出版, 東京 (2003).

イシガキフグの棘および表皮の立体構造

Three-Dimensional Structure of the Spines and Epidermis of the Spot-fin Burrfish
(*Chilomycterus reticulatus*)

禾 丈一郎¹, 下田 悠太¹, 天童 智也¹, 森田 哲朗², 齊藤 一哉³, 舘 知宏¹
Joichiro Nogi¹, Yuta Shimoda¹, Tendo Tomoya¹, Tetsuro Morita¹, Kazuya Saito³, Tomohiro Tachi¹

¹ 東京大学, ² 東京海洋大学, ³ 九州大学

¹The University of Tokyo, ²Tokyo University of Marine Science and Technology, ³Kyushu University

【要約】

イシガキフグというフグは体を膨らませる際に、互いに大きく交差する約 150 本の棘が干渉せずに滑らかに動く。この未解明な展開構造に着目し、その仕組みと機能性の解明による工学的な応用を目指す。魚体全体の棘と表皮の配置を記録し、断面を観察した結果、棘の交差順序に規則性があること、また表皮内に特殊なトンネル構造が存在することを発見した。さらに、3D プリント製の再現モデルで圧縮実験などを行い、この構造が持つ機械的特性を調査した。

キーワード: 生物模倣工学、展開構造、デジタルファブリケーション

Abstract

This study focuses on the unelucidated deployment structure of the Spot-fin Burrfish, aiming to clarify its mechanism and functionality for engineering applications. When the fish inflates its body, its approximately 150 overlapping spines move smoothly without mutual interference. By recording the arrangement of the spines and skin over the entire body and observing its cross-sections, we discovered a regularity in the spine-crossing sequence and the presence of a special tunnel-like structure within the skin. Furthermore, we investigated the mechanical properties of this structure by conducting experiments, such as compression tests, using 3D-printed replica models.

Keywords: biomimetics, devolapable structures, digital fabrication

1 はじめに

近年、生物の展開構造を模倣し工学的に応用することで新たな特性を持つ構造を創出する、Biomimetics (生物模倣工学)、あるいは Bio-inspired Design (生物から発想された設計) として様々な革新的な展開構造が考案されている。イシガキフグの近縁種であるハリセンボンの棘や表皮の構造から着想を得て考案された構造として、耐久性の高い柔軟な撥水マテリアル [2] が考案されている他、建築やファッションの分野での応用が期待されている膜テンセグリティ構造 [3] なども考案されている。

本研究では、フグの仲間であるイシガキフグが持つ特異かつ未解明な防御機構に着目し、工学的な応用の実現に向けて様々な調査を実施した。イシガキフグは体表には多数の鱗から変異した棘があり [1]、天敵に襲われた際に海水を吸い込み体を膨らませることで威嚇することが知られている (Fig. 1)。他のフグと大きく異なるのは、これらの棘を支える根と呼ばれる突起 (Fig. 2a) が互いに複雑に重なり合っている (Fig. 2b) 点である。

本研究の第一目的は、イシガキフグの体表構造の形態を調査することである。特に、複雑に交差する棘が、体の膨張収縮に応じて表皮に滑らかに追従することを可能にしている構造を明らかにすることを目

指した。このために、CT スキャンや解剖によってイシガキフグの棘の 3 次元的な構造と配置を詳細に分析した。

本研究の第二目的は、棘の交差が表皮にもたらす機械的特性について調べることである。このために、棘の交差の度合いが異なるイシガキフグの体表を模倣したモデルを作成し捕食者の牙に噛まれる場面を模した圧縮試験を行うことで、突き刺しに対する強度を定量的に調べた。



Fig. 1. Taxidermy of the Spot-fin burrfish. Left: deflated state. Right: inflated state.

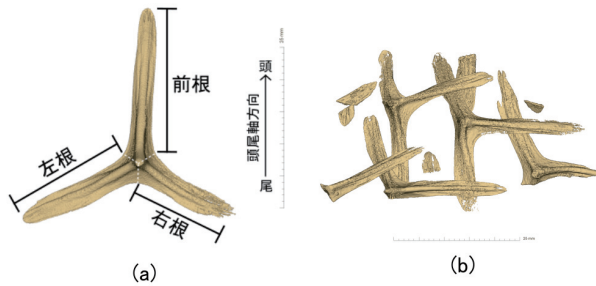


Fig. 2. (a) A spine of the Spot-fin burrfish. (b) Intersecting spine roots.

2 イシガキフグの棘と表皮の形態に関する調査

2.1 目的

イシガキフグの魚体には多数の棘が配置されており、これらは相互に交差しているという点において他のフグ目の魚種と比較して大きく異なる。しかし、先行研究では他魚種との分類において重要な点についてのみ形態の記録が実施されており、工学的に应用する場合に必要な具体的な棘の形状、配置、交差順序、および表皮との接続については記録されていない。本調査ではこれらを調べるために、3通りの手法を用いてイシガキフグの棘と表皮の形態の調査を行った。

A. 3次元データの解析による膨張時の棘と表皮の動作の把握

B. 表皮の摘出による棘の位置・形状・交差順序の把握

C. 表皮の断面の観察による棘と表皮の詳細な構造の把握

2.2 手法

本調査では養殖個体のイシガキフグ3尾をサンプルとして用いた。これらの個体は、千葉県館山市の定置網で捕獲された天然魚（雌2尾、雄1尾）を交配させた1世代目である。各調査の手法は以下の通りである。

A. 最も収縮している状態から最も膨張している状態にかけての4段階の魚体を用意し、それぞれについてフォトグラメトリを用いて魚体の3次元データを取得した（Fig. 3a）。次に、それぞれの状態における棘の位置をマーキングし膨張収縮時の各棘の動きをトラッキングした（Fig. 3b）。最後に、RhinoのGrasshopperプラグインで解析用のツールを構築した。このツールでは、まず棘の座標データからConvex Hullを作成し、魚体を三角形メッシュに分割し、各段階におけるこの三角形メッシュの状態変化を、面積の変化率および変形の度合いという二つのパラメータについて解析し、可視化している（Fig. 3c）。

B. 魚体から表皮を摘出し、棘の位置とそれぞれの根の交差順序を記録した（Fig. 4）。この際に根の交差順序ごとに色を分け描画した（Fig. 7）。傾向を解析する際に、魚体を膨張収縮の度合いが異なる3部位（背部、側部、腹部）に分割することで、それぞれの部位における傾向を明らかにした。

C. 魚体の表皮を摘出し、棘の根と表皮の接合部を着色することで構造を可視化した。また、棘の根が交差している箇所において断面を摘出することで、根の交差が生じている箇所における表皮の状態を確認した（Fig. 5）。

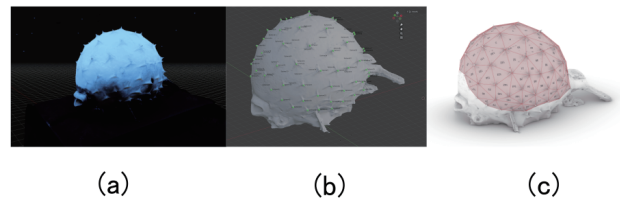


Fig. 3. (a) 3D data of the burrfish obtained via photogrammetry. (b) Marking the spine locations. (c) A convex hull applied to the fish body.

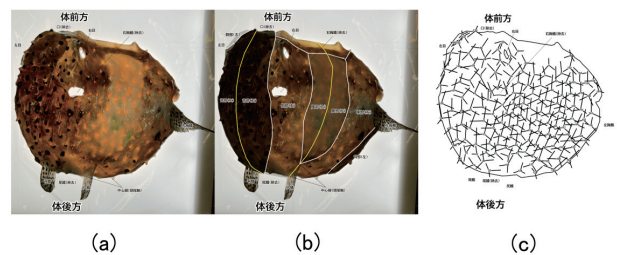


Fig. 4. (a) Dissected epidermis of the burrfish. (b) Division lines on the body. (c) Location of the spines.

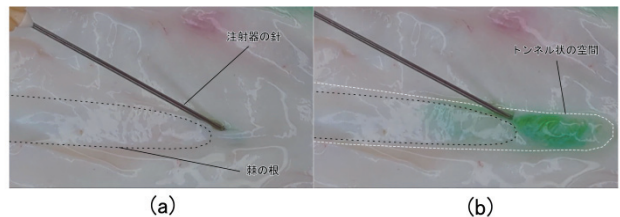


Fig. 5. The tunnel structure within the epidermis. (a) Before staining. (b) After staining.

2.3 結果

A. 三角形メッシュの面積の変化率は、腹部が側部より大きい傾向が見られる。特に腹部の前方・中央で変化が大きく、背部に近い側面の変化は小さい。また、魚体の変形には異方性が確認された。具体的には、左右軸方向への拡大が大きく、頭尾軸方向への拡大は比較的小さいことが特徴である（Fig. 6）。

B. 棘の根が交差する順序には明確な規則性が見られた。特に膨張・収縮の大きい腹部や側部では、体の尾側にある「前根」が最も上側に、頭側にある「左右の根」がその下側にくる傾向が極めて強いことが判明した。この決定された上下関係が、棘同士の干渉を防ぎ、滑らかな体の伸縮を可能にしていると考えられる。（Fig. 7）

この棘の重なり順序は、頭側の鱗が上になる一般的な魚類とは逆であり、また、棘同士が互いに支持し合うレシプロカル（循環）構造ではないことも確認された。

C. 表皮内には、棘の根がスライド移動するためのトンネル状の空間が存在する（Fig. 5）。この構造は、

魚体の膨張収縮時だけでなく、遊泳時などの屈曲運動の際にも、棘が表皮の滑らかな変形を阻害しないために機能すると考えられる。

また、棘の根が交差する位置では、これらのトンネル状の空間も独立して存在し、表皮内で上下に階層を分けて交差している (Fig. 8)。この階層構造が棘の根の交差順序を物理的に規定しており、自然状態での順序の入れ替わりは少ないと考えられる。

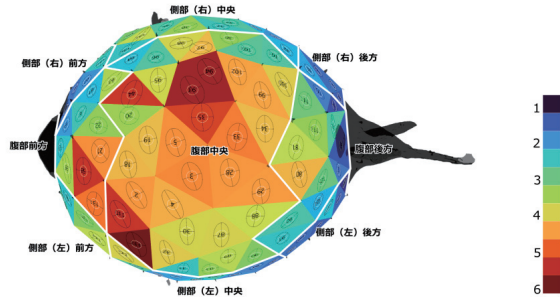


Fig. 6. Map showing the degree and direction of epidermal expansion.

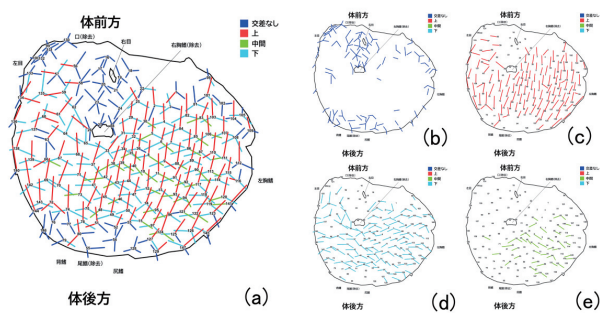


Fig. 7. (a) The overlapping order of each spine root. (b) Non-intersecting roots. (c) Top layer roots. (d) Middle layer roots. (e) Bottom layer roots.

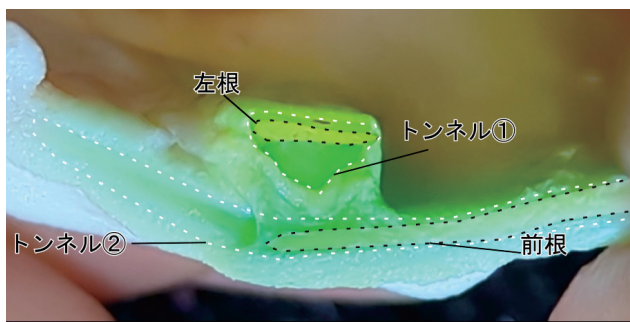


Fig. 8. Intersection of the tunnel structures.

3 イシガキフグの魚体の機能性の検証

3.1 目的

イシガキフグは特に収縮時において棘の根同士が交差しており、この構造は他のフグ目の魚種には見られない構造である。この特殊な構造は「イシガキフグの魚体の防御力を高めるための構造である」という仮説を立て、これを検証するために棘の重なりの有無およびその度合いをパラメータとした複数の生

体模倣モデルを作製し、捕食者の牙による攻撃を模擬した一点圧縮試験を行った。

3.2 手法

Fusion360 で (a) 棘なしモデル (NoSpine)、(b) 棘の根が重なり合わないモデル (ShortSpine)、(c) 棘の根の先端のみ重なり合うモデル (PartialOverlap)、(d) 実物の魚体の腹部の CT スキャンを参考に、棘の根が最も大きく重なり合うように再現したモデル (FullOverlap) をそれぞれ作成した。棘を有する 3 モデルについては、棘の配置は同一であり、棘の大きさ、形状を変えることで棘の根の交差の度合いを変化させている (Fig. 9)。

イシガキフグの棘と表皮の構造を模倣するために、表皮はシリコン (ショア硬度 18A)、棘は PETG 樹脂を用いて作成し、これらを組み合わせることで直径 105mm の円筒形モデルを 4 種類作製した。シリコンの成型には 3D プリント製の筒状の型を用いており、筒の内壁に予め棘をグルーガンで半固定した状態でシリコンを流し込むことで、棘同士の複雑な交差を正確に再現した (Fig. 10)。

力学特性の評価には、荷重測定機 (荷重測定スタンド: IMADA MX2、フォースゲージ: IMADA ZTA-50N) を用いて圧縮試験を実施した (Fig. 11)。捕食者の牙による一点集中攻撃を模擬するため、先端が鋭利な金属製インデンタを試験機に取り付けた。円筒モデルの転がり防ぐために、モデルの垂直中心線から 45° の角度で接触する 2 点にブロック治具を設置し、固定した。試験は変位制御で行い、圧縮速度 10mm/min で最大 50mm の深さまで非破壊的に実施した。各モデルについて 5 回の独立した試験 (n=5) を行い、荷重-変位データを取得し、再現性を確認した。

3.3 結果

各モデルの 5 回の試験結果から、荷重-変位グラフを作成した (Fig. 12)。また、同データセットから荷重 (50mm 変位時)、剛性、エネルギー吸収量、およびエネルギー損失率の平均値と標準偏差を算出した。結果の比較を Table.1、2 に示す。

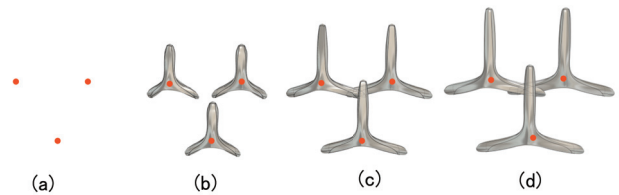


Fig. 9. Arrangement of spines for the models: (a) NoSpine, (b) ShortSpine, (c) PartialOverlap, (d) FullOverlap.

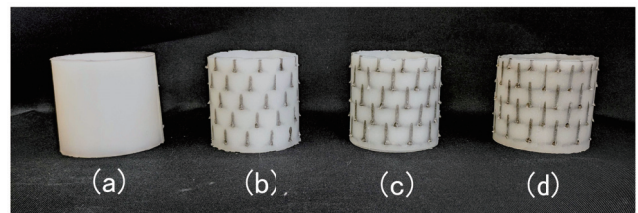


Fig. 10. Fabricated models: (a) NoSpine, (b) ShortSpine, (c) PartialOverlap, (d) FullOverlap.

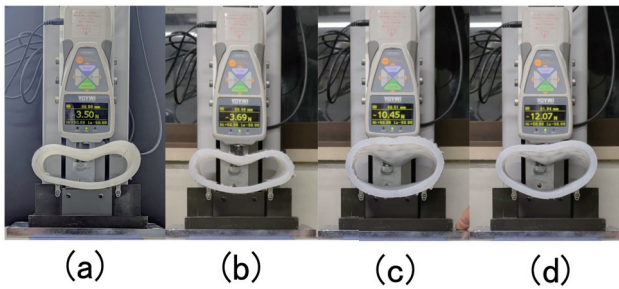


Fig. 11. Setup for the single-point compression test.

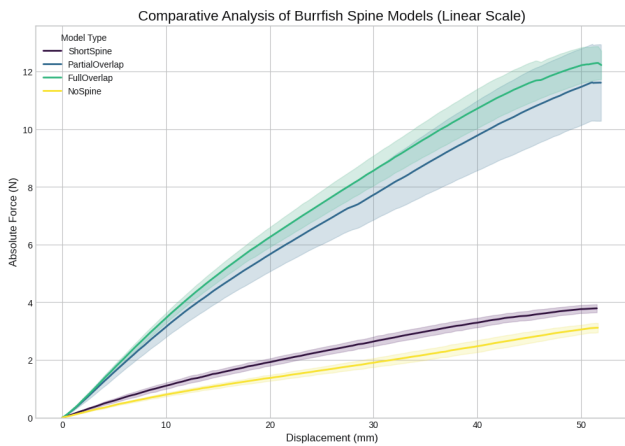


Fig. 12. Load-displacement curves for the four models.

Table 1. Mechanical properties of the models (Load and Stiffness).

Model Name	Load [N]	Stiffness [N/mm]
NoSpine	3.05 ± 0.16	0.08 ± 0.01
ShortSpine	3.76 ± 0.14	0.11 ± 0.01
PartialOverlap	11.47 ± 1.33	0.32 ± 0.03
FullOverlap	12.22 ± 0.62	0.36 ± 0.02

Table 2. Mechanical properties of the models (Energy Absorption and Loss Rate).

Model Name	Energy Absorption [N·mm]	Energy Loss Rate [%]
NoSpine	85.34 ± 6.95	4.02 ± 0.38
ShortSpine	113.09 ± 5.84	9.74 ± 2.58
PartialOverlap	337.06 ± 39.71	19.97 ± 2.72
FullOverlap	368.35 ± 20.60	20.65 ± 0.88

結果から、棘の重なりの有無が力学特性に大きな影響を与えることが明らかになった。50mm 変位時の荷重は、「ShortSpine」モデルの 3.76 N に対し、「PartialOverlap」モデルでは 11.47 N と約 3 倍に増大し、重なり構造が耐荷重性能を大きく向上させることが示された。同様の傾向は、初期変形への抵抗を示す剛性 (0.11 N/mm → 0.32 N/mm) および、衝撃エネルギーの吸収能力を示すエネルギー吸収量 (113.09 N·mm → 337.06 N·mm) においても確認された。

エネルギー損失率も重なりの有無で大きく変化した。「ShortSpine」モデルの 9.74% に対し、「PartialOverlap」および「FullOverlap」モデルでは約 20% と倍増した。これは、重なり構造が単に弾性的に抵抗するだけでなく、棘間や棘と表皮の間などにおいて生じる摩擦などによってエネルギーを散逸させる衝撃吸収メカニズムとして機能している可能性を示唆している。

また、各モデルの圧縮試験時における変位 50mm 時点での状態 (Fig. 11) を比較すると、交差の無い (a), (b) については筒は前後方向にかけて全体が潰れ

ているが、棘の交差がみられる (c), (d) については圧縮されている点周辺のみが潰れており、圧縮点から離れた個所は影響が少ないことがわかる。

4 考察

本研究では、イシガキフグの棘と表皮の構造に着目し、解剖や 3 次元データの取得によりその形態の解析し、魚体を模倣したモデルを作成し圧縮試験を行うことで棘の交差の機能性を検証した。

形態の解析により、棘の交差にはある程度の規則性があるということ、表皮の拡張の度合いは部位によって大きく異なること、表皮内には棘の根を格納するためのトンネル状の構造が交差して存在することがわかった。今後の課題としては、このトンネル状の構造をより具体的に解析し、どのように棘とトンネル状の空間が接続しているかについて調べたいと考えている。

また、モデルを用いた圧縮試験では棘の根の交差は魚体の防御力を高める効果があることが確認できた。しかし、このモデルでは各棘はシリコンの中で固定されており、魚体には本来存在するトンネル構造を再現することができていない。実際の魚体が圧縮された際にはこのトンネル構造内部で棘の根が移動することが予想されるので、今回得られた結果とは異なる特性を示す可能性が考えられる。今後の課題として、このトンネル構造をシリコン内に作成する方法を検討し、より実物に近いモデルの作成を行い、再度圧縮試験を行いたいと考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、貴重な剥製をご提供くださった、さかなクン（東京海洋大学名誉博士・客員教授）に感謝の意を表します。実験にご協力いただいた藤原新氏（九州大学大学院）、CT スキャナーの操作をご指導いただいた矢口雄太氏（東京大学大学院）にも御礼申し上げます。最後に、本研究の遂行にあたり多大なご助言とご協力をいただいた館研究室の皆様にも深く感謝いたします。なお、本研究の一部は JSPS 科研費 (22H04954) の助成を受けたものです。

References

- [1] T. Shono et al., “Evolution and Developmental Diversity of Skin Spines in Pufferfishes,” *iScience*, 19, pp. 1248–1259, 2019.
- [2] Y. Yamauchi et al., “Durable and Flexible Superhydrophobic Materials: Abrasion/Scratching/Slicing/Droplet Impacting/Bending/Twisting-Tolerant Composite with Porcupinefish-Like Structure,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, pp. 32381–32389, 2019.
- [3] Y. Shimoda, “FUGU - Origami-Inspired Ultralight Membrane Tensegrity,” *15th Colloquium on Analysis and Creation of Structural Forms*, 2020. [Online]. Available: <http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s49/collo2020/colloquium20.htm>. [Accessed: Jan. 3, 2025].

地域農業に寄り添った積層造形技術の提案 - 粃殻と米粉ペーストを活用した積層造形および菌糸体による表面被覆 技術の開発 -

Proposal for Additive Manufacturing Technology Tailored to Regional Agriculture
- Development of Additive Manufacturing Using Rice Husk and Rice Flour Paste, and a Surface
Coating Method Using Mycelium -

森本 康平¹, 津田 和俊²

Kohei MORIMOTO¹, Kazutoshi TSUDA²

¹長岡造形大学, ²京都工芸繊維大学

¹Nagaoka Institute of Design., ²Kyoto Institute of Technology

【要約】

本研究は、地域農業に寄り添った持続可能なものづくりの実現を目的とし、新潟県で盛んな稲作およびきのこ栽培と関連の深い粃殻、米粉、菌糸体を材料押出式 3D プリンタの材料として活用する技術開発のための初期的検討を行ったものである。具体的には、ペースト材料の調整方法とそれに基づくテクスチャー特性および造形後の外観品質を評価し、その結果、造形プロセスの最適化に寄与する基礎的知見を得ることができた。さらに補足的な試みとして、ヒラタケ菌糸体による表面被覆技術の実現可能性を検証した。以上の成果は、農業のプロセスとデジタルファブリケーションの接続による、持続可能な地域循環型のものづくりプロセスの提案のための基盤となるものである。

キーワード: 粃殻, 菌糸体, 3D プリンタ, サーキュラーデザイン, リサイクル

【Abstract】

This study explores sustainable manufacturing rooted in local agriculture through preliminary investigations into extrusion-based 3D printing using rice husks, rice flour, and mycelium—materials linked to Niigata Prefecture's rice and mushroom production. We examined paste preparation methods and evaluated texture and appearance, gaining fundamental insights for process optimization. In addition, we tested the feasibility of applying oyster mushroom mycelium as a surface coating technique. Overall, these findings provide a foundation for proposing a regionally circular and sustainable manufacturing process that integrates agriculture with digital fabrication.

Keywords: Rice husk, mycelium, 3D printer, Circular design, recycle

1. 序論

新潟をはじめ稲作地域で大量に排出される粃殻は、煙や臭気の問題から野焼きが制限されつつあり、処理に問題を抱える地域も多い。燃料化システムなど有効活用技術の開発が進められているものの、設備の導入には初期投資が必要であり、経済的障壁がある。また、粃殻は嵩が大きいので、収集・運搬・保管のコストが高い。このような背景から、中小規模の稲作地域においても導入可能な小規模設備により、地域内で有効利用する方法の確立が求められる。一方、3D プリンタなどのデジタルファブリケーション技術の発展により、小規模設備でも多様な製造が可能となる技術基盤が整いつつある。そこで、粃殻を3D プリンタの材料として活用することで、低コストの設備投資により多様なプロダクトの製造が可能となり、粃殻の有効活用に向けた新たな展開が期待される。このような取り組み事例は複数あり、著者らは粃殻を3D プリンタの材料として活用する研究事例をまとめた[1]。さらに近年、3D プリンタで制作した構造体や型に菌糸体を生成させる Mycelium Project[2]や

Mending with Mycelium[3]などのプロジェクト事例や、バイオマス材料と混合して積層造形する研究事例[4]も見られる。新潟はきのこ生産量が全国 2 位[5]と盛んであり、同技術を活用することで地場の農業的知見を活かしたものづくりの展開が期待できる。

なお、このような自然の生態的活動に寄り添う設計は、Ecological Design[6]の定義“design that minimizes environmentally destructive impacts by integrating itself with living process”に対応する。また、持続可能な世界への移行を論じたエスコバルは、“デザインが有するトランジションのための可能性を引き出すには、機能主義的・合理主義的・工業的伝統から生まれ、依然として支障なく機能しているデザインの現状を、生命の関係的な側面に同調するある種の合理性と一連の実践に向けて、大きく再定位(reorientation)する必要がある”[7]と言及している。農業と工業を接続し、地域の人々による生産を促す仕組みは、リサイクルの手段のみならず、この再定位の方向性の一つとなり得ると考える。

2. 研究目的

本研究は、地域農業に寄り添った積層造形技術の提案のため、粃殻と米粉ペーストを用いた積層造形の可能性を探るものであり、その初期的な試みとして、ペースト材料の作成条件と材料物性および造形品質との関係性を評価し、適切な材料および出力条件を検討するための基礎的知見を得ることを目的とする。具体的には、粃殻の粒径および米粉ペーストの加熱時間を変数として設定し、材料のテクスチャー特性を測定することにより、材料の吐出性、崩れやすさ、層間の結合といった 3D プリント特性を評価する。さらに、乾燥後の収縮率の測定と表面観察を通して、造形物の外観品質への影響を評価する。さらに、追加的な取り組みとして、ヒラタケの菌糸体を用いた表面被覆技術の実現可能性の検証を行う。

3. 材料と造形方法

3.1 材料の準備(粃殻)

はじめに家庭用グラインダー HC-700 (CGOLDENWAL)を用い粉碎を行う。回転スピード 28000 r/min で 60 s および 120 s 粉碎した粃殻を材料として用い、前者を粉碎粃殻(Crushed rice husk)、後者を粃殻パウダー(Rice husk powder)と定義する。

3.2 材料の準備(米粉ペースト)

市販の米粉(株式会社箕輪漆行)を用いて米粉ペーストを作製する。まず、調理用鍋に米粉を投入し、水を少量ずつ加えながら攪拌し、塊がなくなるまで溶く。次に 140 °C に加熱したホットプレート EHP-170N(アズワン株式会社)上に鍋を載せ、適宜攪拌を行いながら、所定の時間加熱を行う。その後、材料を 80 mesh の篩で裏ごしし、粘度が均一な米粉ペーストを作製する。

3.3 材料の準備(粃殻と米粉ペーストの混合)

米粉ペーストと粉碎粃殻もしくは粃殻パウダーを重量比率 5:1 の割合で混合し、積層造形用の粃殻混合ペースト材料(以下、粃殻ペースト)を作製する。

3.4 造形用 3D データと出力条件

サイズ評価用サンプルとして、直径 60 mm×高さ 40 mm の円柱状の容器を作製する。出力条件は、ライン幅を 10 mm、積層高さを 4 mm、壁の層数を 1 層とし、積層スピードは材料の吐出状況を確認しながら 3D プリンタの本体パネルで調整する。

3.5 積層造形機材

材料押出型の 3D プリンタとして、市販のセラミック 3D プリンタ Eazao Zero(Eazao)を改造した機材を使用する[Fig. 1(a)]。シリンダーにエアコンプレッサー SW-L25MPF-01(藤原産業株式会社)[Fig. 1(b)]を接続し、空気圧による押出方式に変更した。さらに、チューブを直接挿入できるノズルを製作し、エクストルーダーを介さず、材料を直接吐出させる機構に改良した。

4. 測定方法

4.1 テクスチャー特性の測定

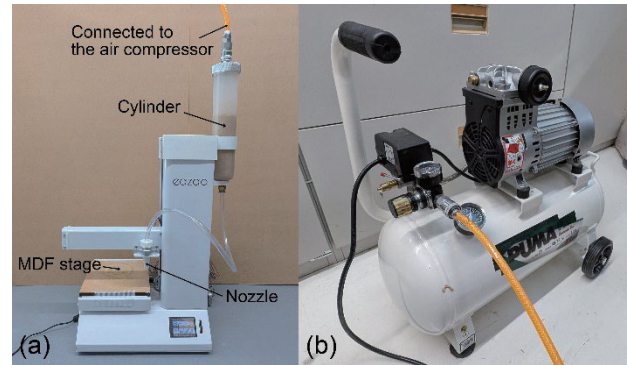


Fig. 1. 3D printing device (a)customized ceramic 3D printer (b)air compressor.

米粉ペーストの加熱時間と粃殻の粒径が異なる複数の粃殻ペースト材料を作製し、各材料のテクスチャー特性を測定する。粃殻を活用して積層造形を行った Nida らの研究[8]にならい、かたさ、凝集性、付着性、ガム性の測定を行い、材料の 3D プリント適性の評価を行う。はじめに、Table.1 に示す条件で、加熱時間が異なる 4 種の米粉ペースト(Rice flour paste A, B, C および D)を作製する。その後、各米粉ペーストを 150 g ずつに分け、それぞれに粉碎粃殻または粃殻パウダーを 30 g 混合し、2 種類の粃殻ペーストを作製する。そして、テクスチャープロファイルユニット TPU-2DN(株式会社山電)を用いて、米粉ペースト単体および 2 種類の粃殻ペーストのテクスチャー特性を計測する。

Table 1. Rice flour paste material preparation conditions

	Rice flour paste A	Rice flour paste B	Rice flour paste C	Rice flour paste D
Rice flour (g)	80	80	80	80
Water (22°C) (ml)	320	320	320	320
Heating temperature (°C)	140	140	140	140
Heating time (s)	720	780	840	960

4.2 乾燥後の収縮率の測定

粃殻パウダーと米粉ペースト(Rice flour paste A, B, C and D)を用い、4 種類の測定用サンプル(Model A, B, C and D)を作製する。出力条件は、材料が安定的に吐出され、かつ壁面が垂直に積層されるよう空気圧とヘッドの移動速度を調整した(Table.2)。なお、Rice flour paste A をバインダーとして用いた場合、材料が柔らかすぎて形状を保つことができず、造形は不可能であった。そのため、収縮率の測定は、Model B, C および D を対象とし、Fig. 2 に示す箇所の長さを測定する。造形直後に初期計測を行い、その後、定温乾燥器 DY300(ヤマト科学株式会社)に投入し、70 °C で乾燥処理を行う。そして、乾燥開始から 12 h 後および 24 h 後に乾燥器から取り出し計測を行う。

Table 2. Printing conditions of sample model for size measurement

	Model A	Model B	Model C	Model D
	Rice flour paste A	Rice flour paste B	Rice flour paste C	Rice flour paste D
Binder				
Print speed (mm/s)	3.00	3.00	2.70	2.40
Air compressor pressure (MPa)	0.01	0.20	0.30	0.32
Print results	Failure	Success	Success	Success

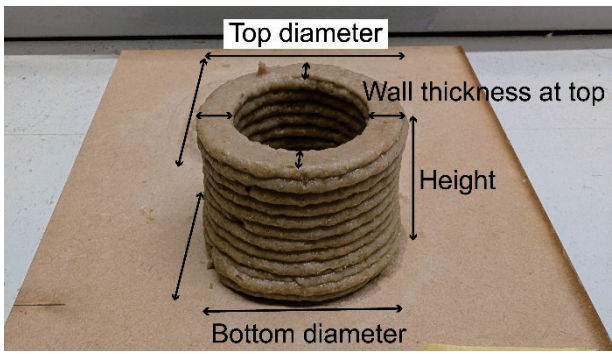


Fig. 2. Measuring point of size of a 3D printed object

4.3 外観品質の観察

加熱時間 840 s の米粉ペースト(Rice flour paste sample C)を用いた造形物を代表サンプルとして外観評価を行う。粉碎籾殻および籾殻パウダーを用いた 2 種類の積層造形サンプルを作製し、24 h 乾燥させた後、目視による確認および USB 実体顕微鏡 TS-2500(J-scope)を用いて造形物の天面および側面の観察を行う。

5. テクスチャー情報、収縮率、外観品質の評価結果

5.1 ペースト材料のテクスチャー特性の測定結果

テクスチャー特性の測定結果を Fig. 3 に示す。

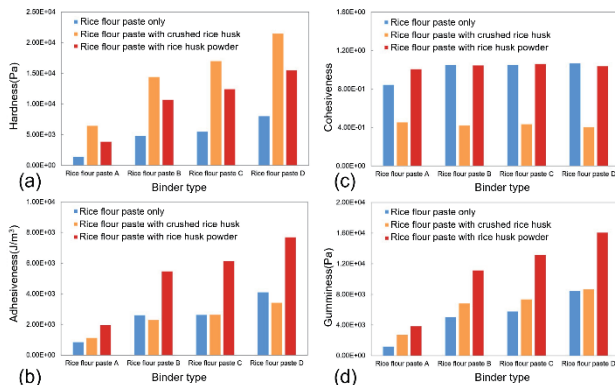


Fig. 3. Comparison of texture properties in different paste materials(a) hardness (b) cohesiveness (c) adhesiveness (d) gumminess

5.1.1 かたさ

Fig. 3(a)に示すように、いずれの材料においても、米粉ペーストの加熱時間が長いほどかたさが増加する傾向が認められた。さらに、籾殻を混合することで、米粉ペースト単体に比べてかたさが大きく増加することが確認され、より粒径の大きい籾殻を混合した場合の方が、かたさの増加率が高い傾向にあることも示された。

5.1.2 凝集性

Fig. 3(b)に示すように、籾殻パウダーを用いた籾殻ペーストは、米粉ペースト単体の凝集性と同程度の凝集性を示し、米粉ペーストの加熱時間の違いによっても大きな変化は認められなかった。一方、粒径の大きい粉碎籾殻を用いた籾殻ペーストでは凝集性が著しく低下することが確認された。

5.1.3 付着性

Fig. 3(c)に示すように、いずれの材料においても、米

粉ペーストの加熱時間を長くするほど付着性は増加する傾向が見られた。また、粉碎籾殻を混合した材料では、米粉ペースト単体と比較し付着性の差は小さい一方で、籾殻パウダーと混合した材料では付着性が大きく増加することが確認された。

5.1.4 ガム性

Fig. 3(d)に示すように、いずれの材料においても、米粉ペーストの加熱時間を長くするほどガム性は増加する傾向が見られた。また、粉碎籾殻と比較し籾殻パウダーを混合した方が、ガム性が大きく増加することが確認された。

5.1.5 材料のテクスチャー評価のまとめ

各材料のテクスチャー特性を評価した結果、粒径の小さい籾殻パウダーを用いる方がかたさの増加が抑制され、吐出時の圧力を低減できることが示された。さらに、凝集性が高いため崩れにくく、材料の途切れや空隙も発生しにくい可能性が高い。一方で、米粉ペーストの加熱時間を長くすることで、付着性およびガム性が向上し、積層に有利となる可能性があるが、かたさも増加するため、吐出性は低下すると考えられる。また、加熱時間 720 s の米粉ペースト(Rice flour paste A)と籾殻パウダーを用いた籾殻ペーストでは形状を保持できなかったことから、造形に成功した Rice flour paste B を用いた籾殻ペーストの間に造形可否の境界が存在すると推察され、積層造形には 10 MPa 程度のかたさおよび 6 MPa 程度のガム性が必要であると考えられる。

5.2 乾燥後の造形物の収縮率の測定結果

4.2. 項で示した造形サンプル(Model B, C and D)の測定対象箇所ごとの収縮率の変化を Fig. 4 に示す。いずれのサンプルも乾燥工程を経て全体的に収縮することが確認され、直径については、MDF ボードに固定された底面側よりも、自由に変形可能な天面側の方が大きな収縮を示している[Fig. 4(a)(b)]。また、壁厚および高さの収縮率はさらに大きく、特に壁厚に関しては約 20%の減少が認められた[Fig. 4(c)(d)]。しかし、一部にわずかな差異が見られたものの、米粉ペーストの加熱時間に比例した大きな違いは確認されず、造形後の収縮率との明確な関係性は認められなかった。

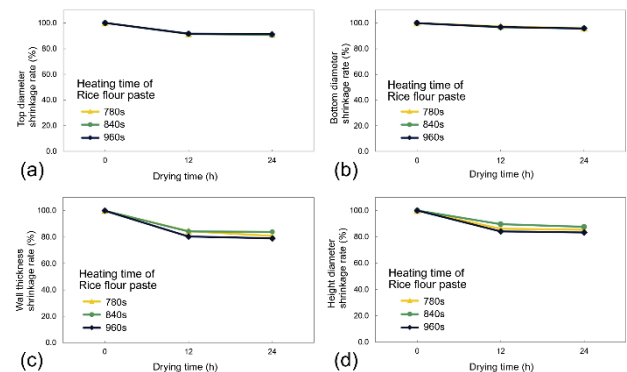


Fig. 4. Drying shrinkage rates of 3D printed objects. (a) top diameter shrinkage rate (b) bottom diameter shrinkage rate (c) wall thickness shrinkage rate (d) height shrinkage rate.

5.3 積層造形モデルの表面情報の観察結果

粉碎籾殻を用いた造形物の方が、表面に多くの凹凸や亀裂が観察された。また、顕微鏡による拡大写真 (Fig. 5) では、籾殻パウダーを用いた造形物にも一部に空隙が確認されるものの、粉碎籾殻を用いた方がより多くの空隙が観測された。

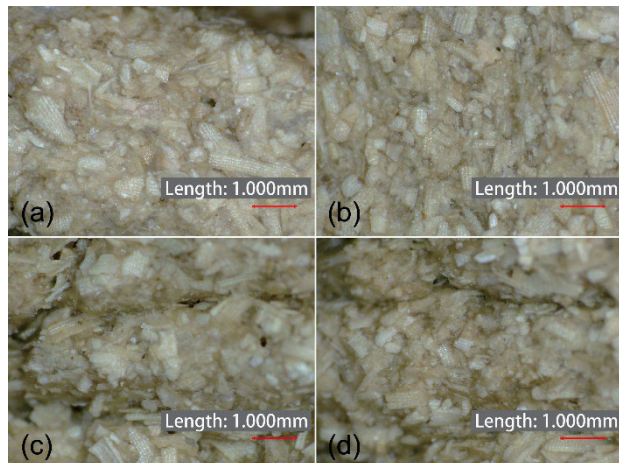


Fig. 5. Magnified images of 3D printed objects using rice husk paste (a)crushed rise husks: top (b) rice husk powder: top (c) crushed rise husks: side (d) rice husk powder: side.

6. 菌糸体を活用した表面被覆実験

6.1 実験方法

籾殻と米粉ペーストによる 3D プリント構造体は、バインダーである米粉ペーストの特性上、耐水性が低い。そこで、籾殻構造体に菌糸体を生育させ表面を覆うことにより、米粉ペーストと水分の接触を抑制し、耐水性を向上させることを目指す。実験にはヒラタケ菌の菌糸ブロックを用い、母体となる籾殻構造体は、3 章で示した方法で作成した直径 60 mm×高さ 40 mm の円筒状のサンプルを用いる。

はじめに、育成用のケースおよび籾殻構造体の滅菌処理を行った後、崩した菌糸ブロック(菌床)を底に敷き詰める。その後、サンプルを投入し、以下の 3 種類の方法で菌床を充填する。

- ①サンプルの外周に充填
 - ②サンプルの内部に充填
 - ③サンプルが全て埋没するように充填
- そして、蓋をして室温で保管し経過を観察する。

6.2 実験結果

実験開始から 2 日後に新たな菌糸が発生し、9 日後には①および②のサンプルにおいて、菌床が充填されていない側の表面を覆うように菌糸が発生していることが確認できた。そして、29 日後には菌糸体の厚みが増していることが確認できた (Fig.6)。

7. 結言

本研究の結果、籾殻の粒径および米粉ペーストの加熱時間の違いによる材料特性と造形品質に与える影



Fig. 6. Rice husk structure coated with oyster mushroom fungus

響について、一定の傾向を確認することができた。また、菌糸を用いた実験では、菌糸体が籾殻構造体の表面を被覆する様子を確認することができた。

本研究では安定的に造形物が得られるよう、混合する籾殻の割合を低く設定して実験を行った。しかし、廃棄籾殻の有効利用を目的とする場合、より多くの籾殻を利用できる方が望ましい。今後、造形機の改良を含め、さらなる技術開発を進め、国内における米および米粉の生産状況も視野に入れながら、農業生産や自然のサイクルに適合したものづくりの可能性を探求したい。

参考文献

1. K. Morimoto, K. Tsuda, D. Mizuno, “Literature Review on the Utilization of Rice Husks: Focus on Application of Materials for Digital Fabrication” *Materials*, 16(16), 5597 (2023).
2. E. Klarenbeek, M. Dros, “Mycelium Chair” (2013) Accessed September 13, 2025 <https://www.dotunusual.com/>.
3. E. F. Huffman, “Mending with Mycelium” (2021) Accessed September 13, 2025 <https://efhuffman.com/2021/12/10/mending-with-mycelium/>.
4. A. Bhardwaj, A. M. Rahman, X. Wei, Z. Pei, D. Truong, M. Lucht, N. Zou, “3D Printing of Biomass-Fungi Composite Material: Effects of Mixture Composition on Print Quality” *J. Manuf. Mater. Process.*, 5(4), 112 (2021).
5. 令和 6 年 特用林産基礎資料(特用林産物生産統計調査 結果報告書)
6. S. Van Der Ryn, S. Cowan, “Ecological design” Island Press, pp.18 (1996).
7. アストゥーロ・エスコバル, “多元世界に向けたデザイン” ビー・エヌ・エヌ, 水野大二郎他(監訳) pp.16 (2024).
8. S. Nida, T. Anukiruthika, J.A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, “3D printing of grinding and milling fractions of rice husk.” *Waste Biomass Valorization*, 12, pp.81-90 (2021).

Investigation of Okara Upcycling through 3D Food Printing for Sustainable Ingredient Development

Chia-Yi Lin¹, Jian-You Li¹, Tzi-Jung Wang², Tsuei-Ju Hsieh²

¹National Yang Ming Chiao Tung University, ²National Tsing Hua University

【Abstract】

This study successfully developed a sustainable and 3D-printable cookie dough by incorporating okara (soybean residue), glutinous rice flour, and xanthan gum. Optimal formulation significantly enhanced printability, structural stability, and post-baking dimensional accuracy. The research highlights the potential of utilizing food-processing by-products in food fabrication, effectively addressing food waste and sustainability issues, and demonstrates educational value by engaging children in nutrition awareness and environmental responsibility through interactive, customized food printing experiences.

Keywords: 3D printing, Okara, Printability, Sustainable ingredient, Food education

1. Introduction

With the continuous and rapid growth of the global population, it is estimated that by 2050, food supply will become a major challenge worldwide [1;2]. Against this backdrop, changing current food consumption habits, reducing food waste, and developing more sustainable consumption patterns have become important international issues. Okara, a by-product of soybean processing, is currently one of the largest sources of food industry waste. The production of 1 kg of tofu or soy milk generates approximately 1.2 kg of wet okara, and the global annual output is as high as 1.4 billion tons, mainly concentrated in Asian countries such as China and Japan [3;4]. Okara is rich in nutrients; dried okara contains about 50% dietary fiber, 25–30% protein, 10% lipids, and various beneficial bioactive compounds [3;4]. Given this composition, okara is highly suitable for reuse as a food ingredient.

3D food printing technology has developed rapidly and is considered an emerging strategy for addressing future food and resource waste, offering multiple advantages such as high customization, reduced raw material loss, enhanced nutritional value, and innovative applications [5;7]. As the food industry faces fluctuating demand and highly variable supply chains, there is a global trend toward the adoption of information and communication technology (ICT) and digital manufacturing (such as 3D food printing) to improve production efficiency, reduce raw material waste, promote sustainable, personalized, and flexible manufacturing models, and effectively lower carbon emissions while enhancing competitiveness [8;9;10]. Numerous studies have utilized various food ingredients—such as wheat flour with egg powder [5], lemon juice with potato starch [6], and freeze-dried mango

powder blended with flour [7]—for 3D printing applications. Most 3D food printing adopts extrusion-based methods, with the final print quality highly dependent on the rheological properties and formulation adjustments of the raw materials [7]. However, current literature lacks in-depth research on replacing part of the wheat flour with okara and applying it to cookie dough as a food printing material. With its high fiber and protein content, okara is theoretically suitable for food formula reuse, but its effects on printability, structural support, and post-processing performance (such as deformation after baking) still require systematic verification.

This study used okara-based cookie dough, combined with glutinous rice flour and xanthan gum, to investigate the effects of different formulation combinations on 3D food printing quality (support and appearance) and further analyzed the deformation behavior of cookies after baking. The goal is to enhance the value of okara for food reuse, reduce food processing waste, and, by integrating food education, promote the concepts of circular diets and sustainable consumption.

2. Materials and methods

2.1 Basic Formulation-Printing-Baking-Evaluation-Formulation Adjustment-Re-evaluation

This study was based on a conventional wheat flour cookie formulation, in which part or all of the wheat flour was replaced with okara powder, and milk was substituted with soy milk. According to relevant research, dietary fiber, starch, and hydrocolloids each have different effects on printing and baking [11;12]. Therefore, the dough was divided into three formulations—A (pure okara), B (okara + glutinous rice flour), and C (okara + glutinous rice flour + xanthan gum) (as shown in Table 1)—for initial testing.

Based on the results of printing and baking, the formulations were adjusted, resulting in four second-round formulations for further printing, baking, and evaluation. Besides the main ingredients (okara powder, glutinous rice flour, xanthan gum), the proportions of the other components (sugar, egg yolk, unsweetened soy milk) were kept constant.

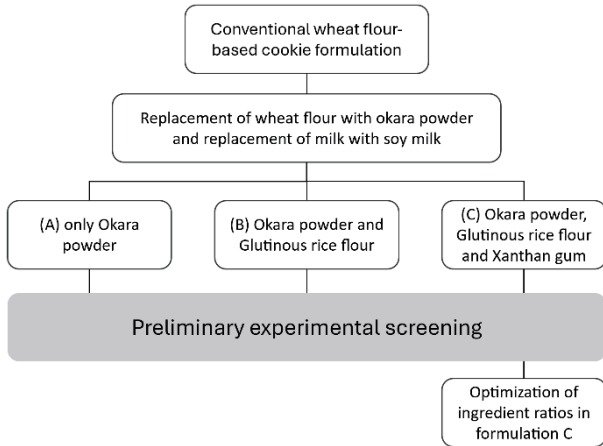


Fig. 1. Formulation Optimization Process

The dough preparation process was as follows: The fat ingredient was softened and first mixed evenly with the wet ingredient (sugar), then egg yolk was added in two portions. Afterwards, the dry ingredients (okara powder, glutinous rice flour) and xanthan gum were incorporated and mixed thoroughly. Finally, soy milk was added and mixed until uniform, and the dough was refrigerated (at 0–7°C) for 12 hours to ensure complete hydration of the hydrocolloid.

Table 1. Formulation of first experiment in this work

Sample	Okara Powder (g)	Glutinous Rice Flour (g)	Xanthan Gum (g)	Sugar · Yolk · Soy Milk (g)	Total Mass (g)
A1	70	0	0	190	260
B1	40	30	0	190	260
C1	40	29.5	0.5	190	260

2.2 3D printing and post-processing

In this study, cylinder ($\varnothing=50$ mm, $H=100$ mm) and cube ($30\times30\times10$ mm³) models were designed using Rhino software, and G-code was generated with Simplify 3D. Dough samples were printed using a deposition-type extrusion 3D printer (YC3D, Taiwan, Fig. 2) at approximately 26°C. The air pressure was adjusted according to the formulation (0.2–1.7 kgf/cm²), with a printing speed of 30 mm/s, a nozzle diameter of 1.5 mm,

and an extrusion multiplier of 0.2. After printing, the cube samples were placed in an oven (top heat 160°C, bottom heat 140°C), preheated for 10 minutes, and then baked for 30 minutes before cooling.

The printability of the material determines whether it can be shaped by 3D printing and maintain structural support and integrity after deposition [11]. To facilitate quantification and comparison of stacking behavior and stability during printing, this study used the formulations in Table 1 and Table 2 to perform two rounds of printing with cylinders ($\varnothing=50$ mm, $H=100$ mm) and cubes ($30\times30\times10$ mm³). These two simple geometric shapes were used to evaluate the stacking support, surface smoothness, and the degree of cracking and warping after baking for each formulation, with a comprehensive printing quality score assigned.

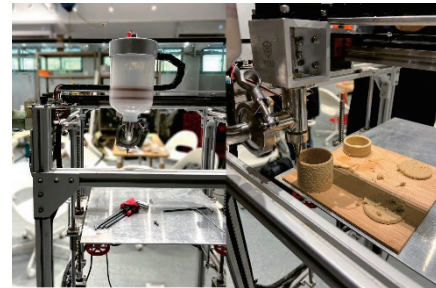


Fig. 2. YE3D 3D printer

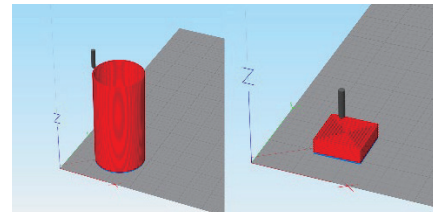


Fig. 3. Cylinder ($\varnothing=50$ mm, $H=100$ mm) and Cube ($30\times30\times10$ mm³) in preview mode

3. Result and discussion

3.1 First-Round Formulations (A1, B1, C1)

3.1.1 Printing Performance

The results of the first round of printing and baking are shown in Table 2. In the first experiment, all three formulations (A1, B1, C1) from Table 1 exhibited poor printability, and none could produce a complete cylinder with a height of 100 mm. The A1 cube was square but had coarse particles and large gaps, likely due to the high fiber and protein content of okara; without starch and hydrocolloid, the extruded lines broke easily and layer adhesion was poor. For B1, replacing part of the okara powder with glutinous rice flour resulted in a moister appearance and improved adhesion, but support was insufficient, and the cube collapsed. In C1, adding 0.2% xanthan gum improved the extrusion continuity but still

failed to print a complete cylinder, and the cube also collapsed, possibly due to an excessive proportion of rice flour.

3.1.2 Baking Performance

After baking, the A1 cube exhibited severe cracking and warping. B1 showed improvements in both cracking and warping, while C1—with xanthan gum added—showed a significant reduction in cracking, and warping similar to B1. In the second experiment, all four formulations (C2–C5) produced cubes with minimal cracking and warping, smooth surfaces, and less graininess.

Table 2. First-round printed and baked samples

Sample	A1	B1	C1
Cylinder	Fail	Fail	Fail
Cube Cube (Baked)			
			
			
Printing quality	2	2	3

3.1.3 Formulation Optimization

Results from the first experiment indicated that C1 had the best overall performance. Thus, the C1 combination of okara powder, glutinous rice flour, and xanthan gum was considered the most suitable for further development. The printability results for A1 and B1 showed that okara powder mainly contributed to dough support, while glutinous rice flour improved extrusion smoothness and reduced cracking. Based on these findings, the proportions of okara powder and glutinous rice flour were adjusted to produce the second-round formulations C2–C5 (Table 3).

3.2 Second-Round Formulations (C2–C5)

3.2.1 Printing Performance

The results of the second round of printing and baking are shown in Table 4. In the second experiment (C2–C5), after adjusting the ratios of okara powder and glutinous rice flour, all four formulations successfully printed complete cylinders with a height of 100 mm. Among them, C4 and C5 showed the least tilting; the cubes also exhibited improved collapse resistance and good adhesion,

with C4 and C5 performing the best.

Table 3. Formulation of second experiment in this work

Sample	Okara Powder (g)	Glutinous Rice Flour (g)	Xanthan Gum (g)	Sugar 、Yolk 、Soy Milk (g)	Total Mass (g)
C2	45	24.5	0.5	190	260
C3	50	19.5	0.5	190	260
C4	52.5	17	0.5	190	260
C5	55	14.5	0.5	190	260

3.2.2 Baking Performance

Based on comprehensive scores for support, appearance, and degree of warping after baking (scored 1–5, where 1 is the worst and 5 is the best), C4 showed the best overall performance, demonstrating good structural support, a smooth appearance, and no significant cracking or warping after baking. Therefore, C4 was selected for further diverse shape-printing tests in the subsequent development of this study.

Table 4. Second-round printed and baked samples

Sample	C2	C3	C4	C5
Cylinder	Success	Success	Success	Success
Cube Cube (Baked)				
				
				
Printing quality	3	4	5	4

3.3 Practical Application as Food Education Tools

After confirming the good printability of the okara-based dough, this study further explored its application in food education. According to the literature, gamification and serious games can effectively enhance children's fruit and vegetable intake, nutrition knowledge, and healthy attitudes, while encouraging children to explore new foods, increase acceptance of novel ingredients, and reduce picky eating [13]. In this study, 3D printing technology was used to produce various geometric shapes such as "Tapered Cylinder" and "Twisted Column" (see Fig. 4), helping children connect food shapes with

geometric structures through observation, touch, and tasting, thereby strengthening sensory cognition and increasing their understanding of food diversity.



Fig. 4. Actual Printing Results of Food Shapes with Various Geometric Structures

4. Conclusion

This study developed a 3D-printable cookie dough formulation (C4) using okara as the base material, combined with glutinous rice flour and xanthan gum, demonstrating excellent printability, support, and baking stability, and confirming the effective reuse of food by-products in digital food manufacturing. 3D food printing technology enables personalized nutrition design and high automation, helps establish new food supply chain models, and promotes mass customization and resource circulation [9;10]. Furthermore, this study verified the potential of okara 3D-printed foods as innovative educational tools, which can enhance children's nutrition knowledge, environmental sustainability awareness, and hands-on abilities, demonstrating high educational and practical value. It is recommended that future research continue to expand the diversity of food materials and formulations and apply this technology in broader contexts to promote a more personalized and sustainable development of the food industry.

Reference

1. Smith, P., & Gregory, P. J. (2013). Climate change and sustainable food production. *Proceedings of the Nutrition Society*, 72(1), 21-28.
2. Reisch, L., Eberle, U., & Lorek, S. (2013). Sustainable food consumption: an overview of contemporary issues and policies. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 9(2), 7-25.
3. Feng, J. Y., Wang, R., Thakur, K., Ni, Z. J., Zhu, Y. Y., Hu, F., et al. (2021). Evolution of okara from waste to value added food ingredient: An account of its biovalorization for improved nutritional and functional effects. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 669-680.
4. Li, B., Qiao, Meiying, & Lu, F. (2012). Composition, Nutrition, and Utilization of Okara (Soybean Residue). *Food Reviews International*, 28(3), 231-252.
5. Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, 109691.
6. Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT*, 87, 67-76.
7. Liu, Y., Liang, X., Saeed, A., Lan, W., & Qin, W. (2019). Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 9-18.
8. Demartini, M., Pinna, C., Tonelli, F., Terzi, S., Sansone, C., & Testa, C. (2018). Food industry digitalization: From challenges and trends to opportunities and solutions. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1371-1378.
9. Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y. H., Hong, G. S., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308-319.
10. Sun, J., Peng, Z., Yan, L., Fuh, J., & Hong, G.-S. (2015). 3D food printing—An innovative way of mass customization in food fabrication. *International Journal of Bioprinting*, 1, Article 006.
11. Pérez, B., Nykvist, H., Brøgger, A. F., Larsen, M. B., & Falkeborg, M. F. (2019). Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. *Food Chemistry*, 287, 249-257.
12. Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M. H., & Park, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *LWT*, 101, 69-75.
13. Chow, C. Y., Riantiningtyas, R. R., Kanstrup, M. B., Papavasileiou, M., Liem, G. D., & Olsen, A. (2020). Can games change children's eating behaviour? A review of gamification and serious games. *Food Quality and Preference*, 80, 103823.

Keratin-derived biomaterials for corneal bioprinting

Leon Balters , Stephan Reichl

Institute of Pharmaceutical Technology and Biopharmaceutics, Technische Universität Braunschweig,
Germany

Abstract

Bioprinting is a fairly new technology in the field of tissue engineering. Keratin-based biomaterials showed promising results in corneal tissue engineering, but have not yet been implemented for corneal bioprinting. This study developed a novel bioink by incorporating keratin-derived biomaterials into a hyaluronic acid bioink loaded with corneal cells. The printed constructs were evaluated for biomechanical properties, light transmission, cell viability, and protein expression. Results demonstrated that the addition of keratin-derived biomaterials may have led to an improvement in cell viability and protein expression, highlighting the potential of the underutilized biomaterial.

Keywords: bioprinting, cornea, keratin, hyaluronic acid, keratocytes

1. Introduction

Corneal blindness remains a major global health issue, but the scarcity of donor corneas limits treatment options. To address this issue, tissue engineering and bioprinting have emerged as a promising solution in recent decades. Bioprinting uses a computer-aided design (CAD) and a layer-by-layer method of biomaterials and bioink, a combination of biomaterials and cells, to recreate the structure and function of tissues, for example a native cornea. An ideal bioink for corneal tissue engineering should demonstrate sufficient transparency, biocompatibility, mechanical stability and is capable of supporting cell viability and differentiation. [1] One common biomaterial used is collagen, which is often derived from animal sources. This is ethically controversial and alternative recombinantly produced collagen has been very expensive to date. A possible alternative could be keratins. Keratins have already been used in the tissue engineering field and also for corneal application, showing promising results in vitro and in vivo studies. [2, 3] Keratins are often gained from human hair or nail waste, making them ethically reasonable and possible cost-effective. The potential use of keratins in bioprinting and especially corneal bioprinting remains underutilized. This study aims to bridge this gap by developing and implementing a keratin-based bioink for corneal bioprinting. The bioprinted constructs were studied on light transmission, biomechanical properties and cell viability as well as specific protein expression.

2. Concept

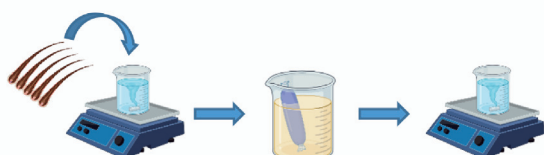


Figure 1: Keratin extraction after Shindai method

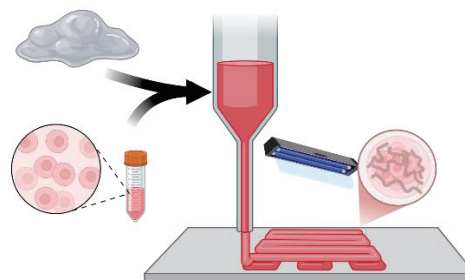


Figure 2: Bioprinting using hydrogel with cells, postprinting crosslinking with UV light

Two keratin preparations, an aqueous and an alkaline extraction, were extracted from human hairs after the Shindai extraction method. [4] Furthermore aqueous keratin was chemically modified to methacrylated keratin (KerMA). To confirm the successful functionalization of methacrylated keratin (KerMA), various characterization methods such as proton nuclear magnetic resonance spectroscopy ($^1\text{H-NMR}$), infrared spectroscopy (IR) as well as a cytotoxicity assay (MTT) were performed. The keratin derivatives, aqueous keratin, alkaline keratin and KerMA were incorporated into a methacrylated hyaluronic acid (HAMA) bioink and compared to a collagen-HAMA bioink as well as solely HAMA. Two different cell types, immortalized corneal keratocytes (HCK) and primary human corneal fibroblasts (HuFib) were used. Corneal stroma like constructs were printed by extrusion bioprinting and evaluated on optical transmission by measuring the extinction and

macroscopic evaluation, biomechanical properties with compression and tensile tests, cell compatibility by using a live/dead assay and protein expression by indirect immunofluorescence of collagen type I and alpha-smooth muscle actin, all over the course of four weeks.

3. Results and Discussion

The successful modification of KerMA was confirmed by ¹H-NMR and IR, verifying the methacrylation of keratin. Furthermore, a cytotoxicity assay assured that the new biomaterial is non-toxic. This first step is crucial for further bioprinting experiments. Corneal tissue engineered implants must be transparent to allow vision. All bioprinted constructs demonstrated high light transmission. Although aqueous keratin and KerMA bioink showed slightly lower transmission values, they still met the necessary criteria set by macroscopic evaluation. From a biomechanical standpoint, all bioinks showed similar mechanical properties. This might suggest that HAMAs influence contributes the most to the structural integrity. However, with the addition of KerMA a slightly higher tensile strength could be detected. Further supporting the use of KerMA.

High cell viability was observed across all bioink formulations. This confirms that the bioprinting process as well as the hydrogel matrix did not harm the cells and thus were biocompatible. Moreover, a higher proliferation of HCKs could be seen in collagen and KerMA supplemented bioink. This suggests that the addition of collagen or KerMA might support a more suitable environment for the HCKs. Although, HuFibs also demonstrated a high cell viability, no proliferation could be seen in any bioink formulation. This might possibly hint that the environment for the HuFibs is hindering a proliferation as in a 2D culture a high proliferation could be seen. Protein expression of collagen type I and alpha-smooth muscle actin, was relatively low across all bioinks. A subtle but notable increase was observed in Collagen and KerMA bioink of the HCKs, possibly correlated to the higher proliferation seen by the cell viability assay. Unlike in 2D Culture, the HuFibs did not express the amount of collagen type I as it would have been expected. This could lead to the assumption that the HuFibs were in a quiescent state, to further prove this more studies and other protein expression and quantitative evaluation by gene expression would be beneficial.

4. Conclusion

The development of a suitable bioink and the search for new biomaterials remain a challenge in the field of bioprinting and particular in corneal bioprinting. The

results of this study are a further step to new biomaterials that could be used in bioprinting. Keratin-derived materials are a promising and underutilized material and alternative to more traditional biomaterials like collagen. The possibilities of keratin-derived biomaterials were demonstrated in this study. The characterization of the bioprinted discs confirms the possible suitability of keratin-derived biomaterials for corneal tissue engineering and bioprinting. A positive contribution of KerMA to the HAMA bioink was demonstrated by a higher mechanical strength as well as an increase in proliferation and higher expression of collagen type I in HCKs. Furthermore, even though a proliferation and high collagen type I expression of HuFibs was expected, this did not occur. Nevertheless, this information could be used to better study and understand the behavior of HuFibs in a new 3D printed environment. In summary, this study successfully demonstrates a new biomaterial and the use of keratin-derived biomaterials as a viable, novel addition to bioinks. Further studies are recommended to understand the use of keratin-derived biomaterials in the field of bioprinting. This should not be limited to corneal bioprinting, but possibly extended to other areas of tissue engineering.

References

- [1] L. Balters and S. Reichl, "3D bioprinting of corneal models: A review of the current state and future outlook," *Journal of tissue engineering*, vol. 14, 20417314231197793, 2023, doi: 10.1177/20417314231197793.
- [2] M. Borrelli, S. Reichl, Y. Feng, M. Schargus, S. Schrader, and G. Geerling, "In vitro characterization and ex vivo surgical evaluation of human hair keratin films in ocular surface reconstruction after sterilization processing," *Journal of materials science. Materials in medicine*, vol. 24, no. 1, pp. 221–230, 2013, doi: 10.1007/s10856-012-4774-4.
- [3] M. Borrelli *et al.*, "Keratin films for ocular surface reconstruction: Wound healing in an in-vivo model," *Experimental eye research*, vol. 227, p. 109356, 2023, doi: 10.1016/j.exer.2022.109356.
- [4] A. Nakamura, M. Arimoto, K. Takeuchi, and T. Fujii, "A rapid extraction procedure of human hair proteins and identification of phosphorylated species," *Biological & pharmaceutical bulletin*, vol. 25, no. 5, pp. 569–572, 2002, doi: 10.1248/bpb.25.569.

ボクセルファイル形式 FAV を使った 3D 造形用ファイル生成の基礎技術

Fundamental Technology of creating files for 3D printing using voxels format FAV

山崎 淳¹, 水野 修²

Jun YAMAZAKI¹, Osamu MIZUNO²

¹ 東京大学, ² 株式会社テトラフェイス

¹ The University of Tokyo, ² tetraface Inc.

【要約】

Voxel ファイル形式 FAV を使った 3D 造形基礎技術について報告する. FAV を利用すると, STL ファイル形式の弱点を克服して複雑な STL ファイルの編集を行うことなしに, 3D 造形を行うことができる. color_map にも対応できるので, 1つのファイルでカラー情報も共有できる. 具体的に, FAV の親 Voxel から Additive Manufacturing(AM)に入力できる PNG ファイルを生成させる要点を示す. 実際に Stratasys 社製の GrabCAD に PNG ファイルをインポートさせて, 3D 造形可能なことを示す. その他として Voxel の階層構造を利用して, 数代にわたる Voxel に再分割させて, 任意の 3D 空間上の物理量についても 3D 造形可能なことを報告する. なお, 一部の技術をのぞいて FAV はライセンスフリーなので, 皆様のカラー 3D 造形に役立ててもらえれば幸いである.

キーワード: 3D モデリング, PNG ファイル, ボクセル

【Abstract】

We report on the basic technology of 3D modeling using the FAV voxel file format. By using FAV, it is possible to overcome the weaknesses of the STL file format and perform 3D modeling without editing complex STL files. It also supports color maps, so color information can be shared within a single file. Specifically, it demonstrates the key points for generating a PNG file from an FAV parent voxel that can be input into Additive Manufacturing (AM). It demonstrates the feasibility of 3D modeling by importing the PNG files into GrabCAD by Stratasys. It also reports that by utilizing the hierarchical structure of voxels and subdividing them into several generations of voxels, it is possible to make 3D models of many physical quantities in 3D space. Except for some technologies, FAV is license-free, so we hope that it will be useful for your color 3D modeling.

Keywords: 3D modeling, PNG files, voxel

1. はじめに

3D 立体構造を記述するファイル形式として, STL(Stereolithography または Standard Triangulated Language)がある. 表面の形状を三角形のメッシュで分割し 3D データ化したものであり, 1986 年にチャック・ハルにより開発された¹⁾.

Additive Manufacturing(AM)もすでに 40 年以上の歴史があり, STL ファイル形式の限界も指摘されている. 三角メッシュの構造内部にデータを保有できないため, 構造体の内部に別の構造体情報を含ませる必要があり, 構造体同士の重なり部分をブーリアン演算で結合または, 部分削除などの操作を必要とする.

そのほか, カラーモデリングする場合は, STL ファイルの拡張として, OBJ ファイル形式(Wavefront OBJ)などがあり, 同一ファイルで複数のカラー情報(テクスチャー)を共有できるが内部情報は含まれない.

Voxel¹⁾⁻⁷⁾の概念を使うとこれら STL ファイル形式特有の問題を回避することができる. Voxel とは Pixel の 3D

版である. すでに JIS 規格を取得した FAV²⁾⁻⁵⁾と HP 社が独自に開発して製品に組み込んだ HP 社専用のファイル形式⁶⁾が有名である. このほか理化学研究所⁷⁾なども独自に開発・利活用しているようである. Voxel の欠点としては, データ容量が大きくなる傾向があるが, パソコンでもマルチスレッド時代であるので並列化技術を使えば, この問題は克服できると考えられる. なお, FAV から PNG ファイルに変換すると, データ容量は約 1/41 程度に減らすことができ(4.8GB から 116MB), 7-ZIP を使うとさらに 1/420 程度のデータ容量が圧縮できる(274KB).

最初に STL ファイル形式の問題点について 2 例述べた後, Voxel ファイル形式 FAV について簡素に説明する. 詳しくは参考文献をあたってもらいたい²⁾⁻⁴⁾. 物理量のデータから FAV へ変換後, FAV から AM へ 3D 造形する際に必要な PNG ファイルへの変換方法について簡潔に述べる. FAV ファイル形式から PNG ファイル形式へのデータ変換は Voxel 間のデータ変換でもある. その後, チェス駒の FAV データ⁸⁾から PNG へ, 球状の一樣

電荷密度分布のデータから FAV 経由で PNG に変換する過程を簡潔に述べる⁹⁾. Stratasy 社製のインクジェットプリンタで 3D 造形できるように同社の GrabCAD¹⁰⁾ にインポートできるまでを報告する.

2. STL の問題点

3D 造形する際に, STL ファイルではブーリアン演算を使って, 構造体同士の結合や部分削除の作業を必要とするときがある. Fig.1 に示すように, わかりやすく 2 次元の構造体を考える. まず, 円形とひし形の 2 つの構造体を考える. 実際に AM で 3D 造形しようとするとき, 2 つの構造体が空間的に重なりあう. AM ではこの STL ファイルを読み込むとエラーを表示させる場合が多い. スライサー側で, 重なり部分を認識してどちらかの構造体を部分的に削除してくれればよいが, 多くの場合ユーザがブーリアン演算を使い部分削除・データ編集をしなければならない. ブーリアン演算機能付き 3D データ編集ソフトは高価であり, ファイル編集も煩雑である.

また, 同一材料・同一ファイルでカラー表示させる場合は OBJ ファイルを使いテクスチャーに色情報を持たせればカラー造形は容易である. しかし, 複数の材料で 3D 造形する場合は, スライサーなどでテクスチャーのみの情報で対応可能か確認が必要である.



Fig.1 Circular and diamond-shaped structures. The left image shows each individual shape. The middle image shows the case where the spaces partially overlap when actually creating 3D shapes using AM. The right image shows the circular part where the overlapping parts of the circle and diamond were removed using Boolean operations.

3. Voxel ファイル形式 FAV の利用

ボクセルファイル形式 FAV については, JIS 規格書²⁾や解説記事^{3),4)}が複数出ているので, 詳しい話はそちらを参照していただきたい. なお, html ファイル形式で記述するために OS やバージョンに依存しないで 3D データを継承できるという特長がある.

Fig.2 に FAV の概念図を示す. 構造体の内部に積み

木にあたる Voxel を積み上げるデータ構造をとる. ボクセル単位で色や材質など指定でき, 接続強度などもデータとして保持できるようになっている. 絶縁性樹脂の中に伝導性樹脂で回路を組むことも内部情報を含む Voxel では容易に設計できる.

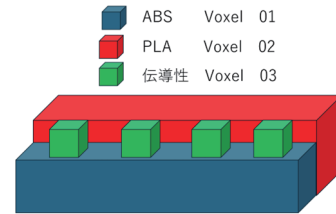


Fig.2 FAV concept drawing: It is like stacking multiple materials like building blocks.

FAV では親ボクセル, 子ボクセル, 孫ボクセルのようにユーザ定義でボクセルの階層構造をとることができる (Fig.3). また, PNG ファイルに変換する際も元の FAV データから子 Voxel, 孫 Voxel を使い階層構造を持たせ, AM の分解能とモデリングの大きさからスケール変換を行い, 最終的に PNG ファイルを生成させる.

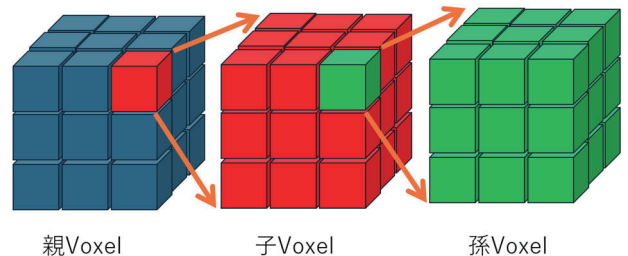


Fig.3 FAV hierarchical structures.

FAV の利点は, STL ファイル形式群にない構造体の内部情報を含めて, Voxel 単位で積層させることができること, 空間的に一つの Voxel のみ指定するために, 複数の構造体が同一空間に存在することができない点である.

Voxel_map のデータの並べ方は C 言語などの配列で表示させると (Fig.4),

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} \sum_{z=z_1}^{z_2} \text{Voxel_map}[x][y][z] = 01. \text{円形}$$

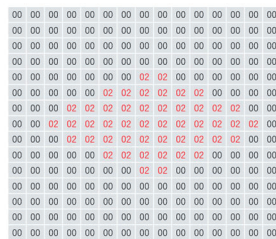
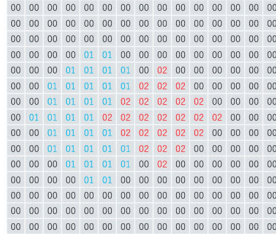
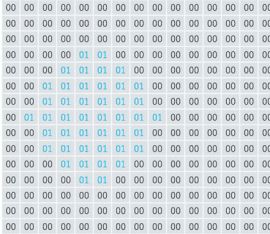
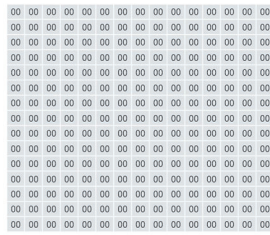


Fig.4 #Displays the voxel distribution of one layer. The top image shows an empty voxel, the middle left image shows a case where a circle has been added, and the right image shows a case where a diamond has also been added. The bottom left image shows a diamond, and the right image shows the voxel distribution when expanded horizontally.

となり、円形の Voxel_map のデータの並び方は、

$$[00 \cdots 0100 \cdots 00 \cdots 00].$$

である。さらに、ひし形のデータの並べ方を数式にすると、

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum \sum \text{Voxel_map}[x][y][z] = 02. \text{ ひし形}$$

となり、ひし形を含めた Voxel_map のデータの並び方は、

$$[00 \cdots 0102 \cdots 02 \cdots 00].$$

となる。また、構造体の拡大・縮小も容易である。Voxel_map の配列を以下のように定義すると、

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum \sum \text{Voxel_map}[x][y][z] = 02.$$

X 軸方向に α 倍拡大したい場合は、

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{\alpha=1}^{\alpha} \sum \sum \text{Voxel_map}[x \times \alpha][y][z] = 02.$$

とすれば、Voxel_map のデータの並び方は、

$$[00 \cdots 0200 \cdots 00 \cdots 00].$$

から

$$[00 \cdots 0202 \cdots 02 \cdots 00].$$

へと指数を00から02に置き換えるだけで構造体の拡大・縮小がおこなえる。単純な整数値を上書きするだけで Voxel 操作ができる。

4. PNG ファイル形式への変換

簡単な手順として、Voxel_map[x][y][z]の指数と RGB の色指定を1対1対応させて、PNG ファイルに変換すればよい。既存のヘッダーファイルを利用すれば簡単に変換コードを作成できる。多数の PNG ファイルの入ったホルダを GrabCAD にインポートさせ、色と材料を再度指定して内容を確認後、3D 造形させればよい。例えば、Stratasys 社 J850 の分解能は、X 軸 600DPI、Y 軸 300DPI、積層ピッチ $14 \mu\text{m}$ または $27 \mu\text{m}$ である。PNG ファイル作成時も上記分解能に合わせて作成させなければならない。また、最大 6 種類の材料を指定することができる¹⁰⁾。なお、X、Y 軸の分解能が違うために FAV 上の真円は、PNG ファイルでは楕円の形状をとる。

Fig.5 左上は、チェス駒の FAV データは VoxFAV⁸⁾ を使って表示させた。上左図のチェス駒の FAV データ⁸⁾ から PNG ファイルへ変換する場合、上記分解能に合わせて Voxel を細分割しなければならない(子 Voxel 化)。チェス駒の空間分割数は $131 \times 131 \times 321$ である。 50mm の立方体に造形しようとする 625×625 ドット (Voxel) の PNG を 3570 ファイル ($14 \mu\text{m}$ ピッチ) 生成させる必要がある。Fig.5 右上は、FAV データから PNG ファイルに変換したものの一部を表示させた(チェス駒底)。

物理量などから FAV データ経由で PNG ファイルへ変換する場合、例えば 32 分割の立方体の中に密度の大きさに合わせて整数値を割り当て、FAV データ化を行う。32 から 100 分割の立方体に子 Voxel 化を行う。八面体や球など幾何学的構造体と色・大きさを指定して、再度指数を割り当てる。チェス駒の時と同様に、 $100 \times 100 \times 100$ の Voxel から 625×625 ドットの PNG を 3570 ファイル ($14 \mu\text{m}$ ピッチ) 生成させる。

Fig.5 下左図は、高速多重局展開^{9),13)}で計算した球状の一様電子密度分布図^{9),11),12)}である。その物理量を FAV データ化して、中心部水平一層分を切り出して、PNG ファイルに変換したものが図 5. 下右図である。球全体を 50mm の大きさに指定、ドットは八面体で対角線の長さを $320\ \mu\text{m}$ とした。

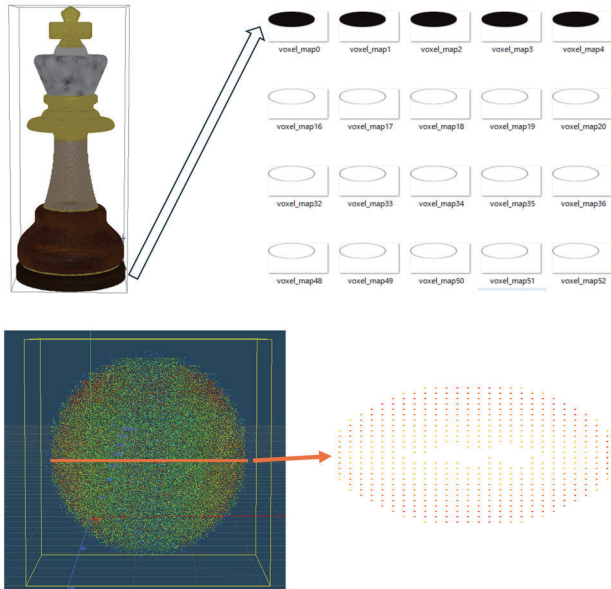


Fig.5 Structures or physical quantities^{9),11),12)} vs PNG files.

5. まとめ・今後

Voxel ファイル形式 FAV から PNG ファイルへ変換して、STL ファイルを介さずにカラーの3D 造形する方法の要点を示した。すでに公開されている FAV データや計算した物理量を FAV 経由で PNG ファイルに変換する実例も示すことができた。物理量のデータ処理だけでなく、実際に3D 造形する際は FAV の階層構造を利用する必要性も示した。

今後、データ処理容量が大きくなるため、FAV-PNG 変換コンバータの並列化¹³⁾を検討中である。

FAV を利用する場合は、最初に文献 4 で勉強し、文献 2 を辞書代わりにコード化することをお勧めする。また、STL-FAV 変換や自作コードで作成した FAV ファイルの動作確認は、VoxFab⁸⁾で行える。チェス駒などに対応できる、機能を限定した FAV-PNG 変換コンバータ用 EXE ファイルの無料配布を検討中である。

6. 謝辞

本発表にあたって、著者の一人(JY)は日ごろから東京

大学物性研究所の主に理論系の皆様にお世話になっています。ボクセル型ファイルフォーマット FAV について、田中浩也・藤井雅彦(慶應義塾大学)、常盤拓司(北海道大学)、高橋智也(富士フイルムビジネスイノベーション)、ファブ地球社会創造拠点(科学技術振興機構、センターオブイノベーション(COI)プログラム)及びファブ地球社会コンソーシアムの方々からいろいろとご助言を賜っています。丸紅 I-DIGIO ホールディングス株式会社には GrabCAD を利用させていただきました。日本画像学会、公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団には、一連の研究について大きな励ましをいただきました。この場をお借りして、皆様には感謝申し上げます。

参考文献

1. J.Yamazaki and H.Kouta, “Visualization of physical quantities in space using Additive Manufacturing and future application of Voxel-based 3D Data Format FAV”, Journal of the Imaging Society of Japan, Imaging Today 240, vol.58 No.4, 397–405, 2019.
2. “Specification of FAV format for 3D models”, JIS B 9442, 2019.
3. T.Takahashi, M.Fujii, H.Tanaka, “3D Data processing in the age of 4D Printing ? Utilizing the Voxel format “FAV””, Journal of the Imaging Society of Japan, Imaging Today 240, vol.58 No.4, 389–396, 2019[in Japanese].
4. The Image of society of Japan, Technology of Digital Printer, TDUpres, 2024[in Japanese].
5. https://www.fujifilm.com/fb/company/technical/production/solution_service/fav, (accessed 2025-08-18).
6. [HP Multi Jet Fusion テクノロジー | 日本 HP](#), (accessed 2024-09-12).
7. [ボクセル情報処理システム研究チーム | 理化学研究所バトンゾーン研究推進プログラム \(BZP\)](#), (accessed 2025-08-18).
8. <https://fab.sfc.keio.ac.jp/voxfab.zip>, (accessed 2025-08-18).
9. J.Yamazaki and O.Mizuno, “Fast multipole expansion and voxel-based representation of physical quantities”, Conference on 4D and Functional Fabrication 2024, 2024.
10. [GrabCAD Making Additive Manufacturing at Scale Possible](#), (accessed 2025-08-18).
11. tetraface Inc, Physiqs, 2023, <https://tetraface.co.jp/jp/physiqs/>, (accessed 2024-08-28).
12. J.Yamazaki et.al, Patent number, 7074344 (JP) [in Japanese], 011214008 (US), 11201903186V(SG).
13. M.Geshi edit, “The Art of High Performance Computing for Computational Science”, Vol. 1&2, Springer Nature, 2019.

材料押出法におけるカテナリー構造を有する 弾性構造体の設計手法

A design method for elastic structures with catenary structures in material extrusion.

中原 稜将¹, 木内 俊克²

Ryosuke NAKAHARA¹, Toshikatsu KIUCHI²

¹京都工芸繊維大学大学院, ²京都工芸繊維大学

¹Kyoto Institute of Technology, Graduate School, ²Kyoto Institute of Technology

【要約】

建築やプロダクト分野における大規模な 3D プリントにおいては、最小限の材料で効率的に体積を充填しつつ、自立可能な剛性と適度な弾性の両立がしばしば求められる。本研究は、熔融した樹脂を垂らして形成するカテナリーのグリッドを積層する新たな造形手法を提案するものである。この手法は、弾性構造であるオーゼティックパターンに着想を得て、造形上の制約から縦方向の連結材を省略し、横方向の層のみで全体の弾性挙動を制御する。本論文では、物理的な検証に先立つ仮設立案として、①射出条件の制御による安定したカテナリー成形、②ユニット間のインターロックによる接合、③ノズル径や密度といったパラメーター制御による弾性の調整、という3つの仮説を提示し、3D モデル上での分析によりその実現可能性を予測する。今後はこれらの仮説の物理的な検証を進め、最終的には椅子など実スケールでの応用を目指す。

キーワード: 3D プリンティング、ツールパス、カテナリー、弾性構造、パラメトリックデザイン

【Abstract】

This research introduces a novel 3D printing method for architecture and furniture to achieve both rigidity and elasticity with minimal material. We propose layering grids of catenaries formed from molten resin. Inspired by auxetic structures, this technique uses only horizontal layers to control elasticity, bypassing common fabrication constraints. We hypothesize that stable formation, interlocking joints, and tunable elasticity are achievable by controlling parameters like extrusion settings and density. This paper presents these hypotheses, supported by 3D model analysis, in advance of physical testing for full-scale applications like chairs.

Keywords: 3D printing, toolpath, catenary, elastic structure, parametric design

1. 研究背景

積層造形 (Additive Manufacturing, AM) 技術は、建築、家具、プロダクトといった分野において、従来の製造上の制約から解放された自由な形態創出を可能にする手法として、その適用範囲を拡大している。特に、安価な樹脂ペレットを直接材料として利用する熔融粒状製造 (FGF) は、大型構造物の高速造形に適しており、実用化の報告が増加している。¹⁾ これらの分野では、大規模なアウトプットを短納期で出力することが求められることが多く、高い体積生産性と材料効率の両立が不可欠である。この要求に応えるため、構造的安定性を有する多孔質構造を、とりわけ、材料押出方式に適した周期的な 3 次元のユニットセルに基づくかたちで実現することが重要となる。

また、積層造形技術の大型化に伴う技術的要請は複数存在する。第一の要請は、材料使用量と構造物の質量増加の低減である。大型造形物は一般に大量の材料を要し、コストの増大を招くだけでなく、輸送や設置といったロジスティクス上の制約要因となる²⁾ ことから、全般に軽量化が求められる。第二の要請は、ユニットセルの幾何学構造の操作による、剛性や弾性といった構造

特性の制御である。たとえば、建築内装の仕上げ面や家具などは、自重や荷重を支えるための高い剛性が求められる一方、人体との接触や機能性を考慮した適度な弾性を同時に実現することが求められる場合などに同要請が顕在化する。従来、積層造形における剛性制御はインフィル密度の調整により実現可能であることが知られているが、意図した弾性を発現させるための制御設計に対する自由度は限定的であった。³⁾ 例として、Auxetic Pattern に代表される、力学的メタマテリアルや 4DPrinting の事例は、ミクロなスケールにおいて、優れた変形機能を有する構造を提示している。⁴⁾ 一方で、これらを高い材料効率と共に大型構造物へスケールアップする試みは依然として発展途上にある。材料使用量を抑制しつつ大規模な空間を充填可能で、かつその構造自体がマクロな弾性制御に寄与するような周期構造の設計論は、未だ十分に確立されていない。しかし、このような背景のもとでも、積層造形において気積を効率よく充填した先行事例として、FGF 方式を用いてワイヤー状のカテナリーを非支持空間に造形し、軽量の空間の仕切りとして利用する先行事例も存在する。⁵⁾

2. 研究目的

本研究では、熱溶融させた樹脂を非支持空間へ押し出し、カタナリー状のパスを形成するプロセスを用いる。これを、二次元的に配列し厚みのある格子状の単位層を構成し、それをさらに鉛直方向に積層することで、気積を効率的に充填する三次元的な多孔質構造を構築する手法を提案する。

本研究で検証する主要課題は、以下の3点に集約する。

1. 押出温度、押出量、およびヘッド移動速度といった造形パラメーターが、カタナリーの幾何学的形状出力の安定性に及ぼす影響を明らかにする
2. 本手法が有する層ごとの造形を分離して行う非連続な積層造形プロセスにおいて、層間の構造的連続性を確保するため、乾式の機械的接合を設計する
3. カテナリーの高さ、格子ピッチ、ノズル径、積層密度といった設計パラメーターと、それにより構築される三次元構造について、パラメトリックなコントロールによる、三次元構造の弾性との関係を明らかにする

3. 研究手法

本研究で提案する弾性構造の設計思想は、Auxetic Pattern に着想を得ている。Auxetic Pattern とは、引張力に対して断面厚さが増加する、いわゆる負のポアソン比を示す構造体の総称である。Auxetic Pattern は、主要な弾性応答を担う水平方向の構造要素、それらを連結する垂直方向の線材から構成されると解釈できる。このうち材料押出法においては、水平方向の構造要素が、非平面積層技術などによって造形が可能である。しかし後者のような、細長い垂直線材に関しては、材料押出法の性質上造形が困難である。そこで本研究では、この材料押出法に内在する本質的な制約に着目し、オーゼティック構造の概念を応用しつつ、その構成要素である垂直方向の連結部材を排除する。これにより、水平方向の層状構造のみを用いて、構造全体の弾力学的な力学特性を制御する新たな設計アプローチを提案する。

提案手法の実現性を検証するためには、最終的に実際の積層造形試作による物理的な実験による検証が必須となる。しかし本論文では、その前段となる仮説立案とその検証までを射程とする。研究目的で提示した本研究の主要課題に対応し、以下に3つの仮説を提示し、その妥当性を設計モデルに基づき考察する。

1. 押出量とヘッド移動速度との関係性によりカタナリーのプロポーションを制御しつつ、その形状に応じて押出温度を最適化することにより、押出中の樹脂の破断を回避し、安定した形状造形を可能とする

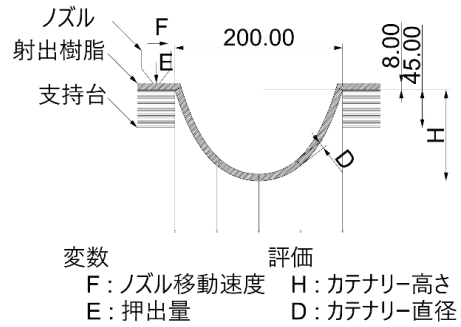


Fig. 1. Cross-sectional diagram of the experimental plan for measuring catenary height and contact wire thickness

2. 層間の接合は、金物等追加の部品を用いずとも、カタナリー状パスで構成される格子パターンの平面的な網目パターンによって、上部ユニットが下部ユニットにインターロックする安定した接合を担保する

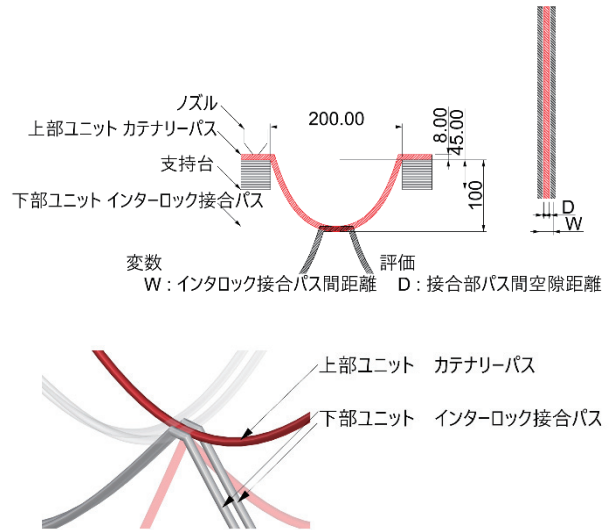
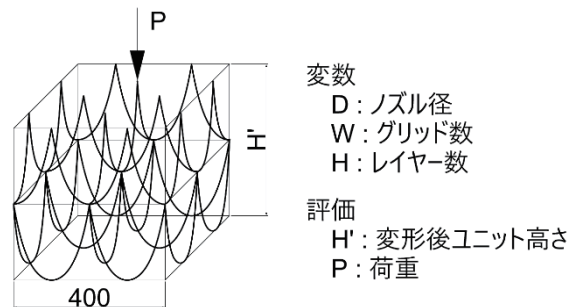


Fig. 2. Experimental plan for measuring the gap in the interlocking joint (Top left: Cross-sectional view, Top right: Plan view, Bottom: Isometric view)

3. カテナリーのプロポーション、格子ピッチ、ノズル径、積層密度といった設計パラメーターをパラメトリックに変化させることで、さまざまな構造体の弾性挙動を意図通りに制御可能とする



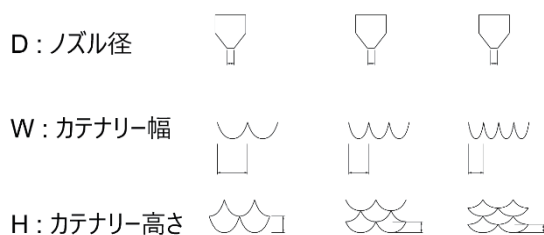


Fig. 3. Experimental plan for measuring load and the vertical deformation height of the unit.

4. 仮説検証

本研究の包括的な検証においては、仮説①、仮説②の物理的な実験もふまえた上で、仮説③の試験片を作成し、物理的な力学特性を評価することが不可欠である。しかし本論では、仮に仮説①、仮説②が理想的に成立し、設計通りの幾何学的構造が実現可能であった場合、仮説③で示した構造体に、どのような弾性挙動が期待できるかを、3次元CADモデルを用いた解析を通じて検証することを、仮説立案段階での簡易的な検証とする。以下、各仮説に対して想定される結果と、本論文内での検証結果について記述する。

1. 経路を移動する間にノズルから押し出される樹脂の総体積と、指定された経路長を持つカタナリーの体積との一致が、樹脂の途切れが発生しない条件と仮定し、3DCAD上で幾何学モデルを作成した。このモデルに基づき、主要なパラメータの影響を以下のように予測する。第一に、ヘッド移動速度について、速度はカタナリーのたるみ量に直接影響し、速度が過剰な場合は弦長の短い浅い形状が、不十分な場合は熔融樹脂が自重に抗しきれず破断すると考えられる。第二に、押出量はフィラメント径を決定する主要因であり、少量の場合はノズル先端からの張力に引かれて破断し、過大な場合は同様に自重による破断に至ると予測される。これらのヘッド移動速度と押出量の間にあるトレードオフの関係から、安定したカタナリーを形成するためには、最適な速度と吐出量が存在すると想定される。本研究では、理想的に樹脂がカタナリーを形成する条件を想定したため、実際の物理実験ではモデル形状が再現される押出量とヘッド移動速度とのパラメータの調整が必要である。
2. 下部ユニットの2本の平行なパスで、上部ユニットの1本のカタナリーパスを両側から挟み込むインターロック機構を採用した。さらに、この接合方向を層ごとに90度方向を交差させることで、構造全体として等方的な剛性を確保するモデルを構築した。本幾何学的モデルでは、理想条件としてパスの径がノズル径と等しいと仮定しているが、実際の成形プロセスでは変動が避けられない。このパスの径の変動は、インターロック部のクリアランスを左右し、接

合安定性に影響を及ぼす。そのため、仮説1の検証で得られる実測のフィラメント径に応じて、インターロック部の幾何学形状を即座に更新できるパラメトリック設計モデルを構築した。これにより、理論と実験結果とを反映可能な設計ワークフローを確立する。

3. 構造体の強度と弾性を決定する要因を分析する。具体的には、ノズル径・カタナリー幅・カタナリー高さの3つの変数が要因であると仮説を立て、それぞれの数値を変化させたモデルを策定する。各パラメーターごとのモデルに対して、上から60kg分(588.4N)の積載荷重を構造体上部に均等に与え、弾性変形の収縮後の高さ寸法を検証する。構造体モデルの接地面には、Z方向のみを拘束し、XY方向の移動は自由とするローラー支点を設定した。検証にあたっては、FEM解析ソフト、Intact Simulation⁶によってパラメーターと結果の関係を把握し、構造的に脆弱な箇所を可視化することで、今後の物理実験を効率的に進めるための指針とする。

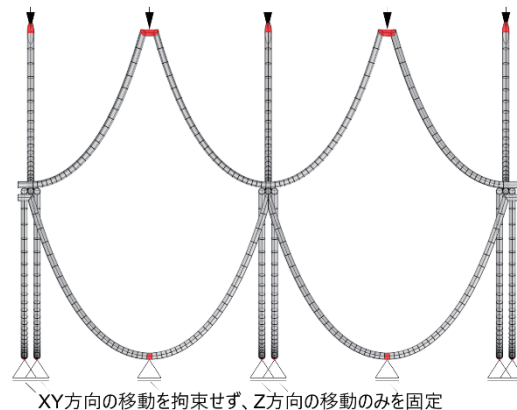


Fig. 4. Support and Load Conditions for the Simulation Model

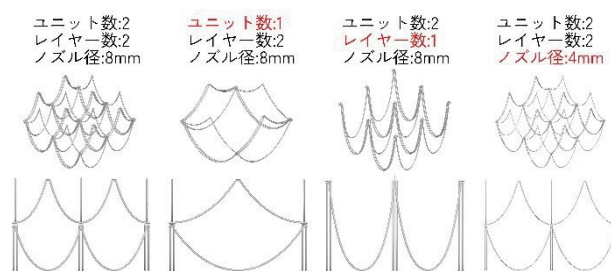


Fig. 5. Effect of Various Parameters (Number of Units, Number of Layers, Nozzle Diameter) on Model Geometry

検証によって得られた各条件下での構造体の伸びをTable 1.に示す。考察として、まず、グリッド数の増加に伴い構造体の沈み込みが減少し、剛性が向上する傾向が確認された。次に、レイヤー数を増やすと、強度が低下する一方で、より弾性的な挙動を示すことが示唆された。ノズル径の変更についてもノズル径の数値を増やすと、強度が向上する傾向が確認された。また、応力解析の結果、接合部および接地面として

機能するカテナリー下部に応力集中が見られ、構造上の弱点となる可能性が示された。この問題への対策として、物理モデルの製作段階で接合部の吐出量を増やし、部材の断面積を局所的に増加させることが有効な手段となり得ると考えられる。

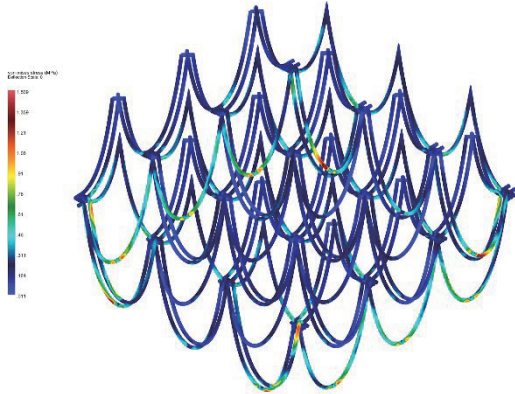


Fig. 6. An Illustrative Example of Model Deformation(3 units, 2 layers, and 8mm nozzle diameter.)

Table 1. Comparison of Deformation Magnitudes for Various Parameters

グリッド数	レイヤー数	ノズル径(mm)	H'/H
1*1	2	8	0.8733
2*2	2	8	0.9938
3*3	2	8	0.9995
4*4	2	8	0.9998
2*2	1	8	0.9976
2*2	3	8	0.9945
2*2	4	8	0.9747
2*2	2	4	0.9621
2*2	2	12	0.9956
2*2	2	16	0.9989

5. 今後の展望

今後の展望として、第一に物理実験による仮説検証の計画を述べ、第二に応用展開の可能性について述べる。本研究で提案した設計手法の有効性を実証するため、以下の物理実験を計画している。

1. カテナリー形状の安定造形のための、造形パラメーターの最適化。押出温度、押出量、ヘッド移動速度を系統的に変化させ、安定してカテナリー形状が造形可能なパラメーターを特定する。
2. インターロック式層間接合部の構造的妥当性の検証。物理実験 1 で最適化された造形パラメーターを用いて構造体を作成し、設計したインターロック接合部のはめ込み精度を検証する。接合部のクリアランスを実測し、層間の構造的安定性が担保されているかを評価する。

3. 三次元構造体の弾性挙動の物理的評価。カテナリーの高さや格子ピッチといった設計パラメーターを変化させた複数の試験片を作成する。各試験片に対して、積載荷重試験を実施し、荷重と高さ変位の関係を実測することで、構造全体の弾性や耐荷重性能を明らかにする。実測データを FEM 解析の結果と比較検討し、シミュレーションモデルの妥当性を検証するとともに、設計理論の精度を向上させる。

本研究の応用について、背景でも述べた建築内装・什器のスケールでの応用について検証を予定している。具体的には、大型の造形が可能な FGF(熔融粒状製造)方式の 3D プリンターを用いて、高さ 400mm 程度で、水平方向に広がりのあるベンチの制作を行う。検証項目としては、以下を計画。

1. 人が座れるだけの耐荷重の計測
2. 突起物を丸め込む造形パス設計
3. 衣服の引っ掛かり等がなく、座面の機能を果たす天面部分の設計
4. 部分的に弾性が異なる構造の設計
5. 人体形状に沿った部分的に凹凸のある全体形状の設計

参考文献

1. Romani, Alessia and Levi, Marinella, 「Large-Format Material Extrusion Additive Manufacturing for Circular Economy Practices: A Focus on Product Applications with Materials from Recycled Plastics and Biomass Waste」 Sustainability, Vol. 16, 2024 年 9 月
2. Umer, M. H., Muttey-ur-Rehman, Ali, S., Raza, A., Muzammil, L., Ijaz, M. S., Khan, M. B., & Zafar, M. Q. "Significance of Infill Density on Mechanical Performance in Fused Deposition Modeling". MATEC Web of Conferences, 398, 01030, 2024.
3. Dakhil, G. Y., Salih, R. M., & Hameed, A. M. (2022). The influence of infill pattern and infill density on the (tensile, flexural and impact) strength of 3D printed polymers. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2660, No. 1, p. 020109). AIP Publishing LLC.
4. Nature Architects, 「(1)現代の製造業にメタマテリアルが必要な理由」, Nature Architects, 2022 年 8 月 8 日, <https://nature-architects.com/blog/657/>, (閲覧日: 2025 年 9 月 10 日)
5. 木下里奈, 「Catenary Printing: 樹脂が織りなす揺れる曲面構造表現」, 慶應義塾大学 環境情報学部 学士論文, 2021.
6. Intact Solutions, Inc. 2024. Intact.Simulation for Rhino Grasshopper Build V2025.08.13_2.2.4. FEA simulation plugin for Rhino/Grasshopper.

3D-Printed Adjustable Thoracolumbar Brace Based on Customized Body Measurements, Featuring Front-to-Back Donning, Using a Parametric and Web-Based Design Approach

簡愷廷(Kai Ting Chien) , 李建佑(Jian-You Li)

Institute of Applied Arts, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan

【Abstract】

We introduced a measurement-driven, parametric workflow for a 3D-printed lumbar brace aimed at faster customization and easier use in routine practice. Instead of full-body 3D scanning, the brace is generated from standardized measurements obtained from routine lumbar radiographs (anteroposterior and lateral) and a single waist circumference used to correct radiographic magnification. Three elliptical cross-sections—near the subxiphoid/lower rib margin ($\approx$ T12–L1), the waist ($\approx$ L4–L5), and a supra-trochanteric line—are reconstructed and lofted in Grasshopper® to create a patient-adapted torso surface. This brace features a posterior opening that enables front-to-back wrapping and facilitates donning in bed; elastic cut-outs provide mobility within the 3D-printed structure, while a forward-pull Velcro strap enhances lumbar lordosis and permits fine sagittal alignment adjustment within a three-point support scheme. We implemented the workflow on ShapeDiver® to enable web-based model generation without launching Grasshopper®. For prototyping, we selected PET-G using fused deposition modeling (FDM) for its strength, toughness, and elongation at break. This radiograph-informed parametric approach may streamline patient-adapted brace production and facilitate wider clinical adoption.

Keywords: Lumbar brace, Parametric design, Radiograph-based measurement, Sagittal alignment adjustment

1. Introduction

Low back pain is highly prevalent; up to 84% of individuals experience at least one episode during their lifetime. Across the continuum from conservative care to invasive procedures, lumbar orthoses are frequently prescribed. In acute and subacute low back pain, short-term brace use can improve functional disability scores, reduce pain intensity, and decrease the need for analgesics [1,2]. Among patients with osteoporosis or vertebral compression fractures, several studies suggest short-term improvements in segmental stability and a lower risk of incident fractures with bracing [3]. Although evidence supporting routine postoperative bracing is limited, it remains common practice, reportedly used after more than one-third of lumbar procedures worldwide [4]. Despite their clinical utility, high-support braces are often bulky, “one-size-fits-most,” and difficult to don—particularly in bed—while offering suboptimal control of lumbar flexion. Patient-specific 3D-printed braces based on full-body scanning have been explored, but routine clinical use is hindered by scanning time, risk of incomplete capture, the need for tight garments or disrobing, and limited availability of dedicated scanning services [6,7]. We therefore asked whether a measurement-driven, parametric workflow—leveraging readily available radiographs—could produce patient-adapted braces more quickly while addressing these usability limitations [2].

2. Concept

Based on the limitations of conventional lumbar braces, our design sought to translate parametric modeling into a practical 3D-printed orthosis workflow. The goals were to simplify measurement input by relying on readily available clinical imaging, to improve donning by introducing a front-to-back wrapping method, and to incorporate elastic 3D printing structures that provide limited mobility without reducing spinal support. The brace was designed to reduce bulk while reinforcing key regions to enhance resistance against lumbar flexion. In addition, a novel adjustment mechanism was integrated to allow patients to fine-tune their lumbar lordosis, thereby improving posture control. Finally, the workflow aimed to be user-friendly, enabling clinicians to rapidly generate customized braces online without advanced CAD operation.

3. Results

We developed a parametric modeling workflow that replaces full-body 3D scanning with a small set of standardized measurements. Using routine lumbar radiographs, transverse widths were obtained from the anteroposterior (AP) view—commonly a KUB-style AP film—at three levels: (i) near the subxiphoid/lower rib margin ($\approx$ T12–L1), (ii) the waist ($\approx$ L4–L5), and (iii) the supra-acetabular line at the dome of the acetabulum (Figure 1). Corresponding depths were measured on the lateral view at the same three levels (Figure 2). These widths and depths, together with inter-section distances,

were reconstructed as three elliptical cross-sections and lofted in Grasshopper® to generate the torso surface, corrected by isotropic scaling to the patient's actual waist circumference. Biomechanical studies confirm that the lumbar spine has the greatest range of motion in flexion/extension when unsupported [5]. Therefore, we applied a three-point fixation concept to maximize motion restriction with minimal bulk. The brace adopts a monocoque shell with a posterior opening for front-to-back wrapping, making it possible for patients—especially elderly individuals—to don the brace while lying in bed. Elastic cut-outs were integrated bilaterally to preserve limited mobility, and paired buckle systems were combined with forward-pull Velcro straps to enable patients to actively adjust their lumbar lordosis (Figure 3). For prototyping, we selected PET-G via FDM printing, owing to its combination of strength, toughness, and elongation at break, which allowed repeated opening and tightening without brittle failure [8]. Compared with PLA, ABS, and PE/PP, PET-G demonstrated more favorable properties for this application. The PET-G prototype maintained integrity under forceful tightening while enabling user-controlled increases in lordosis. Finally, because the modeling workflow is entirely parametric, it was deployed on ShapeDiver®, allowing clinicians to rapidly input patient data and generate printable models without launching Grasshopper® (Figure 4).

4. Conclusion

This measurement-based, parametric 3D-printing workflow delivers a lighter, more breathable, and easier-to-don lumbar brace while preserving—and potentially enhancing—functional support through three-point mechanics and adjustable lordosis control. Web-based customization lowers barriers to adoption in routine clinics. Our current efforts focus on integrating clinical use and evaluation, particularly assessing fit, ease and speed of donning, model generation time compared with 3D scanning, and the durability of elastic 3D-printed cut-out joints [9].

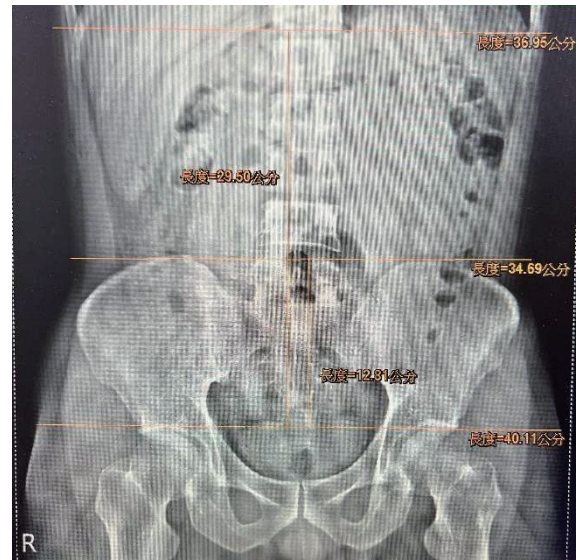


Fig. 1. AP lumbar radiograph (KUB film) showing transverse width measurements at (i) T12–L1, (ii) L4–L5, and (iii) the supra-acetabular line.



Fig. 2. Lateral lumbar radiograph showing measurement of the corresponding anteroposterior depths for the same three cross-sections.

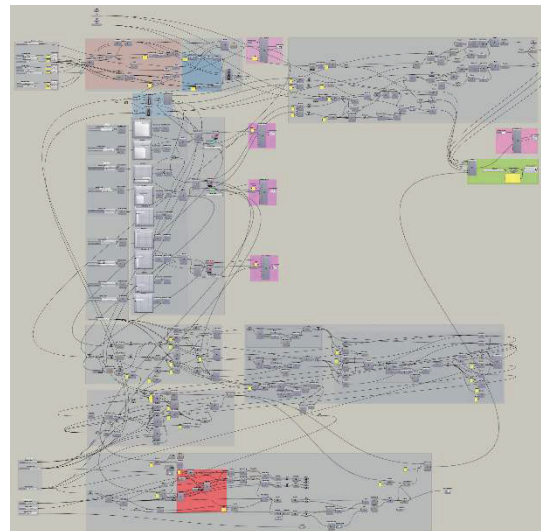


Fig. 3. Grasshopper® parametric workflow for brace generation: input of clinical measurements, reconstruction of three elliptical cross-sections, lofting of the torso surface, magnification correction via waist-based scaling, and construction of a three-point support structure on this surface

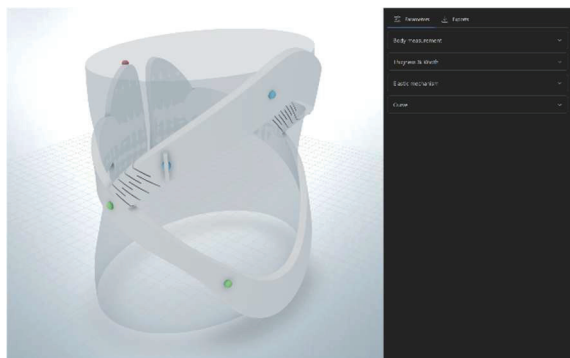


Fig. 4. ShapeDiver® interface demonstrating real-time generation of the patient-adapted parametric model from clinical inputs, enabling web-based customization without launching Grasshopper®.

Reference

- Landauer F, Trieb K. An indication-based concept for stepwise spinal orthosis in low back pain according to the current literature. *J Clin Med*. 2022;11(3):510. doi:10.3390/jcm11030510.
- Hegmann KT, Travis R, Andersson GBJ, et al. Non-invasive and minimally invasive management of low back disorders. *J Occup Environ Med*. 2020;62(3):e111-e138. doi:10.1097/JOM.0000000000001812.
- Newman M, Minns Lowe C, Barker K. Spinal orthoses for vertebral osteoporosis and osteoporotic vertebral fracture: a systematic review. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016;97(6):1013-1025. doi:10.1016/j.apmr.2015.10.108.
- Bogaert L, Van Wambeke P, Thys T, et al. Postoperative bracing after lumbar surgery: a survey amongst spinal surgeons in Belgium. *European Spine Journal*. 2019;28(2):442-449. doi:10.1007/s00586-018-5837-0.
- Panjabi MM, Oxland TR, Yamamoto I, Crisco JJ. Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *J Bone Joint Surg Am*. 1994;76(3):413-424. doi:10.2106/00004623-199403000-00012.
- Hale L, Linley E, Kalaskar DM. A digital workflow for design and fabrication of bespoke orthoses using 3D scanning and 3D printing: a patient-based case study. *Sci Rep*. 2020;10(1):7028. doi:10.1038/s41598-020-63937-1.
- Li J, Zhou G, Xu N, et al. Patient-specific 3D-printed brace for adolescent idiopathic scoliosis: a prospective cohort study. *World Neurosurg*. 2024;189:e69-e79. doi:10.1016/j.wneu.2024.05.165.
- Ronca A, Abbate V, Redaelli DF, et al. A Comparative Study for Material Selection in 3D Printing of Scoliosis Back Brace. *Materials*. 2022;15(16):5724. doi:10.3390/ma15165724.
- Atallah H, Qufabz T, Bakhsh HR, Ferriero G. The current state of 3D-printed orthoses clinical outcomes: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord*. 2025;26(1):822. doi:10.1186/s12891-025-09070-4.

Scan to Renew: A Mobile LiDAR and Generative AI Workflow for Simulating Urban Heritage Alternatives

Meng SUN, Masahiro KINOSHITA

Kyoto Institute of Technology, Design and Architecture Department

【Abstract】

Scan to Renew presents a lightweight workflow integrating mobile LiDAR and generative AI to simulate architectural renewal in urban heritage contexts. Using a smartphone's LiDAR sensor, site specific point clouds are captured and converted into images for AI generation of design alternatives. These are then reconstructed into point clouds and reinserted into the original environment for comparative simulation. Tested in Kyoto's Gion district, the method shifts heritage practice from static preservation toward participatory design exploration. Combining accessibility with visual diversity, the workflow empowers not only architects and historical professionals but also local residents to collaboratively envision and evaluate future interventions. (Fig.1)

Keywords: Mobile LiDAR; Generative AI; Urban Heritage; Point Cloud; Participatory Design

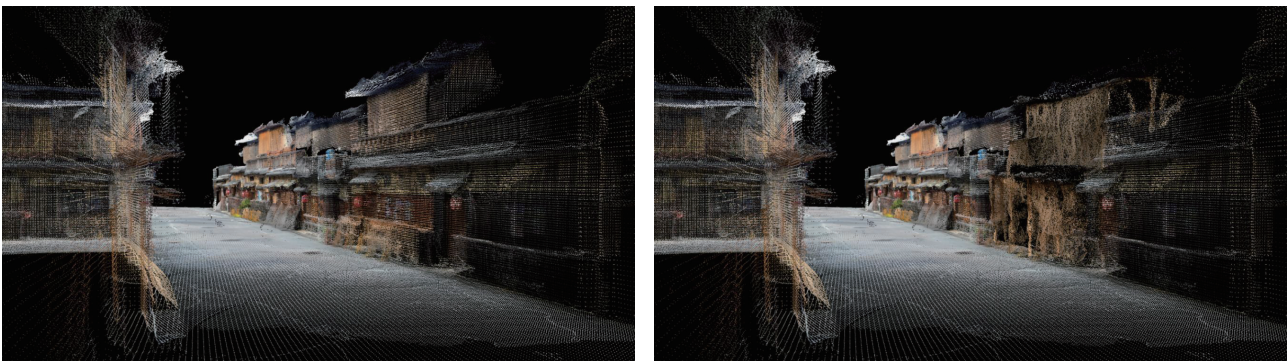


Fig.1. Gion district simulation: original (left) and AI-generated renewal (right)

1. Introduction

In recent years, the rapid advancement of mobile LiDAR technology has opened new opportunities for architectural applications. Equipped on smartphones, LiDAR sensors have transformed the way spatial data can be captured, offering low cost and site specific 3D modeling capabilities. This democratization of scanning makes it possible for architects, researchers, and even non-experts to produce detailed spatial archives without relying on expensive equipment such as high precision 3D laser scanners or drones with high end sensors. Despite these advantages, the use of mobile LiDAR in the domain of architectural design and urban heritage renewal remains underexplored. Current applications tend to emphasize documentation and preservation, while its potential for simulation or participatory design has not been fully realized.

Urban heritage districts present unique challenges for architectural practice. Due to strict regulations and cultural sensitivities, the introduction of new interventions often requires careful negotiation among

architects, historical professionals, policymakers, and local residents. Traditionally, design alternatives in such contexts are communicated through conventional 2D drawings, scale models, or digital rendering models that demand specialized equipment and expertise. These methods are accurate, however pose significant barriers to participatory engagement. For residents without professional training, it is often difficult to grasp the spatial implications of design proposals, limiting opportunities for participation in decision making process.

With recent advancement of mobile LiDAR scanning technology, its integration into heritage documentation and preservation has progressed steadily, enabling low cost, light weight, site specific 3D modeling [1, 2]. However, these works tend to prioritize fidelity and precision, leaving less attention to workflows that support rapid simulation, generative exploration, or participatory design. Some recent research has begun to experiment with AI based reconstruction, demonstrating the ability of generative systems to predict or restore

missing geometries [3, 4]. However, these approaches remain primarily within the realm of object level restoration, and have not been extended to the scale of architectural renewal in urban scale. Particularly in urban heritage districts where renewal designs are strictly regulated, current approach for visualizing architectural proposals typically relies on conventional tools such as drawings, models, or expensive high precision 3D laser scanners, that are either costly or inaccessible to non-experts. Consequently, architects, historical professionals and local residents often lack the means to efficiently simulate or evaluate renewal alternatives in a spatial context.

This research addresses that gap by introducing a lightweight workflow that combines mobile LiDAR scanning with generative AI to simulate architectural renewal alternatives in urban heritage districts. The proposed process begins with capturing point cloud streetscapes using a smartphone's LiDAR sensor, followed by generative AI models that produce multiple design alternatives for specific buildings. These results are embedded back into the original point cloud environment, allowing rapid, spatially consistent simulations of future streetscapes. Unlike traditional approaches that prioritize static recording, this workflow emphasizes dynamic exploration, enabling residents to interact with potential renewal streetscapes in a way more accessible.

The contribution of this research lies in reframing digital heritage practice from an expert driven, preservation focused standard toward a participatory design workflow. By lowering technical barriers and providing a toolset that is both scalable and beginner friendly, this study highlights how emerging technologies can facilitate dialogue among architects, historical professionals, and local residents in culturally sensitive urban heritage contexts. The case study in Kyoto's Gion district demonstrates the feasibility of this approach, offering insights into how generative simulation can enhance community engagement while respecting the historical identity of urban heritage districts.

2. Workflow

The proposed workflow consists of five steps, each integrating existing digital tools into a coherent process for simulating architectural renewal in urban heritage contexts. The workflow is designed to be lightweight, reproducible and accessible for users with limited technical expertise. (Fig.2)

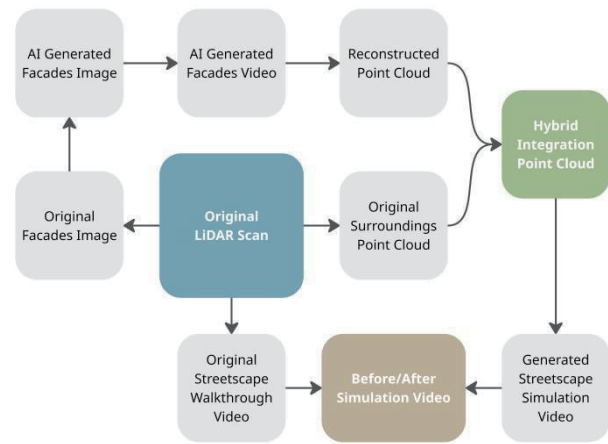


Fig.2. Flow Chart of Scan to Renew

2.1. Mobile LiDAR Scanning Streetscapes were captured using an iPhone Pro equipped with a LiDAR sensor, operated via Scaniverse, an application for real time 3D capture. The scans were exported as point cloud data (.ply format), providing a metrically consistent 3D representation of the urban environment. Compared with high precision 3D laser scanners, the mobile approach offers reduced accuracy but significantly greater accessibility and speed, enabling rapid deployment in complex heritage districts.

2.2. Deriving Streetscape Images and Videos The original point cloud data captured via mobile LiDAR was imported into CloudCompare, an open-source 3D point cloud processing software, to generate orthographic views and perspective frames for AI generation. In addition, walkthrough videos were exported to capture the spatial continuity of the streetscape. This step intentionally reduces the data from 3D to 2D media, sacrificing geometric fidelity but allowing flexible integration with image and video based generative AI tools.



Fig.3. renewal facade generated by Think Diffusion

2.3. Generating Architectural Alternatives Design alternatives for targeted buildings were produced using Think Diffusion, an online platform based on Stable Diffusion. (Fig.3) By applying mask layers to isolate

facades, multiple renewal options were generated while maintaining stylistic coherence with the surrounding heritage context. This step leverages the strengths of AI in rapidly exploring design diversity, producing visual proposals that can be easily understood by both experts and non-experts.

2.4. Video Synthesis & Point Cloud Reconstruction

Selected AI generated images were converted into dynamic facades video using Runway, an online video generation tool, simulating a dynamic experience of the renewed streetscape. These videos were then segmented into frames and imported into Autodesk ReCap Photo, a cloud based platform for photogrammetric processing. (Fig.4) ReCap Photo then reconstructed new point clouds of the altered environment from these frames. Although geometric precision cannot be guaranteed due to the image based origin of the data, the reconstructed models preserve overall spatial consistency, supporting immersive visualization and comparative analysis.



Fig.4. scenes from the AI generated facades video

2.5. Integration of Renewed Streetscapes The newly reconstructed point clouds were inserted back into the original LiDAR scan environment using CloudCompare, resulting in hybrid models that combine real and generative data. (Fig.5) Simulation videos were produced

to compare before and after renewal streetscapes, enabling intuitive evaluation of the design impact. This integrated environment provides a platform for participatory discussions, where architects, heritage professionals, and local residents can collaboratively assess potential interventions.

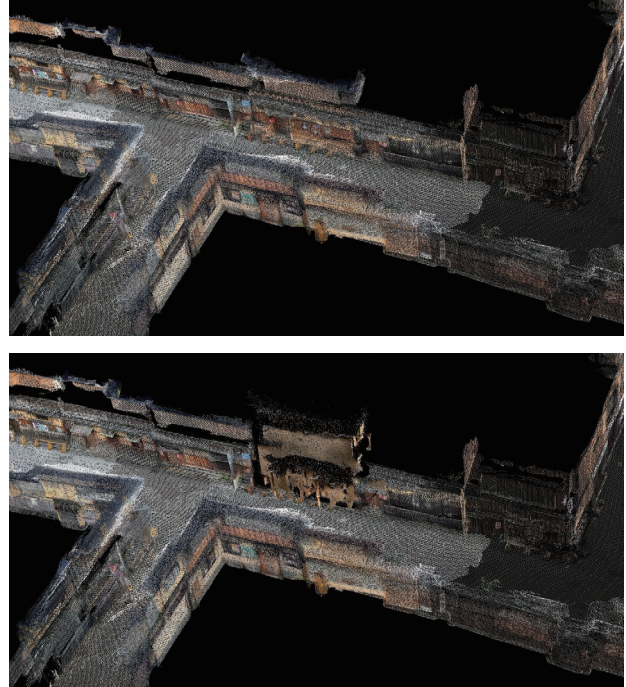


Fig.5. original (upper) and hybrid integration point cloud combining real and generative data (lower)

These five steps together form a workflow that begins with site specific scanning, generates multiple renewal alternatives, and reinserts them into the original environment for simulation and evaluation. While the workflow relies entirely on existing tools, its novelty lies in orchestrating them into a coherent sequence for the challenges of urban heritage renewal.

3. Results and Discussion

The workflow was tested in Kyoto's Gion district, a heritage district renowned for its traditional town houses (Kyo-machiya). One specific building was selected as the subject of renewal, with its existing facade scanned via mobile LiDAR and processed into a point cloud data. This environment was then used as the baseline for generating and simulating alternative designs.

The AI generated multiple facade proposals, ranging from conservative restorations closely aligned with existing urban fabric to more experimental reinterpretations that pushed the boundaries of stylistic coherence. Embedding these designs into the original point cloud environment allowed for immediate

comparison with the surrounding streetscape, highlighting how subtle changes in materiality, scale, or ornamentation could influence the perception of the streetscape.

One key outcome of the workflow is its accessibility. Unlike traditional laser scanning, this process requires only a smartphone, freely available or low cost platforms, ensuring that the process remains highly accessible for either architects or users without specialized technical backgrounds. This lowers the barrier for participatory engagement, making it feasible for residents to visualize and assess proposals more intuitively.

However, limitation remains. The conversion of point cloud data into images and videos introduces a loss of geometric fidelity. When these media are used as the basis for generating new point clouds, discrepancies in scale and proportion can arise. While the overall spatial consistency of the environment is preserved, precise measurements cannot be guaranteed. For design evaluation that requires high levels of geometric accuracy, professional grade scanning and modeling would still be necessary. Nevertheless, the trade off between precision and accessibility is acceptable in early stage design discussions, where the goal is to stimulate dialogue rather than produce final construction documents.

Despite the limitation, the prototype demonstrates a novel way of engaging with urban heritage renewal. By reframing digital heritage from a static archival practice to a dynamic and participatory process, the workflow opens new avenues for collaboration. It aligns with broader efforts to democratize design, allowing multiple voices including architects, historical professionals, policymakers and local residents to contribute to shaping the future of urban heritage districts.

4. Conclusion

By bridging mobile LiDAR, point cloud simulation and generative AI, this research offers a replicable, low barrier workflow for re-imagining heritage futures, contextually, collaboratively and creatively.

The workflow was tested in Kyoto's Gion district, demonstrating how rapid and accessible tools can generate multiple design alternatives while respecting the identity of heritage contexts. By emphasizing participatory engagement, the approach enhances the democratic dimension of design practice, offering a

platform where diverse communities or individuals can contribute to decision making.

Future research will focus on expanding this workflow through integration with XR technologies, enabling immersive on site evaluation of design proposals. This direction will further enhance accessibility and participation, strengthening the role of digital tools in protection and revitalization of urban heritage districts.

Reference

1. A. Spreafico, F. Chiabrando, L. T. Losè, F. G. Tonolo, "The Ipad Pro Built-In Lidar Sensor: 3d Rapid Mapping Tests And Quality Assessment", *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences XLIII* (2021), pp.63-69.
2. M.J. Smith, G. Priestnall, F. Asal, "Combining LIDAR and photogrammetry for urban and rural landscape studies", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (2000), pp.44-50.
3. R. Hermoza, I. Sipiran, "3D Reconstruction of Incomplete Archaeological Objects Using a Generative Adversarial Network", *arXiv: 1711.06363 [cs.CV]* (2018).
4. M. Altaweel, A. Khelifi, M.H. Zafar, "Using Generative AI for Reconstructing Cultural Artifacts: Examples Using Roman Coins", *Journal of Computer Applications in Archaeology* 7(1) (2024), pp.301-305.

新工芸について

The Idea of ShinKogei

三田地 博史

Hiroshi MITACHI

新工芸舎

Shinkougeisha

【要約】

ごく普通のデザイン学生だった私は, reprop 黎明期の 3D プリンタに出会い, その使い道を模索するうちに, これは「新しい工芸」であるという確信を持つに至りました. やがて「デザイナー」と名乗ることをやめ, 自らの実践に「新工芸」という名を与え, 新工芸舎としての活動を始めます. 大量生産を象徴する樹脂という素材が, ようやく工芸的な存在へと変化しつつある今, 量産に先立つ計画を担う「デザイナー」という職能のあり方を問い直す必要があると感じています. これは, 明治以降の日本の工芸の変遷と, 戦後デザインの出自を振り返りながら, 「ものをつくる」とはどういうことかを根本から見つめ直し, 再構築する営みでもあります. 分業とシステム化により失われた, 身体と技術の関係性, 創造と労働の結びつき. それらをもう一度, 自分の手と実践を通じて組み立て直そうとする試みなのです.

【Summary】

As he was a very ordinary design student, he encountered 3D printers in the early days of reprop, and as he explored their uses, he became convinced that this was a "new craft. Eventually, he stopped calling himself a 'designer' and gave his own practice the name 'SHINKOGEI' and began operating as 'SHINKOGEISYA'.

At a time when resin, a material that symbolizes mass production, is finally transforming into a craft-like existence, we feel it is necessary to reexamine the role of the 'designer' profession, which is responsible for planning prior to mass production. This is also an activity to fundamentally reconsider and reconstruct what it means to 'making things' by looking back at the transition of Japanese crafts since the Meiji era and the origins of postwar design. The relationship between the body and technology, the connection between creation and labor, which has been lost due to the division of labor and systemization. This is an attempt to reconstruct them once again through the use of one's own hands and practices.

可食サポート材による中空構造食品の 3D 造形実現に向けた検討

Considerations for 3D printing of hollow foods using edible support materials

藤田 生夢, 古川 英光

Ikumu FUJITA, Hidemitsu FURUKAWA

山形大学

Yamagata University

【要約】

食品を材料とした 3D フードプリンティングは、複雑形状や個別化食品の提供が可能で注目されている。スクリー式フードプリンターは高粘度材料に適する一方、自重や流動により中空構造やオーバーハング形状の造形が困難である。本研究では、加熱でゲル化し冷却でゾル化するメチルセルロースを用いた可食サポート材の開発を目指す。サポート材の形状保持性・粘度・限界荷重、中空構造の造形精度を評価した。将来的には、温度応答性という特徴を活用した可食容器や可食アクチュエーターとしての応用も視野に入れ、単なる支持材を超えた「時間軸を設計する可食材料」の実現を目指す。

キーワード: 3D フードプリント, サポート材, メチルセルロース, 中空構造,

【Abstract】

3D food printing using food materials is attracting attention for its ability to produce complex shapes and customized foods. Screw-type food printers are suitable for high-viscosity materials, but it is difficult to create hollow structures and overhang shapes due to their own weight and fluidity. In this study, we aim to develop edible support materials using methylcellulose, which gels when heated and solutes when cooled. The shape retention, viscosity, and load capacity of the support material, as well as the dimensional accuracy of the hollow structure, were evaluated. In the future, we aim to realize “edible materials that design the time axis” that go beyond mere support materials, with applications such as edible containers and edible actuators utilizing the characteristic of temperature responsiveness.

Keywords: 3D food printing, support material, methylcellulose, hollow structure,

1. 緒言

現在、食品を材料とした 3D フードプリンティングは、複雑な形状の造形や食感・栄養・嗜好に応じた個別化食品の提供を可能にする技術として注目を集めている[1][2]。食品製造におけるデジタル化やパーソナライズ化の潮流とも合致し、介護食・医療食・嗜好品など多様な分野での応用が期待されている。特に、積層造形による自由度の高さは、従来の食品加工技術では困難であった立体構造や内部空間を持つ食品設計を可能にする。

なかでもスクリー式フードプリンターは、高粘度の食品材料に対応できる点で優れており、チョコレートやクッキー生地、ペースト状の食品など幅広い材料を安定して吐出できる[3]。しかし、造形時に材料の自重や流動によって形状が崩れやすく、特に中空構造やオーバーハング形状など支持が必要な造形においては、精度低下や失敗の原因となる[4]–[6]。この問題は、食品用 3D プリンティングの応用範囲を制限する要因の一つである。

一般的な樹脂 3D プリンティングでは、不要部分を支えるためにサポート材が用いられ、造形後に除去される。

しかし、食品においては安全性や可食性が求められるため、従来のサポート材をそのまま適用することはできない。さらに、サポート材は造形中に十分な機械的強度を持ちながらも、除去時には容易に分離・溶解できる性質を併せ持つ必要がある。この両立は技術的に難しく、既存研究においても食品専用のサポート材開発は限定的である。

そこで本研究では、食品添加物であるメチルセルロース(Methyl cellulose ,MC)の「加熱によってゲル化し、冷却によってゾル化する」という時間・温度応答性に着目した。この熱ゲル化は、焼成中の高温環境下では材料が固体状に変化して主材料の熱軟化や自重による変形を物理的に支持する。一方で焼成と冷却後には主材料との間に強固な接着層を形成しないため、優れた除去性を発揮することが期待できる。この二つの役割を両立させる「4D プリンティング」の概念を実現するアプローチを Fig.1 に示す。本稿ではメチルセルロースに保形性向上のためのキサンタンガムを配合した可食サポート材を開発し、中空構造食品の造形を通じてその有効性を検証した結果について報告する。

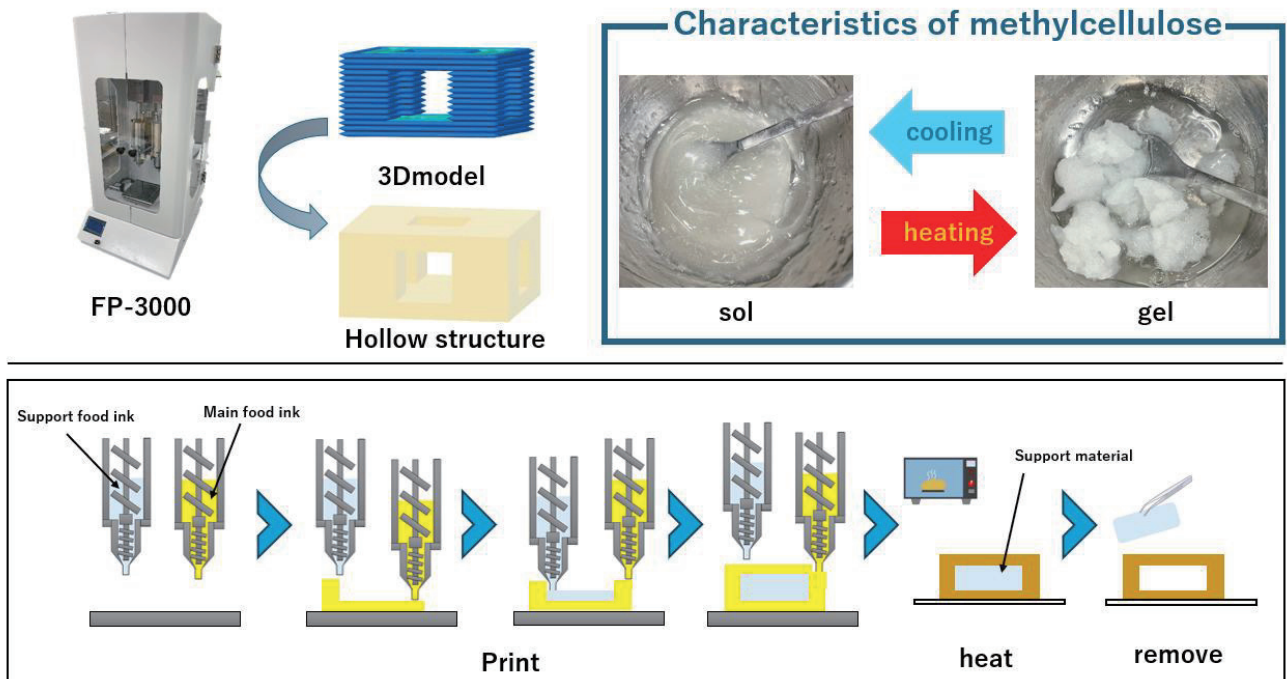


Fig.1 支持と除去による 4D プリンティングのアプローチ

2. 実験

2.1 サポート材料の分量比と形状保持性の調査

本実験では、世紀株式会社製のスクリュー式 3D Food Printer FP-3000 を使用した。サポート材の材料は、水・メチルセルロース H (Unicook)・増粘剤としてキサンタンガム (Xanthan gum, XG; NICHIGA) を使用した。これらの分量比を調節することにより、粘度の異なるサポート材を作成した。開発した水とメチルセルロースとキサンタンガムの比率は水 100[g], MC 2[g] とし XG は 0, 0.5, 1, 1.5, 2[g] とした。作成した試料を FP-3000 に充填させ、吐出した。装置の制御ソフトは Pronterface を使用した。実験条件を以下とする。プリントスピード 250[mm/min], ノズル直径 2[mm], 寸法 30×30×10[mm] の直方体, 造形データを Fig.2 に示す。

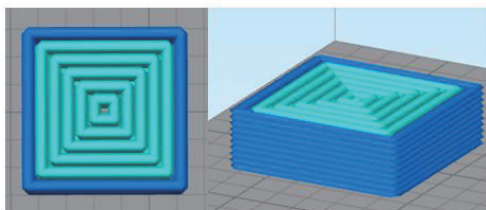


Fig.2.造形データ

2.2 サポート材料の粘度測定

実験で使用するサポート材料は、Anton Paar 社製「MCR-302E」を使用して粘度測定を行った。Table 1 に測定条件を示す。

Table.1.粘度測定の測定条件

せん断速度[1/s]	0.1~1000
固定周波数[Hz]	1
測定温度[°C]	20

2.3 サポート材料の圧縮試験

クリープメータ RE2-33005C (ヤマデン社製) を使用し、サポート材料の上にメインのフードインクを積層する際の機能的限界荷重を測定した。直径 30mm の円板プランジャーを用いて、ロードセル 20N, ひずみ速度 99%, 圧縮速度 1.0mm/s で圧縮試験を実施した。得られた圧縮試験の結果から機能的限界荷重を求めるため、積層精度に影響を与えない許容変形量を定義した。3D フードプリンターの積層ピッチはノズル径の 50% が一般的であるため、ノズル径 2mm に対し積層ピッチを 1.0mm と設定した。造形が失敗するのはサポート材が積層ピッチの半分以上変形した時であると考え、許容変形量を 0.5mm とした。この許容変形量を、ひずみ (ε) に変換するため、以下の式(1)を用いた。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ΔL は許容変形量 (mm), L_0 は試料の初期高さ (mm) を示す。

2.4 サポート材料による中空構造の造形精度

サポート材は、容易に除去できる性質が重要である。サポート材の除去精度を測定し、中空構造として空洞ができているのかを調査した。本実験では、FP-3000 で中空構造を造形した。Fig.3 に中空構造の寸法を示す。メインのフードインクには、米粉、米油、砂糖、全卵を材料とした米粉クッキーを使用した。Table.2 に米粉クッキーの材料の割合を示す。米粉を使用したクッキーは、小麦粉を使用したものに比べて加熱時の膨張が抑えられるためより精密な寸法維持が可能であることが知られている[7]。造形したものは電子オーブンで 180°C 15 分間

加熱した。焼成後の中空構造のクッキーを NAOMi-CT(アールエフ社製)を使用し, CT スキャンを行い, 除去精度を測定した。

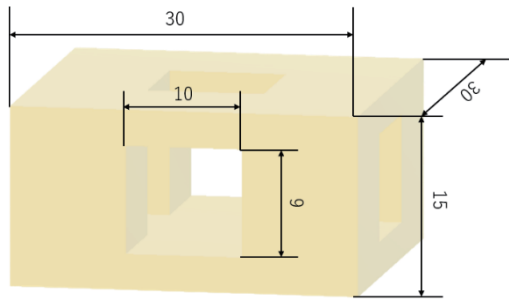


Fig.3.中空構造の寸法

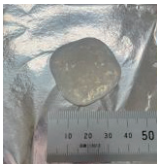
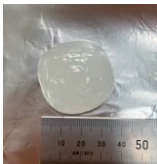
Table.2.メインインクの内容

材料	数量
米粉[g]	100
米油[g]	30
全卵[個]	1
砂糖[g]	30

3. 結果と考察

3.1 サポート材料の分量比と形状保持性の調査

Fig.4 に造形結果を示す。キサンタンガムを多くするほど形状保持力が向上し, 垂れることなく造形データの寸法通りになることがわかる。5 種類全ての分量比では吐出能力が安定していた。キサンタンガムの割合を多くするほどノズル吐出係数を大きくする必要があることがわかった。

水 : MC : XG	100:2:0	100:2:0.5	100:2:1
造形結果			
造形評価	形状保持不可	形状保持不可	形状保持不可

水 : MC : XG	100:2:1.5	100:2:2
造形結果		
造形評価	形状保持可能	形状保持可能

Fig.4.造形結果

Fig.4.造形結果

3.2 サポート材料の粘度測定

レオメータでサポート材料の粘度を測定した。結果を Fig.4 に示す。5 種類全てのサポート材料は, せん断速度を増加させると見かけ粘度が減少した。つまりサポート材料は, 3D フードプリンターのスクリーによって攪拌されることで粘度減少し, フードインクの吐出が可能で

あることを示している。4.1 の結果を踏まえるとキサンタンガムの添加量を変えて粘度を変化させても材料の吐出の出方は変わらないが, 形状保持は変化したことがわかった。これはプリンターのスクリーにより強い力が加わり材料が一時的に流れやすくなるが, 吐出後は力が加からないので粘度による形状保持において大きな変化が現れたと考える。

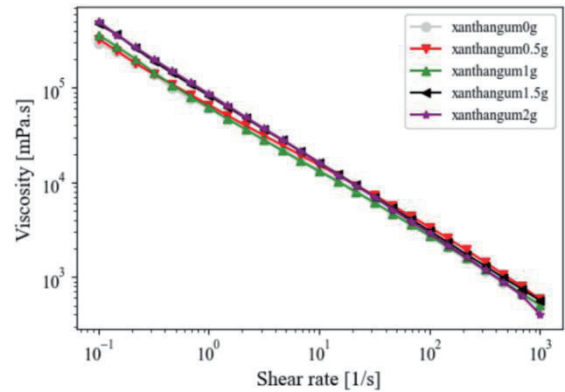


Fig.5.サポート材料のせん断速度-見かけ粘度

3.3 サポート材料の圧縮試験

水とメチルセルロース, キサンタンガムの割合が 100:2:2 のサポート材料で Fig.2 に示してある造形データで 3 つのサンプルを造形し圧縮試験を実施した。3 回の試験の平均結果に基づき, 式(1)で算出した許容変形量におけるひずみ点での荷重を特定するため, 初期ひずみ領域を拡大したグラフを Fig.6 に示す。このグラフから, 機能的限界荷重を算出した。サポート材料が, 積層精度を保ちながら耐えられる機能的限界荷重は 0.035N であった。このことから, メインのフードインクが 0.035N を超えるような大規模な造形や局所的に荷重が集中するような形状は難しい可能性があると考えられる。

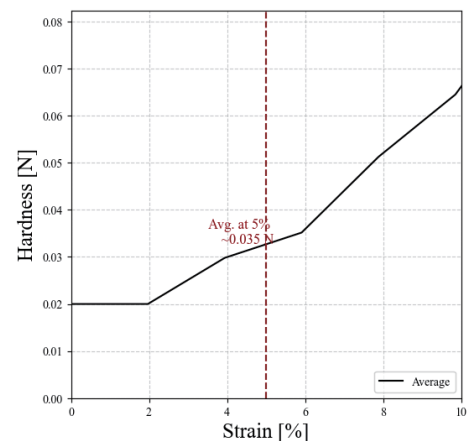


Fig.6.サポート材料の応力-ひずみ線図

3.4 サポート材料による中空構造の造形精度

3D プリント及び焼成後の米粉クッキーの内部構造を非破壊で評価するため, CT スキャンを実施した。造形後のクッキーを Fig.7, 焼成後のクッキーを Fig.8, サポート材除去後の断面図を Fig.9 に示す。Fig.9 から, 内部に空洞が維持された中空構造が形成されていることが確認され, 焼成後にサポート材が構造を破壊することなく除去可能であることが示された。サポート材と接して

いたクッキーの内壁面には、著しい癒着や欠損は見られず、界面には比較的良好に分離されていた。しかし、造形した中空構造と 3D データを比較すると、積層された生地による変形や中空構造の歪みが確認された。これらは大きな形状誤差であり、造形精度の低下を招いた。造形精度の低下の原因としては、焼成過程における生地とサポート材の熱挙動の不一致によるものだと考察する。クッキー生地の粘度が熱によって低下する速度に対し、サポート材の加熱によるゲル化が間に合わなかったか、もしくはゲル化後の強度が軟化した生地の自重を支えるには不十分な可能性がある。これらの課題に対する改善案とし、2 つのアプローチが考えられる。第一にサポート材の配合改良である。熱で凝固するデンプンタンパク質を少量添加することで強固な熱ゲル化を促し、支持強度を高めることができる。第二にシミュレーションを活用し、焼成中の構造内部の温度分布、強度変化、変形を予測することだ。この解析により、最適な焼成温度と時間を導きだすことが可能になる。



Fig.7.造形後のクッキー



Fig.8.焼成後のクッキー

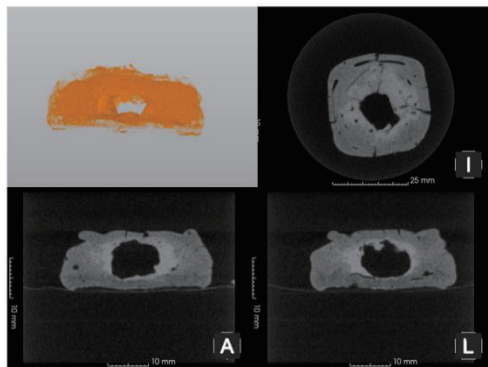


Fig.9.中空構造の CT スキャン画像

4.結言

メチルセルロースの温度応答性を活用し、時間軸の中で役割が変化する「4D」の概念を応用して、中空構造食品の 3D 造形実現を成功させた。開発したサポート材は、安定した吐出と造形中の形状保持性があり、焼成後には優れた除去性を示した。一方で、焼成中の熱軟化に対する支持強度不足が焼成後の形状精度に影響を及ぼすという、材料の時間応答性の設計する課題も明らかになった。本研究は、中空構造の造形技術の開発に貢献するものである。また、物理特性が時間と温度に応じて変化する機能性材料としての新たな可能性を示唆している。今後の展望としては、中空構造の造形精度を向上させて多種多様な可食容器などの実現に加え、サポート材自体に風味を付与していきたいと考える。これ

により、メインの食品とサポート材の味の組み合わせや、食べる過程で味や形が変化したりなどの新しい食体験の創出が期待される。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、「NEDO 先導研究プログラム／マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004)、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期／バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO)(JPNP23025)、JSPS 科研費(基盤 A JP23H00498, JP25H00890, 基盤 C JP24K12997, JP24K15231)、ムーンショット農林水産研究開発事業(MS511)等によって支援を受けたものである。

参考文献

1. S. Zhu, et al. "Three-dimensional Printing of Foods: A Critical Review", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 63, no. 25, pp. 7416-7440, 2023.
2. V. Tejada-Ortigoza, S. E. Morales-Pérez, and A. I. Granados-Nieto, "Towards the development of 3D-printed food," Foods, vol. 11, no. 9, 2022, Art. no. 1289.
3. K. Fujiwara, Y. Suzuki, K. Toba, J. Ogawa, H. Furukawa, M. Hashizume, T. Noji, K. Teratani, N. Ito. "Multifunctional 3D food printer with quad-screw nozzle for four-color printing and dual ink mixing", Journal of Food Engineering, vol.388, no.112384, 2025.
4. H. Kozu, T. Kamata, T. Umeda, D. Nei, and I. Kobayashi, "Characterization of screw-based 3D food printing based on tensile strength of paste-type food inks," Food and Bioprocess Technology, vol. 18, no. 6, pp. 5146-5163, 2025.
5. H.-W. Kim, H.-J. Bae, and H.-J. Lee, "Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough," J. Food Sci., vol. 84, no. 11, pp. 3094-3103, 2019.
6. H.-W. Kim et al., "Classification of the printability of selected food for 3D printing," Food Hydrocolloids, vol. 75, pp. 251-264, 2018.
7. Y. Miyachi, H. Saitou. "Effects of rice flour on the physical properties and sensory attributes of cookies", Bulletin of Yamagata Prefectural Yonezawa Women's Junior College, vol. 47, pp. 51-57, 2012.

柔軟性が調整可能な多孔質ソフトブロックによるやわらか造形手法

Soft Block Molding with Adjustable Porous Flexibility

安藤潤人，吉永智哉，野間春生

Mitsuhiro ANDO, Tomoya YOSHINAGA, Haruo NOMA

立命館大学

Ritsumeikan University

【要約】

本研究は柔軟性が織り交ざった造形手法の確立である。3D プリンタで利用できる材料は数多く生み出され、あらゆる特性の造形物を可能にした。しかしながら、柔軟物の造形に関してはシングルマテリアルでの造形が一般的であり、マルチマテリアルで分布的柔軟性を持つ造形物の創出が困難である。ソフトロボティクスの研究では単純に柔らかいだけではなく、柔軟性のハイブリッドシステムが必要であるとされている。これを実現するために重剛の織り成す造形手法が必要となる。本研究では柔軟性を調整可能な多孔質ソフトブロックの造形方法を提案した。造形には砂糖を犠牲材として利用し、使用する砂糖の結晶の大きさを変えることで柔軟性の調整を可能にした。

キーワード: ソフトロボティクス、柔軟物造形、3D 造形

【Abstract】

We aimed to establish a molding method that combines flexibility and rigidity. We can use a variety of materials with 3D printers to create objects with variable properties. However, soft objects are generally molded using a single material, and it is difficult to mold them using multiple materials. In soft robotics, a hybrid system that combines flexibility and rigidity is required, rather than a simple soft system. The molding method that combines flexibility and rigidity is required for realizing the hybrid system. In this study, we proposed a method for molding porous soft blocks with adjustable flexibility. We used sugar as a sacrificial material for the molding, and indicated that flexibility can be adjusted by changing the size of the sugar crystals used.

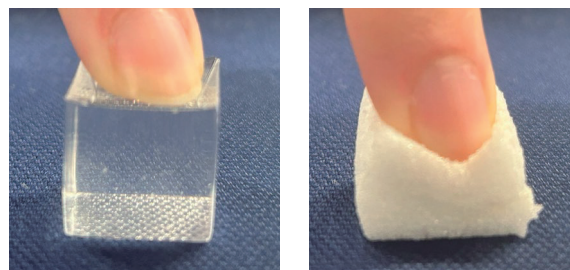
Keywords: Soft robotics, Soft fabrication, 3D molding

1.はじめに

3D プリンタによって様々な材料で複雑なモノを造形することが容易になった。さらに、マルチマテリアルでの造形が可能になり造形可能なバリエーションが爆発的に増えた。しかしながら、柔軟材料を使った造形はシングルマテリアルが一般的である。柔軟性と剛性が織り交ざった造形は困難な状況にある。

柔軟性と剛性の分布を自由に設計し造形できれば、ソフトロボットが代表されるように工学的に応用範囲が広がる。ソフトロボットの領域では単純に柔らかくするだけでなく柔軟性と剛性のハイブリッドシステムが要求される。生物でも骨や筋肉、腱、皮膚のように適切な柔軟性と剛性が織り交ざっている。本研究の目的は柔軟性が織り交ざった造形物の造形手法の確立である。そのために本研究は柔軟性が調整可能なやわらか造形手法を提案した。

柔軟材料での造形手法はディッピング[1]や型成形[2]が一般的である。他に構造で柔軟さを調整する方法が提案されている。単一素材であっても部分的に柔軟構造を入れたり[3]、エラストマー内に骨のように柔軟構造を入れたりして[4]、柔軟性と剛性のハイブリッドシステムを実現している。これらの方法は剛性材料に柔軟性を付与または柔軟材料に剛性を付与する手法である。



(a) PDMS block

(b) Porous block

Fig. 1 Soft block

本研究では柔軟物の剛性の調整方法として、砂糖を犠牲材として利用した多孔質ソフトブロックの造形手法を提案した。この手法は液状の柔軟材料と共に砂糖を混ぜ合わせ、任意の形状に造形し、砂糖を除去することで、造形物内部に多孔質構造を作る方法である。砂糖の結晶の大きさを変更し、それに伴う弾性変化を調査した。

2.多孔質ソフトブロック

多孔質ソフトブロックとは、内部にスポンジのような多孔質構造を持つ柔軟物である。本研究では柔軟材料として PDMS (polydimethylsiloxane) を利用した。図1は内部が詰まったソフトブロックと多孔質ソフトブロックの写真である。多孔質構造にすることで剛性を低くできる。

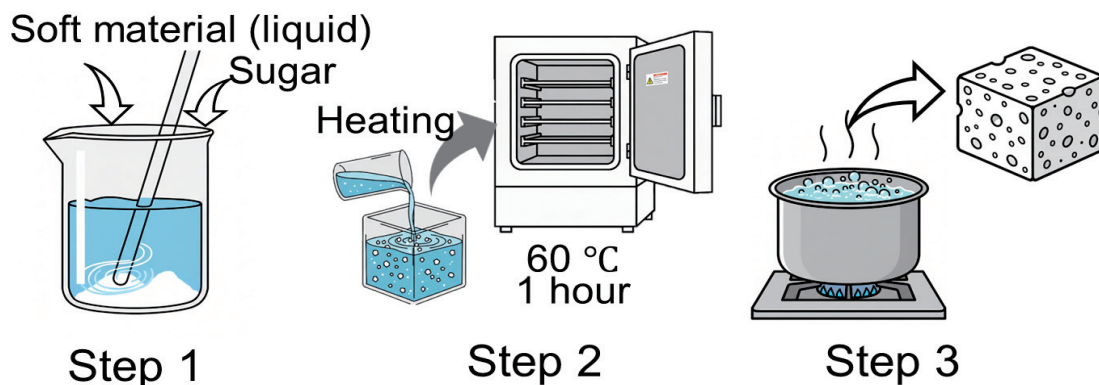


Fig. 2 Molding process of porous soft block

多孔質ソフトブロックの造形方法について説明する。図2は造形手順を説明した模式図である。造形過程は以下の通りである。

- Step 1: 液状の柔軟材料と砂糖を混ぜ合わせる。
- Step 2: 砂糖混合の液状の柔軟材料を型に流し込み、乾燥させて砂糖混合のブロックを造形する。
- Step 3: 砂糖混合のブロックを煮込み、砂糖を除去し、多孔質ソフトブロックを成形する。

Step2 では 60℃に設定した恒温槽にて1時間放置して乾燥させた。砂糖混合のソフトブロックから砂糖を取り除くことで、砂糖があった部分が空孔になる。これによってソフトブロックの内部を多孔質構造にできる。

本研究で使用した砂糖は微粒子グラニュー糖中ザラ糖である。図3はそれぞれの砂糖の結晶の写真である。結晶を大きくすることで、空孔を大きくしさらに柔らかいソフトブロックを作製することができる。

3.柔軟性の評価

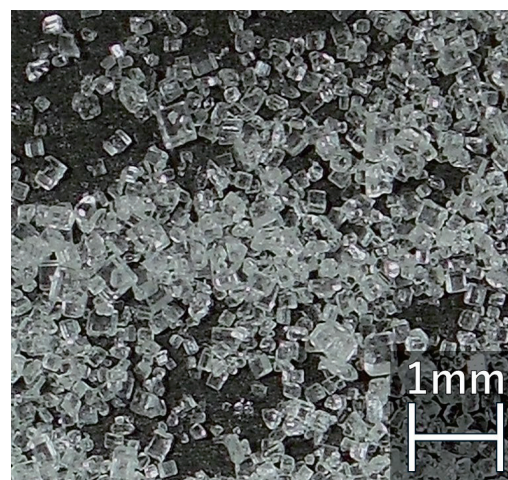
本稿では柔軟評価として、圧縮時の荷重を計測した。ソフトブロックは微粒子グラニュー糖と中ザラ糖を混合させて作製し、その柔軟性を評価した。

用意したソフトブロックについて説明する。PDMSが1に対して微粒子グラニュー糖が4と中ザラ糖が 50 の質量比の液体 PDMS を用意し、それぞれの配合率を変化させてソフトブロックを作製した。本研究では3種類のソフトブロックを作製した。微粒子グラニュー糖と中ザラ糖の比率(%)がそれぞれ、100:0, 75:25, 50:50 のソフトブロックを作製し、評価した。大きさはすべて 20 mm×20 mm×20 mm の立方体にした。

計測はそれぞれのブロックに対して、圧縮しそのときの荷重を計測した。測定は10回行った。圧縮距離は約10mm程度とした。

図4はそれぞれ多孔質ソフトブロックを圧縮した時の荷重計測の結果を示すグラフである。横軸は圧縮距離、縦軸は圧縮時の荷重である。計測のばらつきを示す標準偏差は各荷重点で約 0.01~0.03 N であった。

結果を見るとそれぞれの弾性率が異なることがわかる。中ザラ糖の比率を大きくするにつれて弾性率が小さ



(a) Fine-granulated sugar



(b) Coarse sugar

Fig. 3 Sugar crystals

くなっている。したがって、中ザラ糖の比率を大きくすることでソフトブロックが柔らかくなっていることが示された。中ザラ糖の比率が大きくなると、内部の空孔が大きくなり、剛性が低くなる。それによって弾性率が低くなる。

ソフトブロックの挙動は、1mm以下の変形領域では非線形挙動を示している。これはシリコンなどの柔軟材料に見られる挙動である。大変形の領域では線形的な挙動が観測される。圧縮距離が 2 mm から 8 mm の間で線形近似を行い、弾性率を算出した。図5にそれぞ

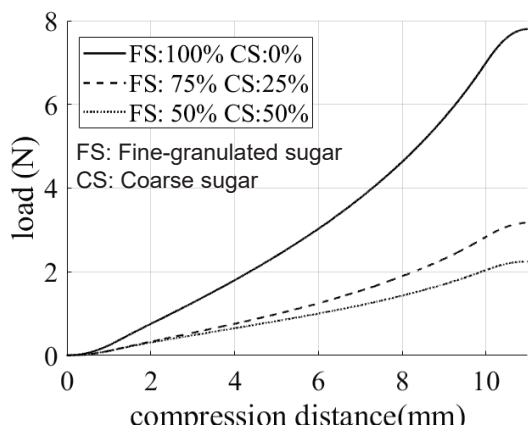


Fig. 4 Load fluctuation during compression of porous soft block

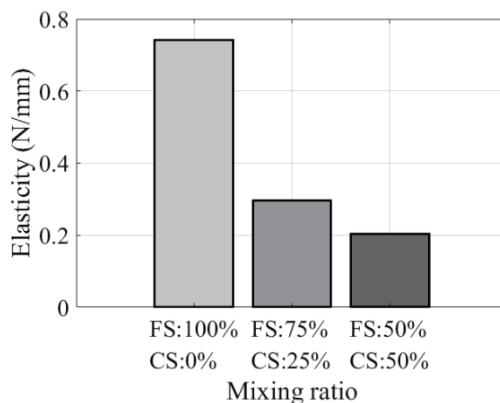


Fig. 5 Elasticity of each porous soft block

れの弾性率を示す。微粒子グラニュー糖が 100 %と比べて、中ザラ糖を 50 %にした場合の弾性率は約 1/3.7 倍になった。中ザラ糖を 25 %含めるだけでも弾性率は約 1/2.5 倍程度なった。中ザラ糖を少量加えるだけでも急激な弾性率の変化が得られる。

4. やわらか造形

多孔質ソフトブロックを利用した造形手法について説明する。本稿では多孔質ソフトブロックを積み上げて造形する方法を提案する。ここで提案した多孔質ソフトブロックは型によって様々な形状のブロックを造形することが可能である。これを利用して、LEGO ブロックと同様に積み上げて造形することが可能である。

図 6 は LEGO ブロック状に造形した多孔質ソフトブロックの写真である。積み上げる際にブロックとブロックの間に液体状の PDMS を塗布し、固めることで一体となって造形できる。

図7は多孔質ソフトブロックを積み上げて造形した造形物の写真である。LEGO ブロックと同様に多様な柔軟な造形物を生み出すことが可能となる。さらに部分的に柔軟性を調整して造形することが可能である。したがって、柔剛分布を自由に変更して造形できる。

5. おわりに

本研究で柔と剛の織り交ざった造形手法の確立のため、柔軟性が調整可能な多孔質ソフトブロックの造形方法を提案した。多孔質ソフトブロックの造形では砂糖を犠牲材として利用する。このときの砂糖の結晶の大きさを変化させることで、柔軟性を調整することに成功した。結晶の大きい砂糖の配合を多くすることでより柔軟なソフトブロックを造形できることを示した。

本稿ではさらに多孔質ソフトブロックを積み上げて造形するやわらか造形法を提案した。この手法により柔と剛のブロックを自由に配置し柔剛の分布を自由に設計し造形することが可能である。しかしながら、任意の弾性率を狙って造形することはできていない。より定量的な造形方法の確立のため、造形条件のパラメータを設定してより体系的に造形法を確立させる必要がある。本研

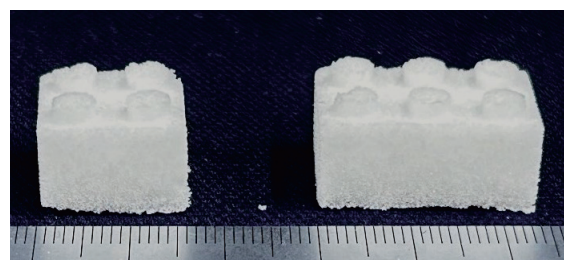


Fig. 6 Parts of soft block

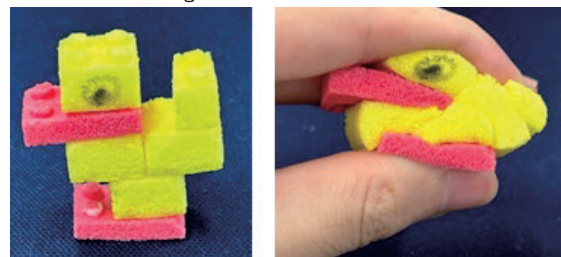


Fig. 7 Soft object made by soft block

究では定性的にソフトブロックの柔軟性を調整できることを示した。

自由に柔軟性と剛性を配置することができれば、ソフトロボットの最適設計の実現が可能となる。現在では材料の特性の範囲内で設計することができなかったが、その制限がなくなり、より広い範囲での設計が可能となり多様なソフトロボットの創出が望まれる。

参考文献

1. T. Takei, et. al., Spiral coil beneath fingertip enhances tactile sensation while tracing surface with small undulations. *Advanced Robotics* vol. 32, pp. 295–307. 2021.
2. Silva, et. al., Integrated Design and Fabrication of Pneumatic Soft Robot Actuators in a Single Casting Step. *Cyborg Bionic Syst.* 2024.
3. Ion, et. al., Metamaterial Mechanisms. In *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*. Pp. 529–539. 2016.
4. 三森 友貴ら, ジャイロイドを用いた液体充填法による柔軟材と硬質材の結合, *日本ロボット学会誌*, 43 巻, 4 号, p. 431–438, 2025.

High-resolution 2D Printing of Complex Fiber-based Patterns Using Melt Electrowriting

Huali LU, Huaizhong XU

Kyoto Institute of Technology

【Abstract】

Additive manufacturing (AM) enables fabrication of micro- and nanoscale structures, with fiber-based AM well-suited for hierarchical architectures and programmable functions. Translating visual information into precise fiber constructs remains challenging. This study introduces a high-resolution, image-based strategy for fabricating two-dimensional fiber patterns via melt electrowriting (MEW). A custom MATLAB tool automates image-to-G-code conversion. Experiments reveal that increasing node and fiber numbers enhances pattern fidelity, while finer fibers slightly improve delicacy. Moderate image contrast optimizes structural similarity, whereas excessive contrast slightly reduces fidelity. This approach enables programmable translation of visual data into high-fidelity fibrous constructs for advanced functional applications.

Keywords: high-resolution, fiber, melt electrowriting, fidelity

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) enables the fabrication of complex micro- and nanoscale structures, with fiber-based AM particularly suited for hierarchical architectures and programmable functions [1]. Translating visual information, such as photographic data, into precise fiber constructs remains challenging due to material, resolution, and geometric limitations. Melt electrowriting (MEW) overcomes these challenges via deterministic deposition of micron-scale fibers [2]. In this study, we present a high-resolution, image-based strategy for fabricating two-dimensional fiber patterns via MEW. **Fig. 1** illustrates the workflow for converting an input image into G-code for MEW printing. The effects of node number, fiber diameter, image contrast, and line density on pattern fidelity were evaluated, enabling programmable translation of visual information into high-fidelity fibrous constructs for applications in smart textiles, wearable sensors, information encryption, and stimuli-responsive materials.

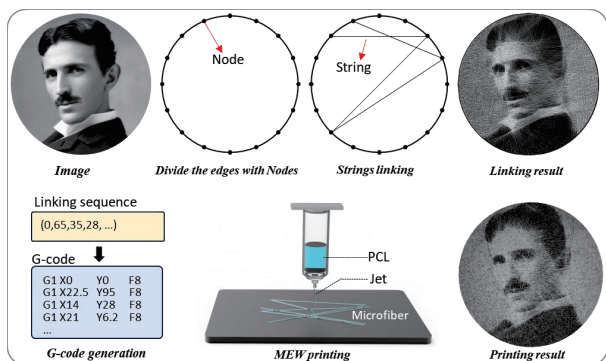


Fig. 1. Schematic workflow illustrating high-resolution MEW printing based on image.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Medical grade polycaprolactone (PCL) (Purasorb PC 12) was purchased from Corbion Chemicals Co., Netherlands.

2.2 MEW printing process

Before MEW printing, PCL pellets were placed in a plastic syringe and heated at 85 °C until they reached a molten state. The distance between the nozzle and the collector was 2.5 mm, the nitrogen gas pressure was 0.1 MPa, the applied voltage ranged from 5.0 to 5.6 kV, and the printing speed was maintained at 6 - 8 mm/s. All printing was conducted at a room temperature of 23 ± 1 °C and relative humidity of $32 \pm 2\%$.

3. Conclusion

3.1 Effect of nodes number on print fidelity

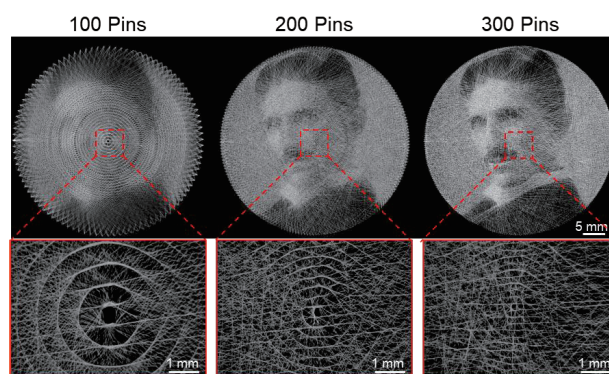


Fig.2. Printed results using different numbers of nodes. All patterns were composed of 4000 fibers.

As shown in **Fig. 2**, increasing the number of nodes improved pattern fidelity. At 100 nodes, fibers were sparse and details poorly reproduced. At 200 nodes, contours became clearer with more uniform fiber

arrangement. At 300 nodes, fibers were densely packed and well-aligned, enabling the most accurate representation of fine features. These results indicate that higher node numbers enhance print quality and detail reproduction.

3.3 Effect of lines number on print fidelity

As shown in **Fig. 3**, the number of fibers strongly influenced print quality. At 1000–2000 lines, patterns were sparse with incomplete contours; 3000 - 4000 lines improved clarity and continuity; and 5000 - 6000 lines produced highly distinguishable features and optimal fidelity. These results indicate that sufficient fiber numbers are essential for high-resolution, visually accurate prints under a fixed pin configuration.

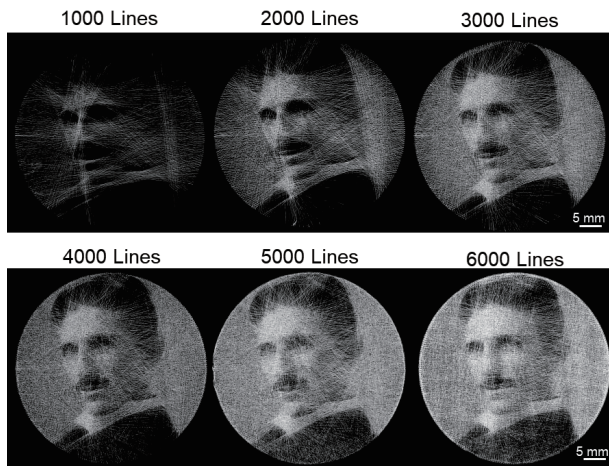


Fig.3. Printed results using different numbers of fibers. All patterns were generated with 300 nodes.

3.4 Effect of fiber diameter on print fidelity

As shown in **Fig. 4**, fiber diameter had a minor effect on print quality. Slight improvements in image clarity and texture were observed as fibers became finer, with the smallest diameter producing the most delicate features under constant node and fiber numbers. This is likely because finer fibers provide more uniform coverage of the pattern area, reducing gaps and better reproducing image details.

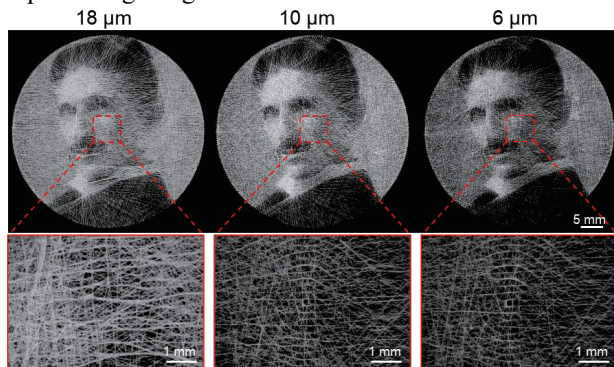


Fig.4. Printed results using different fiber diameters. All patterns were generated with 300 nodes and 4000 fibers.

3.5 Effect of original image contrast on print fidelity

As shown in **Fig. 5**, under a fixed nodes count and fiber number, the contrast of the original image influenced print quality. MS-SSIM analysis indicated that increasing contrast from 0.5 to 2 raised the MS-SSIM value from 0.4332 to 0.5329, reflecting enhanced structural similarity and improved pattern clarity. Further increasing the contrast to 3 slightly decreased the MS-SSIM to 0.5248, though still higher than at 0.5 and 1. This may be attributed to excessively high contrast producing overly sharp or strong edges, which slightly reduces the accuracy of fiber deposition.



Fig.5. Printed results with different contrast of the original image. All patterns were generated with 300 nodes and 4000 fibers

4. Conclusion

Increasing node and fiber numbers markedly enhanced pattern fidelity and fine feature reproduction, while fiber diameter had only minor effects, with finer fibers producing slightly more delicate patterns. Moderate increases in image contrast improved structural similarity and clarity, whereas excessively high contrast slightly reduced fidelity. These results provide guidance for optimizing MEW printing parameters to achieve high-resolution, visually accurate fibrous constructs from visual information, supporting applications in smart textiles, wearable sensors, information encryption, and stimuli-responsive materials.

Reference

1. Wagmare R, Harshe R, Pednekar J, et al., “Additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites: Current trend and future directions”, *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, 10(4), pp.1973-2000.
2. J.C. Kade, P.D. Dalton, “Polymers for melt electrowriting”, *Adv. Healthc. Mater.* 10(1) (2021), 2001232.

多孔質構造を用いた微生物生息環境の創出のための大規模ロボットによる粘土 3D プリンティング

Large-scale robotic clay 3D printing of porous structures for creating macrobiotic living environments

バルナ・ゲルゲイ・ペーター¹, ベネディクト・ジャコブ², 津田和俊¹, 吉田拓海¹, トマ・オルティス³

Gergely Peter BARNA¹, Bénédicte JACOBS², Kazutoshi TSUDA¹, Takumi YOSHIDA¹, Thomas ORTIZ³

¹ 京都工芸繊維大学, ² ラービッツシスターズ, ³ フンギチャ

¹Kyoto Institute of Technology, ²Larbitssisters, ³Fungicha

【要約】

本研究は、シアノバクテリア *Nostoc* を宿す多孔質構造のための粘土系 3D プリンティングを探究し、酸素生成とバイオミネラリゼーションを可能にすることを目的とする。2023 年、東京藝術空間本郷での Larbitssisters レジデンス「光合成する植木鉢」において開始された本プロジェクトでは、Grasshopper を用いたランダムツールパス生成アルゴリズム、乾燥収縮に耐える特殊な粘土配合、そして脆弱な形状を支える珪藻土支持システムを開発した。これにより、生物を維持しつつ時間とともに強化される構造体の製作が可能となった。今後は、製造段階での接種を統合し、バイオ統合型建築の応用拡大を目指す。

キーワード: 粘土印刷, 多種共生, 秩序ある混沌, ネンジュモ

【Abstract】

This research investigates the application of clay-based 3D printing for creating porous structures that can host cyanobacteria (*Nostoc*), facilitating oxygen production and biomineralization. Initiated during the Larbitssisters' 2023 residency at Tokyo Arts and Space Hongo (*Photosynthesizing Flower Pots*), the project developed a custom Grasshopper algorithm for randomized toolpaths, a specialized clay mixture to resist shrinkage, and a diatomaceous earth-supported printing for fragile geometries. These innovations allowed the fabrication of structures sustaining living organisms, which strengthen over time through biological processes. Future work will integrate inoculation during fabrication, advancing bio-integrated design strategies for sustainable architecture and expanding the role of digital manufacturing in ecological systems.

Keywords: clay printing, multispecies coexistence, organized chaos, *Nostoc*

1. Introduction

Digital manufacturing is often associated with productivity and precision. In this research, however, we focused on creating new qualities that emerge from the unpredictability of the base material itself and developed a clay 3D printing method for producing porous structures that, through their imperfections, can serve as habitats for microorganisms.

The project was initiated during the Larbitssisters' residency at Tokyo Arts and Space Hongo in 2023, titled "*Photosynthesizing Flowerpots*", an experimental project aimed at repurposing the traditional flowerpot as a living artifact capable of photosynthesis. Emerging from the symbiosis between a computer-controlled, 3D-printed bio-structure and photosynthetic microorganisms, the work explores the potential of supporting living materials through sustainable design to achieve multi-species coexistence within our civilization.

2. Objectives and methods

Nostoc is a genus of cyanobacteria (blue-green algae) that forms colonies composed of filaments of cells within a gelatinous sheath (Walter et al., 1995). These microorganisms are photosynthetic and can fix atmospheric nitrogen, making them ecologically important in the cycling of nutrients. *Nostoc* is commonly found in moist soils, freshwater, and even symbiotically in plant tissues such as lichens and some ferns. It can survive in extreme environments due to its ability to produce protective compounds and enter dormant states.

Cyanobacteria require air and moisture; when these conditions are met, they not only emit oxygen through metabolic processes but also perform biomineralization (Rodina et al. 2021), strengthening their environment over

time, a focus of recent research on 3D printing and geometric optimization of toolpath generation, resulting in distinct formal constellations (Armaly et al., 2023).

In our project, however, we aimed to populate specific existing signature geometries with *Nostoc* cultures, such as the common flowerpot number 8 (植木鉢 8 号). To achieve this, we needed to develop a loose structure for the existing volumetric design through continuous clay extrusion, considering the clay's viscosity, a specific mixture, and a support method to enable fabrication of the fragile clay system, along with an optimal toolpath generation tailored to the clay and local earth mixture.

Project objectives:

1. Develop a toolpath generation method to create a porous structure.
2. Formulate a clay mixture that can support microbial life forms.
3. Build a 3D printing setup and pipeline for fabricating large structures.

All these had to be developed in a short timeframe through rapid prototyping cycles.

3. Methods

3.1 Toolpath generation

For preliminary rapid testing, we explored the possibilities of 3D manufacturing using the Fuzzy Skin function in the slicer software, Cura version 5.3. This function adds a random offset at predefined intervals to create a homogeneously rough surface. By setting extremely large offset values up to 12 mm, we achieved a furry-like effect, which we tested by printing PLA prototypes.

However, this method lacked sufficient control and was unsuitable for generating volumetric structures. To achieve the desired effect, a spaghetti-like infill that produced an “organized chaos”, we developed a parametric algorithm within the Grasshopper interface of Rhinoceros to generate a custom parametric toolpath. The algorithm populated the target volume with overlapping circles arranged at a defined central distance, creating a dense network of potential paths. Key points were extracted along the perimeter of these circles, and from

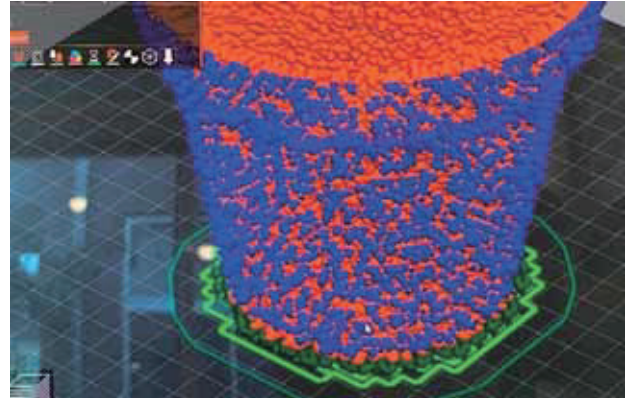


Fig. 1. The fuzzy skin effect of Cura

this set, a random subset was selected to introduce controlled irregularity. The selected points were then interpolated into a continuous spline, forming the basis of the extrusion path.

To evaluate the spatial configuration, the spline was visualized as a pipe geometry, enabling simulation of the extrusion process and determination of appropriate layer heights relative to a specified extrusion width. This approach provided a balance between structural integrity and porosity, ensuring that the printed form could support subsequent biological colonization while maintaining the intended aesthetic complexity.

3.2 Clay mixture

To achieve porosity through a randomized extrusion toolpath, the unsupported geometries required a specialized clay mixture capable of resisting shrinkage during drying. A series of material tests was conducted to determine the optimal proportions of the base clay and additives, including bentonite and locally sourced earth with high sand content.

The design objective was to computationally generate a flowerpot geometry using a clay mixture with sufficient structural integrity to prevent collapse during extrusion, while ensuring material properties conducive to hosting photosynthetic cyanobacteria. The initial formulation employed standard grey ceramic clay, with subsequent iterations aimed at enhancing porosity and meeting additional requirements for cyanobacterial viability. The extrusion

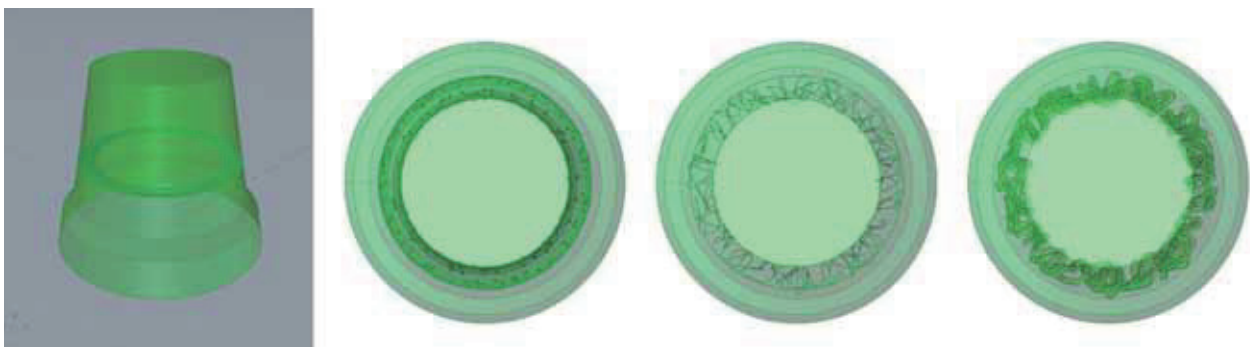


Fig. 2. Process of toolpath generation: 1. placement of circles in the volumetric section; 2. definition of random points; 3. interpolation; 4. simulation



Fig. 3. Printing workflow utilizing powder-based molds

process utilized a nozzle with a diameter of 3 mm. The actual mixing ratios were determined based on the notes recorded on the whiteboard, and prototypes were subsequently produced according to these ratios.

3.3 3D printing setup

Although testing with PLA was stable due to the material's inherent properties, clay remains in a plastic state until sufficiently dried. Since it cannot support its own weight during fabrication, a support method was required.

Initial experiments with rigid molds proved unsuitable, as they were ecologically unsustainable to produce, limited to matching geometries, and unable to shrink alongside the clay, resulting in extensive cracking.

To address these limitations, we explored powder-based molds that could freely conform to any printed form, be recycled for iterative processes, and shrink concurrently with the drying clay. This was achieved using light, soft, yet formable diatomaceous earth, which was applied in parallel with the 3D printing process.

For the 3D printing setup, we employed robotic fabrication using a KUKA KR10 robot, simulated with KUKA|prc in Grasshopper, enabling rapid adjustments to the setup and scalability for large-format production.

4. Results

The application of the afore-mentioned methods enabled the fabrication of the intended geometries, which were subsequently inoculated with *Nostoc* colonies. These colonies, collected daily from the university sports field, were examined microscopically, and observations were systematically documented. Through biomineralization processes, the colonies are expected to contribute to the structural reinforcement of the printed geometries, although this process requires long-term monitoring to prove



Fig. 4. The 'organized chaos' structure of the 3D printed clay

statically effective.

The developed workflow was only partially automated; the layering of diatomaceous earth was performed manually, allowing controlled adjustment of structural development by applying pressure or leaving the support loose. Despite its soft qualities, the support material required removal to prevent cracking once the clay had hardened sufficiently to bear its own weight, which typically occurred within 3 to 4 hours after manufacturing during summer conditions.

Regarding material formulation, local earth from Fukakusana, Kyoto, was incorporated to optimize the base grey clay mixture, which had previously demonstrated reliable performance. Bentonite was added to maintain smoothness and prevent clogging during extrusion. Through these additives and careful adjustment of water content, the mixture was successfully scaled for printing a full flowerpot with a diameter of 250 mm and a height of 205 mm. However, due to the non-homogeneous nature of the mixture, active regulation of the air pressure supplied to the clay-containing cylinder was required throughout the extrusion process.

5. Conclusion

This research successfully developed a robotic clay 3D extrusion methodology that creates porous structures capable of hosting cyanobacteria (*Nostoc*) colonies. We demonstrated that randomized toolpaths and shrinkage-resistant clay mixtures can be the foundation for living materials that self-strengthen through biomineralization. The key innovation lies in inverting traditional digital manufacturing precision to produce "organized chaos," creating microhabitats that mimic natural volumes through controlled unpredictability rather than geometric accuracy.

Unlike existing literature that emphasizes direct bioprinting of cyanobacteria for carbon sequestration applications (Dranseike et al., 2025), the approach presented here enables post-fabrication inoculation of porous clay substrates. This strategy aligns with recent advances in bioreceptive clay printing for façade applications (Cruz & Beckett, 2016). Furthermore, the methodology offers potential for developing hybrid materials, wherein non-structural substrates, such as sawdust for mycelium colonization, can be introduced into the porous structure post-extrusion, thereby mitigating challenges associated with printing these substrates directly (Elsacker et al., 2022).

Key limitations include the rapid prototyping timeframe that may not have optimized material formulations, reliance on diatomaceous earth support that could complicate scalability, and a post-inoculation approach that limits microbial distribution and contamination control. The transition from laboratories to real-world or in-situ environments also remains challenging.

Future work should integrate inoculation during fabrication through multi-material extrusion systems and investigate environmental parameter control (humidity, temperature, atmosphere) to optimize immediate microbial viability. For architectural applications, systematic studies of contamination resistance and long-term structural performance will also be essential.

This research establishes robotic fabrication as a viable tool for creating living architectural systems, contributing to paradigms where buildings and objects function as active ecological participants, fundamentally reimagining the relationship between synthetic and natural systems in sustainable design.

Acknowledgments

The authors would like to thank the facilities and the facility staff of KYOTO Design Lab, Kyoto Institute of Technology, for their support and contributions to this research. Special thanks to Tokyo Arts and Space Hongo for hosting the residency that initiated this project, and to all collaborators who assisted with the work.

References

- Armaly, P., Iliassaf, L., Kirzner, S., Kashi, Y., & Barath, S. (2023). Biologically Informed Design – Towards Additive Biofabrication with Cyanobacteria. *In CAAD Futures 2023* (pp. 425-436).
- Cruz, M., & Beckett, R. (2016). Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality. *Architectural Research Quarterly*, 20(01), 51-64.
<https://doi.org/10.1017/S1359135516000130>
- Dranseike, D., Cui, Y., Ling, A. S., Donat, F., Bernhard, S., Bernero, M., ... & Tibbitt, M. W. (2025). Dual carbon sequestration with photosynthetic living materials. *Nature Communications*, 16(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-58761-y>
- Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Peeters, E., & De Laet, L. (2022). Large-scale robotic extrusion-based additive manufacturing with living mycelium materials. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100454.
- Rodina, O. A., Vereshchagin, O. S., Vlasov, D., Zelenskaya, M. S., Pankin, D. V., Mitrofanov, N. V., Nikitin, M., Vasileva, K., & Frank-Kamenetskaya, O. V. (2021). Cyanobacterial Communities of Carbonate Sediments and Biomineralization in Peterhof Fountains' Water Supply System, Russia. *Minerals*, 11(11), 1199.
<https://doi.org/10.3390/min11111199>
- Walter, K. D., Gudder, D. A., & Mollenhauer, D. (1995). The Ecology of Nostoc.
<https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1995.00002.x>



Fig. 5. Flowerpot cultivated with nostoc

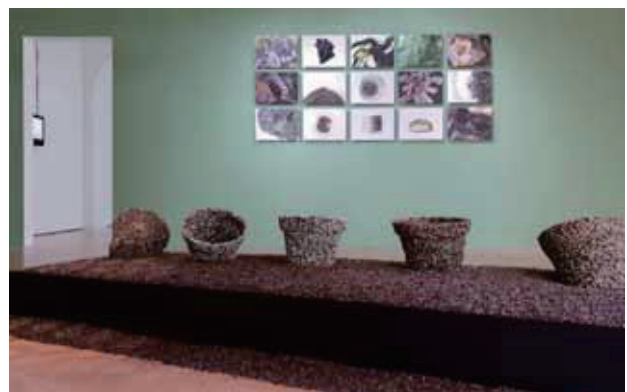


Fig. 6. The exhibition at the TOKAS Creator-in-Residence 2023 Exhibition

平面板による空間的パズルを用いた立体造形と創作支援

Form-Making and Creative Support with Spatial Puzzles Composed of Plank Materials

呂 亜輝 , 敖 俊偉 , 邵 帥

Yahui LYU , Junwei AO , Shuai SHAO

フォフォラボ

fofo lab

【要約】

本研究では、レーザーカッターや CNC によって加工された平面板を空間的パズルとして組み立てることにより、立体造形を実現する新たな手法を提案する。各パーツはあらかじめ異なる形状やサイズで設計され、所定の位置に配置されることで、彫刻的かつ構造的な表現を生み出す。ユーザは組み立ての過程で完成形を想像しつつ探索的に操作を行い、そのプロセスを通じて創造的推論や空間認識力が喚起される。本手法は、完成物としての造形結果のみならず、創作のプロセス自体を体験可能とし、創造性と教育的価値を兼ね備えたアプローチである。さらに、ユーザが設定した立体形状に基づき、必要なパーツの形状や数を自動生成し、加工までを一貫して支援するツールを開発した。このツールは専門家に限らず、専門知識を持たないユーザにとっても自身の発想を立体的に具現化できる環境を提供する。本研究は、デジタルファブリケーション時代における創造的实践を支援し、ものづくり活動の裾野を拡張し、新たな可能性を切り拓くものである。

キーワード: デジタルファブリケーション, 立体造形, 空間的パズル, 平面素材, 創作支援

【Abstract】

This study proposes a novel method for three-dimensional form-making that treats laser- or CNC-processed planar panels as spatial puzzles. Each part is pre-designed with distinct shapes and sizes, and when assembled at designated positions in space, they generate sculptural as well as structural expressions. During the assembly process, users engage in exploratory manipulation while envisioning the final form, thereby stimulating creative reasoning and spatial cognition. The approach not only emphasizes the resulting artifact but also enables users to experience the creative process itself, offering both educational and creative value. Furthermore, we developed a tool that automatically generates the required parts—both their shapes and quantities—based on a user-defined target form, and supports the workflow seamlessly up to fabrication. This tool provides an accessible environment not only for experts but also for non-experts, allowing them to materialize their ideas three-dimensionally. Overall, this research contributes to creative practice in the era of digital fabrication, broadening the scope of making activities and opening new possibilities for form generation.

Keywords: digital fabrication, form-making, spatial puzzles, planar materials, creative support

1. 序論

近年、デジタルファブリケーション技術の発展により、レーザーカッターや CNC といった加工機械が急速に普及している。これにより、従来は専門的な設備や知識を必要とした立体造形が、教育現場や個人の創作活動にまで広がり、誰もが身近にアクセスできるものとなりつつある[1]。一方で、McCullough は、デジタルファブリケーションの製造プロセスにおいて、人間の身体性や素材との直接的な対話が失われつつある点を指摘している[2]。また、Ingold は、手を動かす行為そのものが思考を触発し、創造的な推論や発見を促すプロセスであると述べており、デジタルとクラフトをいかに接続するかは創作活動における重要な課題といえる[3]。

平面から立体への造形は、デジタルファブリケーションにおける主要な手法の一つである。平面加工は制約が少なく、収納や輸送の容易さから広く利用されてきた



Fig. 1. Three-dimensional puzzle using wooden planks

[4]. 特に、加工された平面材料を人が組み立てて立体を構成する手法は、身体的操作や探索的行為を伴う点

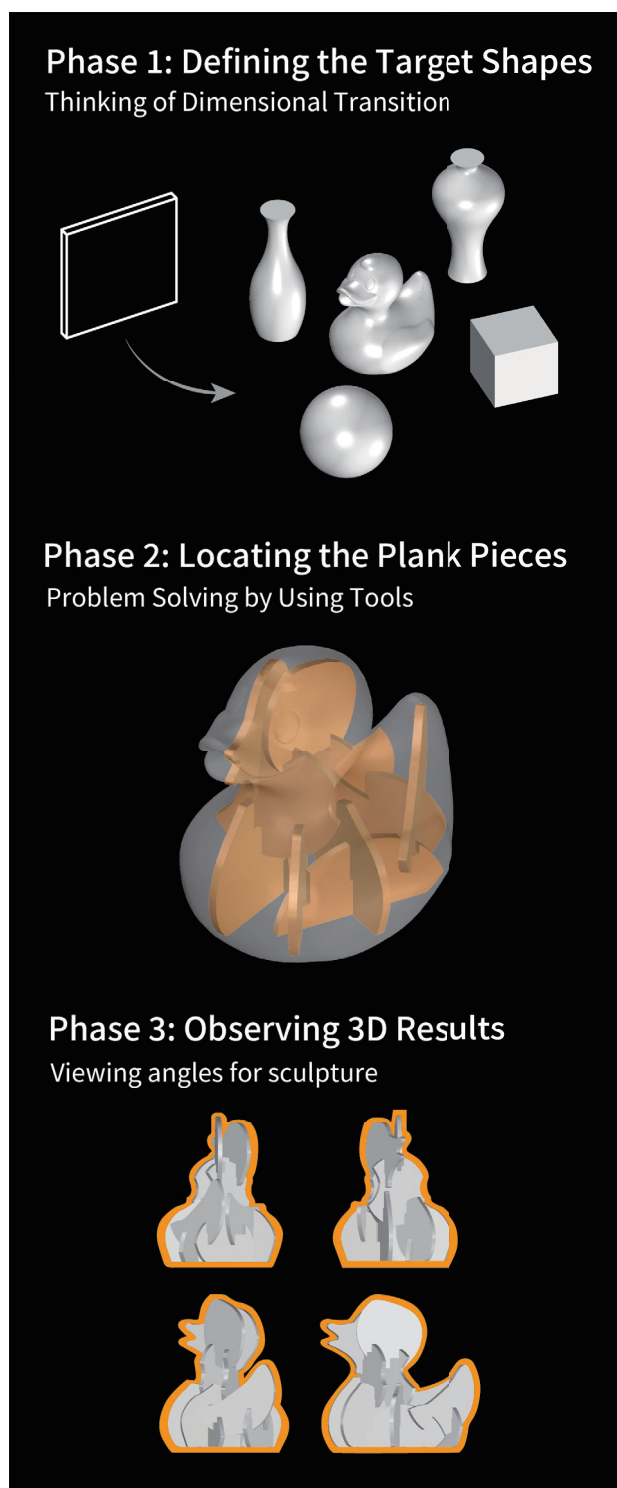


Fig. 2. The form-making method proposed in this study supports users' three-dimensional creative activities through three phases based on the design process.

で意義がある。本研究は、こうした平面素材による立体造形の手法を、創作支援の領域に応用することを目的とする。

既存研究としては、SketchChair[5]がユーザの 2D スケッチを椅子の部材形状に展開し、レーザーカッターで切り出したパーツを組み立てることで椅子を製作可能にした。また、FlatFitFab[6]は任意の 3D モデルを入力す

ると交差する平面断面構造に変換し、切断と組立によって対象形状を構成できるシステムを提案している。これらの手法はいずれも平面素材を用いた立体構築を実現する有効なアプローチであるが、主に既存の形状を効率的に再現することに焦点が当てられている。これに対して本研究は、立体空間の内部でユーザが探索的にユニットを組み合わせ、空間構成を模索する創作過程に重点を置く。このような体験を通じて、創作者は立体的な空間認識や形態理解を深めながら、自身の発想を制作に結びつけることが可能となる。

2. 提案手法

本研究で提案する手法は、平板を空間的パズルとして組み立てることにより立体造形を実現するものである。目標形状に基づいて各ピースは異なる形状やサイズに設計され、切り欠き部分を互いに差し合わせることで、所定の位置に配置され立体が形成される (Fig. 1)。本手法は、単に目標形状を再現するだけでなく、ユーザが組立過程において完成形を想像しつつ探索的に操作を行うことを促す点に特徴がある。

本手法の実践過程を通じて、異なる問題設定や問題解決の場面において、人間の創造的思考を三つの側面から育成することが考えられる (図 2)。第一段階では、ユーザは平板材を用いていかに立体形状を構成するかを考える必要があり、これにより次元変換的な思考が養われる。第二段階では、本研究が提供する設計ツールを用いて、立体空間内部に平板を組み合わせ、安定した構造を形成するとともに、形状の特徴を十分に表現することが可能となる。これにより、立体的な空間認識力や問題解決に向けた創造的思考が培われる。第三段階では、ユーザは完成した立体形状を様々な角度から観察し、視点の違いによって異なる形態が現れることを体験することで、対象を立体的に捉え、その変化を理解する思考が育成される。

以下では、本造形手法の具体的な原理について説明する。

2.1 ピースの配置

ピースの配置は、全体の立体形状の整合性を左右する重要な要素である。本手法では、ピースを目標とする立体形状に対してかのような均等に分布させることで、局所的な密度の偏りを防ぎ、全体として安定した形態を構成できるようにしている。さらに、各ピースは少なくとも二つの支点を持つ必要があり、その下には他の二枚以上のピースが配置されることで、組立過程における安定性が確保される。これにより、個々のピースが自立的に保持されるだけでなく、全体構造としての一貫性も維



Fig. 3. Piece supports

持される。

2.2 ピースの形状

ピースの形状は立体の外形に沿って設計されることが重要である。特に、各ピースの主要部分を対象形状の外形に適合させることで、全体としての形態的特徴を最大限に反映することができる。

このように外形に基づいてピースを設計することで、立体構造の視覚的な一貫性が高まり、完成形における対象形状の特性をより明確に表現できる。

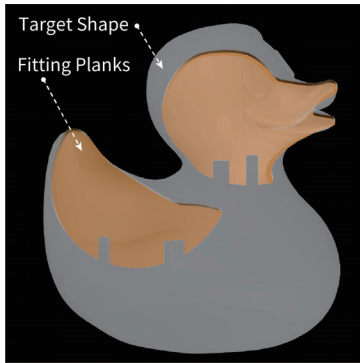


Fig. 4 . Pieces fit to target shape

2.3 ピースの接合

ピース同士の接合は、切り欠き部分を差し合わせることで実現される。切り欠きの幅と高さは、ピースの厚みおよび互いの接合角度に依存する。本手法では、各ピースは垂直方向の軸まわりに時計回りまたは反時計

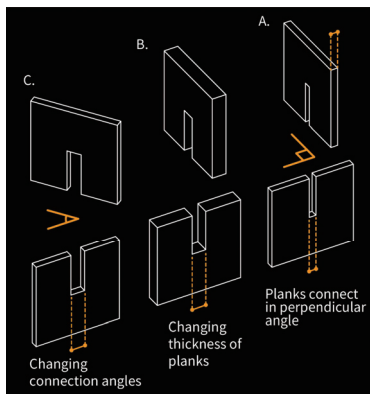


Fig. 5. Slot width of connection

計回りに回転するのみであり、反転は生じない。各ピースは二枚以上の他のピースによって支えられ、それぞれの間に一定の角度が形成される。二枚のピースが成す角度が鋭角と鈍角に近づくほど切り欠きの幅は大きく設計される(Fig. 5C)。また、ピースの厚みが増すと切り欠き幅も大きくする必要がある(Fig. 5B)。切り欠きの高さは高いほど接合部の安定性が増すが、全体の形態バランスを考慮して設計する必要がある。

2.4 支援ツール

本研究では、ユーザが設定した立体形状に基づき、必要なピースの形状や数を生成し、加工までを一貫して支援するツールを開発した。本ツールはモデリングソフトウェア Rhinoceros のビジュアルプログラミング環境である Grasshopper を基盤として構築されており、アルゴリズムとユーザーフレンドリなインターフェースを組み合わせることで、初心者から専門家まで利用可能な環境を提供する(Fig. 6)。

本ツールのワークフローは次のような流れであ

る。まず、ユーザは目標とする立体形状を入力し、完成形を定義する。次に、各ピースの配置位置、大きさ、回転角度を調整でき、材料に応じて板厚などのパラメータも設定可能である。その後、3D プレビュー機能を用いて完成形を任意の角度から確認できる。最後に、目標形状に対応するピースの展開図が自動的に生成され、出力される。このデータはレーザーカッターや CNC 加工機で利用でき、実際の制作プロセスに直結する。

3. 応用

本章では、本研究で提案する手法を適用して作成した具体的な立体造形の事例を示す。形態的特徴や用途の異なる対象に展開することで、本手法の多様な応用可能性を検証する。

3.1 立体パズル

厚さ6mm の桧板を用いて、形態の異なる三種類の立体パズルを制作した。各作品の寸法はおよそ一辺20cm 程度である。(Fig. 7)。各形状は観察する角度によって異なる造形的表情を示し、まるで彫刻のように多様な姿を呈する。球体の例では、ピースを均等に配置することで全体として滑らかな曲面を表現できることを検証した。一方、アヒルの例では、外形に沿ったピース形状の設計によって特徴的なシルエットを強調でき、本手法が複雑な対象にも適用可能であることを示した。

3.2 花瓶

花瓶を対象とした応用例として、外形の異なる二種類の形状を制作した(Fig. 8)。いずれも、外形に基づくピース設計により曲面の特徴を再現できることを検証した。さらに、実際に花を生けることで、造形物が構造的に安定し、単なる試作モデルにとどまらず生活用品やインテリアとしても機能し得ることを示した。

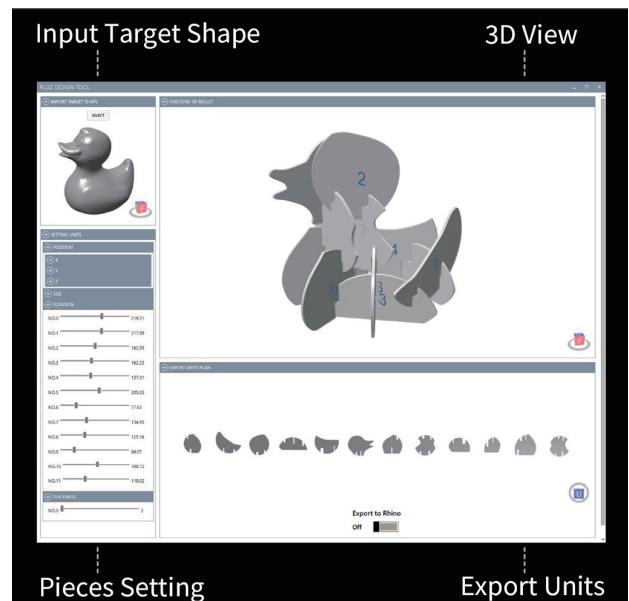


Fig. 6. User interface of the support tool

3.3 ランプ

厚さ2mmのチェリー材を用いて、卓上ランプシェードを制作した(Fig. 9). 消灯時には立体造形としての形態を鑑賞でき、点灯時には光が透過や隙間を通じて拡散し、周囲に特徴的な光のパターンを生み出すことを確認した. この事例は、本手法が造形表現に加えて機能的な要素を備え、空間演出に応用可能であることを示している.

4. 結論

本研究では、平面素材を空間的パズルとして組み立てることで立体造形を実現する新たな手法を提案し、設計から加工までを一貫して支援するツールを開発した. 本手法は、単に目標形状を再現するだけでなく、探索的かつ試行的な組立過程を通じて創造的推論や空間認識力を促す点に特徴がある. また、立体パズル、花瓶、ランプといった多様な応用例も示した. 本研究が、今後の実践において、より多くの人々の創作活動を支援するものとなることを期待する.

参考文献

1. N. Gershenfeld, "Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—from personal Computers to Personal Fabrication", Basic Books (2007).
2. M. McCullough, "Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand", MIT press (1998).
3. T. Ingold, "Making: Anthropology, archaeology, art and architecture", Routledge (2013).
4. Y. Wang, Y. Ren, T. Chen, "From Kirigami to Hydrogels: A Tutorial on Designing Conformally Transformable Surfaces", Journal of Applied Mechanics 90.4 (2023): 044801.
5. G. Saul, M. Lau, J. Mitani, T. Igarashi "SketchChair: an all-in-one chair design system for end users", Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction (2010).
6. J. McCrae, N. Umetani, K. Singh, "FlatFitFab: interactive modeling with planar sections", Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (2014).

fofo lab (fofolab.com) は、東京を拠点とするデザインスタジオであり、手やコード、そして好奇心を通して「かたち」が生まれる仕組みを探究している. デジタルファブリケーションを活用した立体造形の研究と応用に取り組み、オリジナルプロダクトの制作、企業・研究機関との共同研究、一般ユーザへの創作支援を主な活動としている. 直感的で習得容易な手法を開発し、専門知識を持たない人でも発想を立体的に具現化できる環境を提供している.



Fig. 7. Different shapes of 3D puzzle and the planar pieces



Fig. 8. Single Stem Vase: H260 x W120 mm



Fig. 9. Lamp: H190 x W180 mm

双晶変形型相転移メタマテリアルダンパー設計と評価： 地震振動減衰への応用に向けて

Design and Evaluation of Twin-Deformation Phase-Transforming Metamaterial Dampers:
Toward Applications for Seismic Vibration Damping

小泉 雄一郎¹, 廣岡 勢¹, 奥川 将行¹, 柳 玉恒¹, 川端 弘俊¹, 王 雷¹
柏 尚稔¹, 谷口 詩織¹, 中野 尊治²

Yuichiro KOIZUMI¹, Sei HIROOKA¹, Masayuki OKUGAWA¹, Yuhon LIU¹, Hirotohi KAWABATA¹, Lei WANG¹
Hisatoshi KASHIWA¹, Shiori TANIGUCHI¹, Takaharu NAKANO²

¹大阪大学 大学院工学研究科

¹Graduate School of Engineering, The University of Osaka

²東京科学大学 総合研究院

²Institute of Integrated Research, Institute of Science Tokyo

【Extended Abstract】

【要約】

本研究では、双晶変形を模倣した新しい相転移型メカニカルメタマテリアル(Twin-PXCM)を設計・造形し、その力学特性を評価するとともに、制振ダンパーとしての応用可能性を検討した。マルテンサイト変態を発現するメタマテリアル[Kanegae et al.,(2021)]をベースに、せん断変形前後の形状が左右鏡面对称となるように設計し、さらに、せん断面に対して鏡面对称にして折重ねて設計した Twin-PXCM を TPU 材料で 3D プリントし、せん断試験によりエネルギー障壁や荷重-変位挙動を評価した。その結果、設計パラメータに依存して履歴減衰特性を制御できることを確認した。さらに、Twin-PXCM を建物模型の間柱型ダンパーに適用して振動台実験を行ったところ、履歴減衰性能の発現が確認された。以上より、Twin-PXCM は、建築構造物の制振部材としての実用的な可能性を有することが示された。

キーワード: 相転移セル格子メタマテリアル, メタマテリアル, 双晶変形, 制振ダンパー

【Abstract】

In this study, we designed and fabricated a novel mechanical metamaterial, termed Twin-PXCM, which mimics deformation twinning, and investigated both its fundamental mechanical properties and its applicability as a vibration damper. The Twin-PXCM was modeled using Rhinoceros and Grasshopper and manufactured by extrusion-based additive manufacturing with TPU filament. Shear tests revealed that the energy barrier and load-displacement behavior can be tuned by controlling design parameters, leading to adjustable hysteresis characteristics. Furthermore, by implementing the Twin-PXCM as a column-type damper in a single-degree-of-freedom building model, shaking table tests demonstrated significant reduction in seismic response and the emergence of hysteretic damping. These results highlight that Twin-PXCM is not only a promising mechanical metamaterial with controllable phase-transforming behavior but also a viable candidate for practical vibration-damping applications in building structures.

Keywords: phase-transforming cellular metamaterial, metamaterial, twin deformation, seismic damper

1. 序論

近年、自然界には存在しない特性を発現する人工物質としてメタマテリアルの研究が盛んに行われている。原子レベルより大きなスケールで周期的構造を設計することで物質単体では実現できない特性を発現させることができ、特に力学特性を制御する「メカニカルメタマテリアル」は、付加製造(Additive Manufacturing: AM)技術の発展により大きく進展してきた。

その一例が相転移型格子構造体(Phase Transforming Cellular Metamaterial: PXCM)であり、二つの安定状態間の相転移によってエネルギー吸収やヒステリシスを示すことから、衝撃吸収材などとして期待されている[1-3]。従来の PXCM は主に圧縮荷重下で体積変化を伴う相転移により衝撃を吸収していた。結晶構造の対称性を応用して複数方向に相転移するメタマテリアル[2, 3]や、

熱誘起相転移により、温度変化で形状が回復する力学メタマテリアル[4]も開発された。

一方、鉄鋼や TiNi 合金に見られるマルテンサイト変態や双晶変形では、原子相対位置の変化によってせん断型格子変形が生じ、形状記憶効果や超弾性を発現する。これを模倣したメカニカルメタマテリアル (Martensitic PXCM: MPXCM) が提案されており、せん断変形に伴う飛び移り座屈により二つの安定状態間を相転移し有することが報告されている[5]。

本研究では、これまでの課題を踏まえ、双方向のせん断変形を可能とする「Twinning PXCM (Twin-PXCM)」を設計・造形し、その力学特性を評価することで構造と特性の関係を評価するとともに、MPXCM の履歴減衰特性を応用した間柱型メタマテリアルダンパーを建物模型に組み込み、振動台実験により地震応答低減効果を検証することを目的とする。

2. コンセプト

本研究では、Co-Cr 合金や Fe-Mn 合金で実際に発現し、制振材料としても利用されている双晶変形の機構に着目し、その挙動を模倣した Fig. 1 に示すような、2 次元格子構造を設計・評価することをコンセプトとした。4DFF2024 の予稿集 (p.45 OP-12) [6] も参照されたい。

面心立方構造の(111)面の積層は ABCABC で表され、このうち二層に一層のせん断を導入すると、積層順序は ACBACB となり、(111)面を基準とした鏡面对称の構造となる。このような原子積層の反転を伴うせん断変形が双晶変形である。双晶変形は、 $1/6[112]$ 、 $1/6[121]$ 、 $1/6[211]$ のいずれかの変位ベクトルを二層おきに導入することで実現し、原子は下層原子二つが構成する鞍点を越えて、変形前と同じエネルギーレベルの安定位置に移動する。一方、逆方向へのせん断は通常困難であるが、複数方向のせん断ベクトルを組み合わせることで、順方向と逆方向の両方の変形を格子モデルで表現

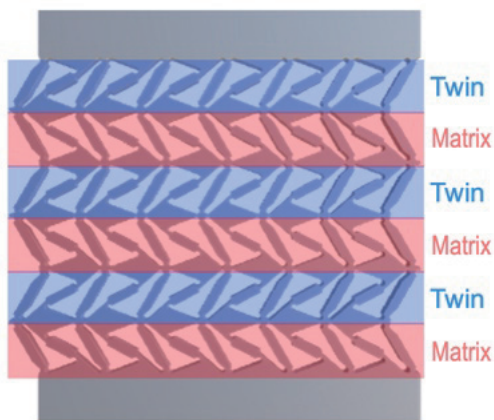


Fig. 1. Twin-PXCM model. Unit cells are arranged in a 6×6 array. In the initial state, the 1st, 3rd, and 5th rows form the matrix phase, while the 2nd, 4th, and 6th rows constitute the twin variants.

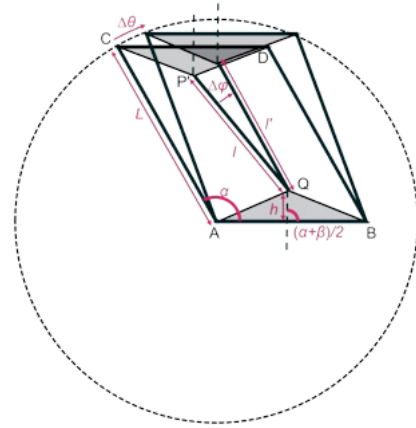


Fig. 2. Schematic showing the deformation which occurs according to the rotation angle of the long beam $\Delta\theta$. (Ref.: Kanegae et al. Materials, 16 (2023), 6854.)

できる。本研究ではこの特性を利用し、双方向のせん断変形を可能とする格子を設計し、その制振材料としての特性評価を行った。

3. 方法

Twin-PXCM の設計には、RhinoCeros, Grasshopper を用いた。設計した格子は、MPXCM の単位セルを 6×6 または 12×12 に配置し、偶数段を上下反転させて双晶構造を模倣した構造である。要素構造は左右に並べたセルを上下に積層し、上部と下部にせん断試験用のつかみ部を設けた。制御パラメータは、長梁の長さ L 、短梁の長さ l 、三角形の高さ h 、梁の太さ t_b 、弾性ヒンジの太さ t_h および厚さ b とした。

造形には材料押出 (Material Extrusion: MEX) 型 AM 装置 Raise3D Pro2 を使い、破断伸びが 400% 以上でヤング率 9.4 MPa を有する熱可塑性ポリウレタン (PolyFlex TPU95) で製造した。

試験では、造形した Twin-PXCM を治具に固定し、材料試験機によりせん断荷重-変位曲線を測定した。測定は初期状態からのせん断、形状回復、逆方向へのせん断とその回復の各過程で行った。さらに、Fig. 3 に示す試験器にて周波数掃引水平振動試験を行った [6]。

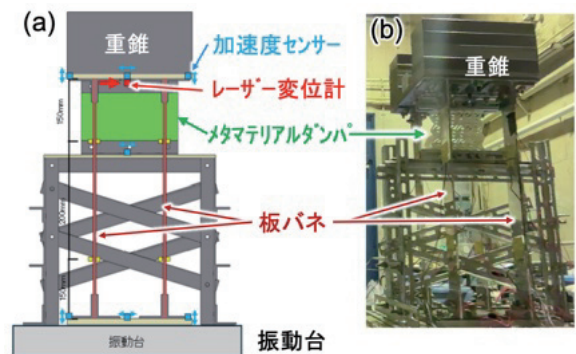


Fig. 3. Test apparatus for horizontal vibration damping: (a) schematic illustration, (b) photograph of the setup.

4. 結果

Fig. 4 (a)に $L = 20 \text{ mm}$, $h_b = 1 \text{ mm}$ の条件で造形した Twin-PXCM 計算から予測された弾性ひずみエネルギー曲線と、せん断にともなう梁の回転角度との関係、Fig.4(b) にそのエネルギーを回転角度 θ で微分して評価したトルクと回転角との関係を示す。

$h = 4 \text{ mm}$ 以上の場合には、 $\theta = 0^\circ$ の安定状態と $\theta = 60^\circ$ 近傍準安定状態の間にエネルギー障壁が存在する。そこで、 $h = 4 \text{ mm}$ と $h = 6 \text{ mm}$ の Twin-PXCM を造形し、万能試験機によるせん断試験を行った。

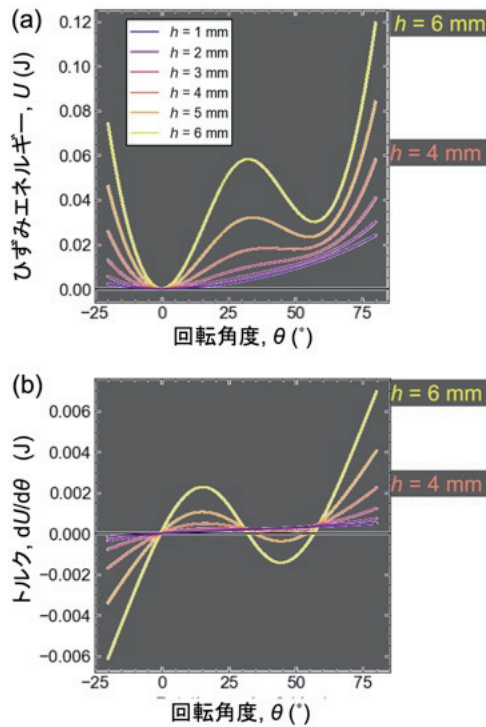


Fig. 4. Theoretical deformation response of a unit cell of MPXM: (a) strain energy vs. rotation angle, (b) torque vs. rotation angle for various cases with different

Fig 5 に造形したせん断型 PXCM の相転移の様子を示す。局所的な構造(相転移する層)は、せん断にともなって変化し、NiTiなどの熱弾性マルテンサイト変態にて生じる双晶バリエーションの双晶変形と同様の挙動を示した。

しかしながら、Fig.6 に示すせん断荷重変位曲線には、 $h = 4 \text{ mm}$ の場合には、期待していたような相転移にともなう荷重の変化は認められなかった。この理由として、 $h = 4 \text{ mm}$ では、エネルギー障壁は比較的小さいことがあげられる。実際には、角度変化にともなう高さの変化を制限する拘束条件が加わることもあり、 $h = 4 \text{ mm}$ の場合の準安定状態は、実際には不安定となった可能性がある。 $h = 6 \text{ mm}$ の場合には、相転移にともなうせん断荷重の変化が明確に認められた。さらに、せん断荷重時の変形にともなう曲線と(橙線)と、除荷時の曲線(青線)と

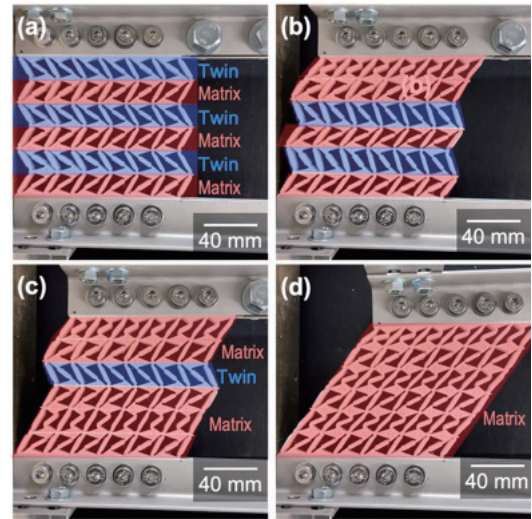


Fig. 5. Shear deformation test of a 6×6 Twin-PXCM metamaterial: (a) initial state, (b) intermediate stage of deformation, (c) after completion of twinning deformation. The matrix and twin regions are highlighted in red and blue, respectively.

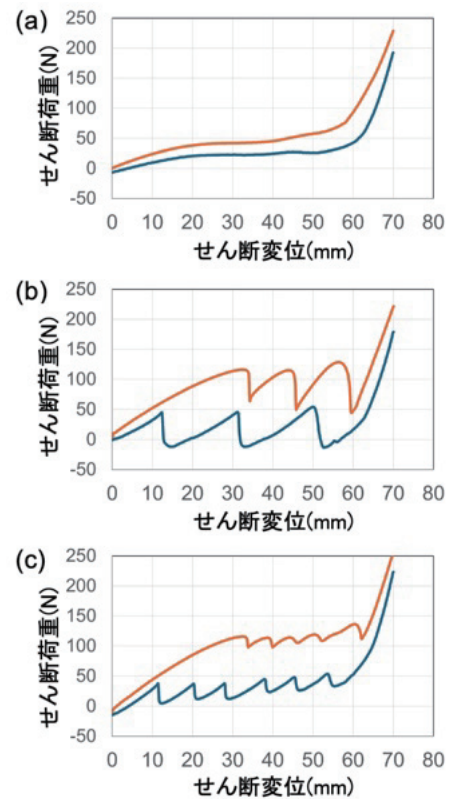


Fig. 6. Shear force-shear displacement curves for the Twin-PXCM sample consisting of 6×6 cells, with thickness of the sample b of 10 mm, with the height of triangular beam h of (a) 4.0 mm and (b) 6 mm.

の間には、大きなヒステリシスが存在する。これにより、繰り返しせん断変形においては、エネルギーを熱として散逸し、振動を減衰する効果を発現すると期待される。

そこで、 $h = 6 \text{ mm}$ の場合の Twin-PXCM を作製し、水平振動の減衰試験に供した。その様子を、Fig.7 に示す。

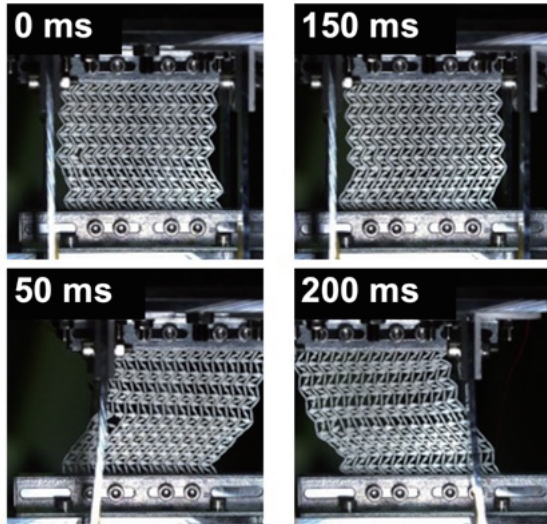


Fig. 7. Twin-PXCM under horizontal vibration, recorded by a high-speed camera. The upper-left time denotes elapsed time from the start of recording.

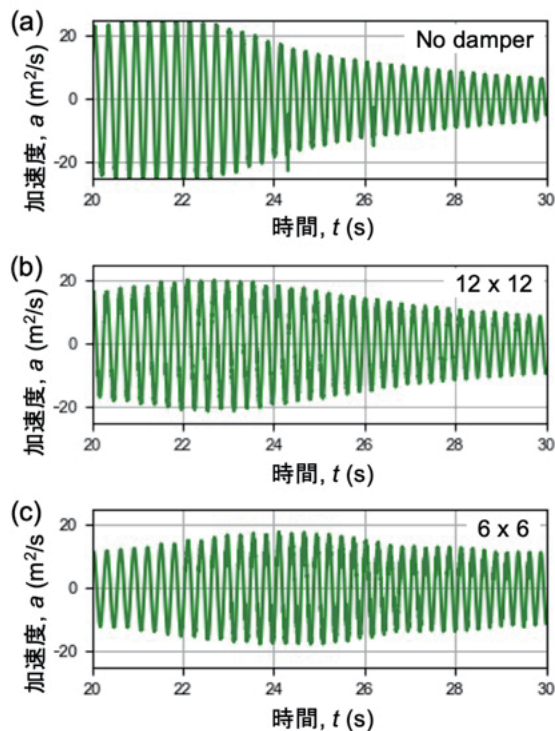


Fig. 8. Acceleration response during frequency sweep test. (a) Without metamaterial dumper, (b) with 12 x 12 twin-PXCM metamaterial dumper, (c) 6 x 6 twin-PXCM metamaterial dumper

期待通りせん断型相転移を発現する格子を製造することができた。せん断変形により高さの変化のないという特徴を活かして、高さの変化なく衝撃を吸収したり振動

を減衰することが求められるデバイスとして応用できる可能性がある。具体的には、地震の横揺れから建物を守る免震構造において振動を減衰するための減衰材として、現在用いられているダンパーや鉛プラグなどの代替として、メンテナンスフリー化や環境への負荷低減に貢献することが期待される。

5. 結論

以上のように、本研究では、双晶変形を模倣した 2 次元格子のせん断型 PXCM を設計し、MEX 方式の AM 装置にて、TPU を用いて製造した。開発したせん断型 PXCM は、相転移にともなう高さの変化なく、正逆両方向のせん断変形による相転移(双晶変形)を実現した。この構造体は、高さの変化をとまわずに、地震による横揺れ振動の減衰に有効であることが実証された。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP25H00802, JP25K2217, JP22K18889, 21H05193) の支援を受けたものです。

参考文献

1. S. Kanegae, M. Okugawa, Y. Koizumi, Development Of Shape Memory And Shock Absorbing Metamaterials Using 3D Printing, *J. 4D Funct. Fabr.*, **1**, (2020), 1–8.
2. S. Kanegae, M. Okugawa, Y. Koizumi, 代表体積要素モデルを用いた有限要素法による 多軸双安定構造の大変形挙動解析, *計算力学***27**, (2022), 2–6.
3. M. Okugawa, S. Kanegae, Y. Koizumi, Multi-axed phase-transforming cellular material: A data-driven design and validation using finite-element method and machine learning, *Extrem. Mech. Lett.* **77** (2025) 102319. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2025.102319>.
4. H. Nagayama, S. Kanegae, M. Hosoda, M. Okugawa, Y. Koizumi, Thermally induced phase transforming cellular lattice driven by bimetal beams, *MRS Adv.*, **7**, (2022), 701–705.
5. S. Kanegae, M. Okugawa, Y. Koizumi, Martensitic Phase-Transforming Metamaterial: Concept and Model, *Materials (Basel)*, **16**, (2023), 6854.
6. 小泉雄一郎, 廣岡 勢 鐘江 壮介 奥川 将行, 双晶変形を模倣したせん断相変態格子構造体の設計と特性評価, *4DFF 研究会講演予稿集*. (2024) 45–48.
https://sig4dff.org/conference/2024/proceeding/4DF F2024_proceedings.pdf.
7. 谷口詩織, 柏尚稔, 中野尊治, 小泉雄一郎, 力学メタマテリアルダンパーの効果検証実験, *日本建築学会 2025 年度大会 (九州) 学術講演梗概集*, 21305 (2025) p. 609.

柔軟でつよく、液体にやさしい—— DN ゲルを用いた自己調整型 4D ゲルシール

Self-Adjusting 4D Sealing with Tough and Flexible Double Network Gels

山崎春翔 古川英光

Haruto YAMAZAKI Hidemitsu FURUKAWA

山形大学

University of Yamagata

【要約】

高性能なシールは小型ポンプの信頼性を左右する重要要素である従来用いられるメカニカルシールは複雑かつ高価で、液体成分に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、柔軟性と強度を併せ持つ高強度ダブルネットワークゲル(DN ゲル)に着目し、Oリング型ゲルシールを作製した。ゲルの自己潤滑性と柔軟な密着性を活かし、回転軸との接触部で高い密封性と低摩擦性の両立を目指す。作成した試料に対し、水圧環境下での漏洩挙動と回転摩擦特性を同時に計測可能な実験系を構築し、シール厚さや軸方向の押し付け量の違いが性能に与える影響を比較検討した。今後は軸の回転や摩耗状況などの外的条件に応じて自己調整的に機能を維持・変化させる「4D シール」の実現を目指している。本研究は、やわらかい応答性材料による次世代の回転機構用シールの可能性を拓くものであり、血液ポンプや食品移送用ポンプなどへの応用が期待される。

キーワード: DN ゲル, 回転軸シール, 低摩擦・高密封性

【Abstract】

High-performance seals are a critical factor determining the reliability of small pumps. Conventional mechanical seals are complex, expensive, and may affect liquid components. Therefore, this study focused on high-strength double-network gel (DN gel), which combines flexibility and strength, to fabricate an O-ring-type gel seal. Leveraging the gel's self-lubricating properties and flexible adhesion, the goal is to achieve both high sealing performance and low friction at the contact point with the rotating shaft. An experimental setup capable of simultaneously measuring leakage behavior under water pressure and rotational friction characteristics was constructed for the fabricated samples. The effects of seal thickness and axial contact force on performance were compared and evaluated. Future research aims to realize a “4D seal” that self-adjusts to maintain or alter its function in response to external conditions such as shaft rotation and wear. This research opens possibilities for next-generation seals for rotating mechanisms using soft, responsive materials, with anticipated applications in blood pumps and food transfer pumps.

Keywords: Double Network Gel, Rotary Shaft Seal, Low Friction and High Sealing Performance

1. 緒言

回転軸用シールはポンプや回転機械において流体漏れを防止し、機器の信頼性や効率を維持する上で極めて重要な要素である。

従来のメカニカルシールは高い密封性と低摩擦性を実現しているが、耐摩耗性や潤滑油の必要性が原因で、生体液中で使用すると血球の破壊や血栓形成を誘発するリスクがある。例えば軸流血液ポンプでは、シール接触面の温度上昇により血栓リスクが増大することが報告されている。[1]このため、医療デバイスへの応用には大きな制約が存在する。

一方で、高強度ダブルネットワークゲル(DN ゲル)は、異なる二種類の高分子ネットワークを組み合わせることで、高い機械的強度と耐久性を併せ持つ材料である。[2] また、ハイドロゲルは高い親水性と高い膨潤性を有し、優れた吸水性と膨潤性、独特の柔軟性、延性、生体適合性を持つ。[3]これらの特性を活かすことで、シン

ブルかつ低コストで製作可能な新しいタイプの回転軸用シールの実現が期待される。特に、潤滑油を必要とせず水を含ませることで潤滑させることができる点は、従来のメカニカルシールに比べて大きな優位性を持っている。

本研究では、DN ゲルをリング状に加工し、回転軸用シールとしての性能評価を行うことを目的とした。そのために、水圧環境下での漏洩挙動と回転摩擦特性を同時に計測可能な実験系を構築した。この装置を用いてシールの厚さや軸方向の押し付け量といった設計パラメータが、摩擦・漏れ特性に与える影響を系統的に評価した。さらに、各条件における摩擦トルクの時間的変化も詳細に記録・解析し、ゲル表面の自己潤滑特性や、環境に適応して性能を最適化する「4D 材料」としての自己調整機能についても考察した。

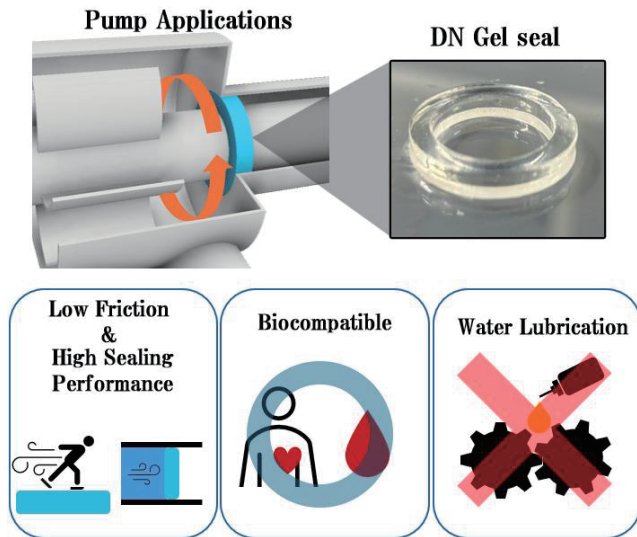


Fig1.Key Features of the DN Gel Seal

2. 実験準備

2.1 DN ゲルシールの作成

本研究では、高強度ダブルネットワークゲル(DNゲル)を用いた O リング型シールの密封性能および摩擦特性を評価するために、上下回転型試験機 TL901 に漏れ試験用アタッチメントを組み合わせて実験を行った。Fig1 に DN ゲルシールの概要を示す。

本研究で用いた DN ゲルは強電解質で硬くて脆い高分子ネットワーク(1st ネットワーク)を持つゲルと中性で柔軟なネットワーク(2nd ネットワーク)を持つゲルが分子レベルで交じり合った構造をしており、1つのネットワークしかないゲルに比べ 100 倍もの強さを持つ。一方で作成の際に膨潤させる過程を経るため、自由な形状への成形が困難である。そのため、まずシート状の DN ゲル(3,5,7[mm]幅)を作成した。シート状の DN ゲルを作成する手順を以下に示す。

- ① 1st ネットワークを有するゲル(以下、1st ゲルと呼ぶ)の溶液を作成し、シート状の型に流し入れ UV BOX で波長 365[nm]の紫外線光で 180 分間照射する。(この時のシートの厚さは目標寸法の 1/3 程度にする)
- ② 2nd ネットワークを有するゲル(以下、2nd ゲルと呼ぶ)の溶液を作成し、①で作成した 1st ゲルを 2nd ゲル溶液に浸す。
- ③ 一日以上膨潤させる(この時厚さが 2 倍程度に膨張する)
- ④ 2nd ゲル溶液から 1st ゲルを取り出し、ガラス板で挟み、輪ゴムで固定する。(表面を均一にするため)
- ⑤ UV BOX で波長 365[nm] の紫外線光で 180 分間照射する。

- ⑥ 照射後に完成したゲルシートを精製水に浸し二日以上膨潤させる。この時、目標寸法よりも大きくなってしまうように、シリコンスペーサを用いてガラス板でゲルシートを挟む。

完成したゲルシートを、レーザーカッターを用いて直径 20 [mm]の回転軸に適合するように、内径 20[mm],外径 30[mm]のリング状に加工した。作製したゲルリングは試験装置に装着して性能評価に用いた。Table1 に DN ゲルの組成を示す。

Table1.Composition table of DN gel

	Monomer	Cross-Linker	Initiator
1st gel	DMAAm	MBAA	α -keto
2nd gel	NaAMPS	MBAA	α -keto

2.2 摩擦・漏れ特性評価装置の構築

本実験に用いた評価装置の概要をFig2に示す。基本装置として上下回転型試験機 TL901 を採用し、回転中の摩擦トルクをトルクセンサーにより計測した。DN ゲルシールを所定の圧縮率で固定し、かつ水圧を付加するという本研究特有の条件を実現するため、専用のアタッチメントを 3D プリンタ(Form 4)で作製した。本アタッチメントは固定具とねじを用いて DN ゲルシールを挟み込み、特定の寸法分圧縮させることができる。また、空気圧によって水に圧力を加えることで、シール界面に水圧を作用させ、漏洩挙動を評価するシステムを構築した。

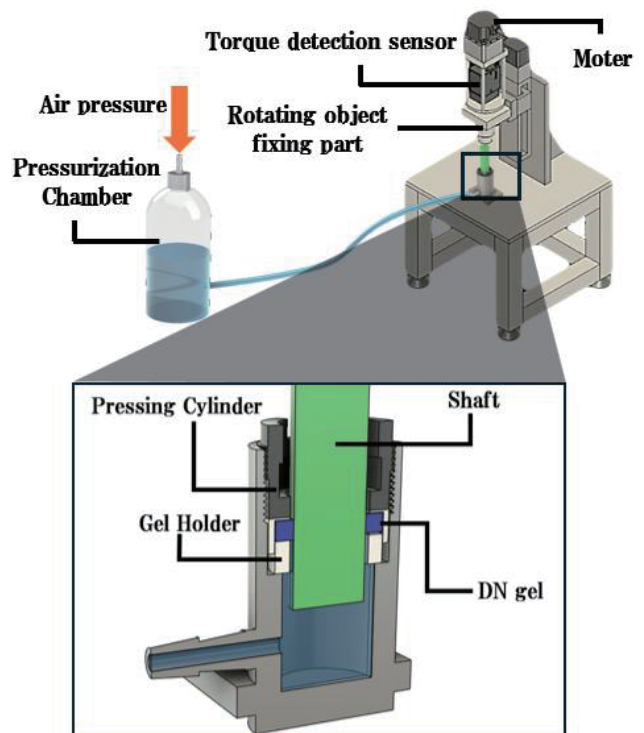


Fig2.Schematic Diagram of the Experimental Apparatus

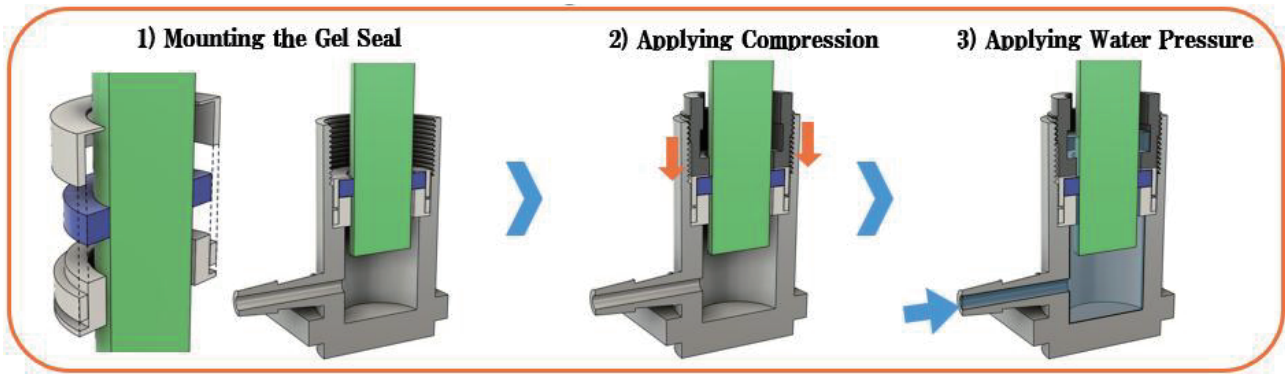


Fig3. Experimental Setup Procedure

3. 実験及び結果

3.1 実験方法

本実験では、直径 20 [mm]の回転軸に DN ゲルシールを装着し、摩擦試験機 TL901 に取り付けアタッチメントを用いて評価を行った。作製した DN ゲルシール(厚さ 3, 5, 7[mm])を専用アタッチメントに装着し、ねじの締め込み量を調整することで、各シールの厚さに対して圧縮率が 10, 15, 20%となるように設定した。本実験のセットアップ手順を Fig3 に示す。シール下部より 0.1 [MPa]の水圧をかけた状態で、回転軸を 20[rpm]の一定速度で 60 分間連続回転させた。回転中の摩擦特性は、トルクセンサーを用いて摩擦トルクとして連続的に記録した。シール性能については、60 分間の運転終了後に、漏れ出た水の総質量を開始前の質量から差し引くことで総漏れ量を算出した。漏れ水の質量計測には 0.001[g]精度の電子天秤を用いて測定した。また、本実験における漏れ量の測定上限は 3.0mL とし、これを超えた場合はシールが機能していないものと判断した。

以上の手順により、ゲルの厚さおよび圧縮率が摩擦・漏れ特性に与える影響を評価した。全 9 条件において、それぞれ 3 回ずつの試行を行い、厚さと圧縮率がシール性能に与える影響を評価した。

3.2 実験結果

実験の結果、3[mm],10%,15% 5[mm],10%の条件にて、漏れ量が許容量を超えてしまい、測定不能であった。また、3[mm],20%の条件で 3 回の試行中 1 回だけ漏れ量が許容量を超えてしまい、測定不能であった。一方厚さ 7[mm]の場合、どの圧縮率でもシール性能を維持していた。最も安定したシール性能を示した厚さ 7[mm]のゲルにおける圧縮率と漏れ量の関係を Fig4 に示す。

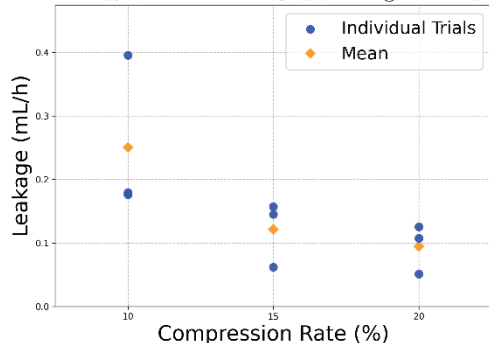


Fig4. Effect of Compression Rate on Leakage (7mm)

Fig4 より、圧縮率を高めるほど漏れ量が低減する傾向が見られた。また、圧縮率 20%のときに漏れ量が約 0.10[mL/60min]となり、優れたシール性能を持っていたということが分かる。

次に、今回の実験で測定することができた条件の測定結果について、漏れ量と摩擦トルクの関係を Fig5 に示す。Fig5 より、シールの厚さが大きいほど漏れ量が少なくなる傾向が示された。また、厚さ 3[mm]のシールは圧縮率 20%で、厚さ 5[mm]のシールは圧縮率 15%以上でしかシール性能を持たなかった。

一方で、摩擦トルクに関してはこれと逆の傾向が見られた。ゲルの厚さ及び圧縮率が小さい条件において、摩擦トルクが低減した。特に 3[mm]厚のデータは、平均 0.02 [N・m]という全測定中で最小の摩擦トルクを示した。対照的に、最も密封性に優れる 7[mm]厚のゲルは、総じて最も高い摩擦トルクを示した。

また、Fig6 にゲルシールの摩擦トルクの時間推移を示す。Fig6より、測定時に摩擦トルクが時間とともに減少する傾向が見られた。どの厚さ、圧縮率のゲルシールでもこのような傾向が見られた。

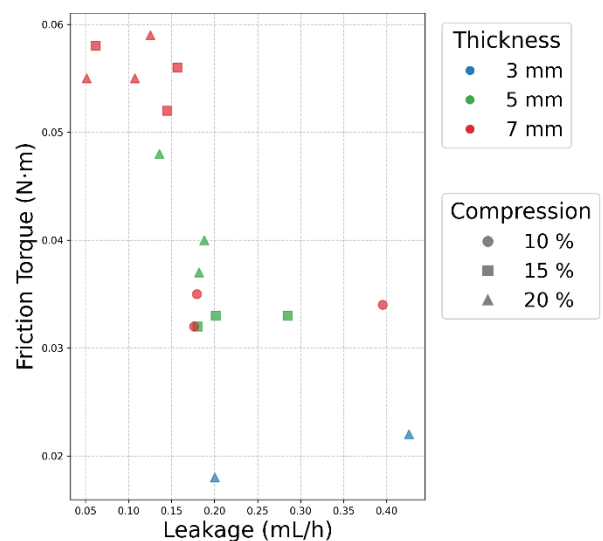
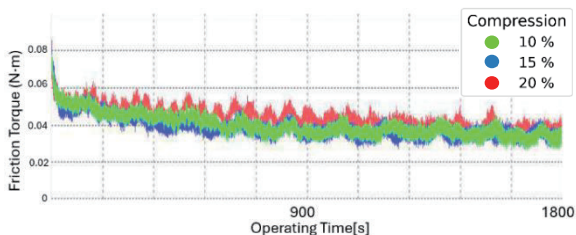
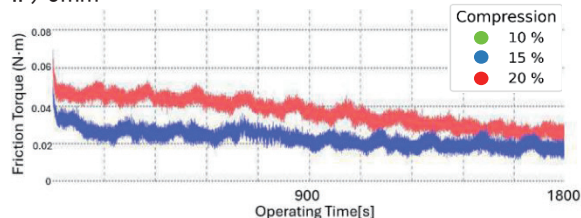


Fig5. Performance Map of DN Gel Seal by Thickness and Compression Rate

i) 7mm



ii) 5mm



iii) 3mm

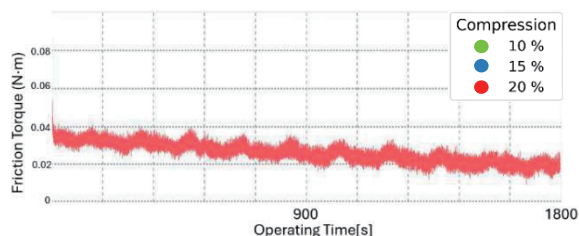


Fig6. Temporal Change of Friction Torque

4.考察

実験結果より、厚いゲルほど低い圧縮率でシール性能を発揮するため、絶対的な変形量が必要であると考えられる。また、ゲル厚の増加に伴い接触面積が増大するため、軸の微小なぶれに対応しやすく、シール性能を維持しやすかったと考える。

一方で、摩擦トルクに関しては厚いゲルほど摩擦が増大するという関係が見られた。これは、ゲル厚の増加に伴い接触面積が増大することで、摩擦トルクが増加したと考える。

また、どの条件においても摩擦トルクが時間とともに減少していることが分かる。これは一般的なゴム製Oリングにも見られる傾向であり、同様の傾向がゲルシールにも見られることが分かる。[4]また、この性質はシールが運転環境に応答し、自らの摺動特性をよりエネルギー損失の少ない状態へと最適化する4Dの要素を持ち合わせていると考える。

5.結言

DN ゲルシールは、厚さと圧縮率を適切に設定することで、漏れ量を約 0.1[mL/60min]に抑える優れた密封性能を発揮することを実証した。また、シールの性能は、厚さと圧縮率に強く依存し、それぞれ漏れと摩擦の間に相反関係が存在することを明らかにした。厚さを増す、あるいは圧縮率を高めることで密封性は向上するが、摩擦も増大する。本実験範囲では、厚さ 7[mm]、圧縮率 20%の場合では、漏れ量が少なかったが摩擦トルクが大

きくなった。また、運転開始後、時間経過と共に摩擦トルクが自己低下する現象を観測した。これは、環境にตอบสนองして性能を自律的に最適化する4Dゲルシールの実現可能性を示す重要な知見である。以上の結果より、DNゲルが従来のシール材に代わりうる高いポテンシャルを持つことがわかった。

今後の課題は、密封性と摩擦トルクの相反関係を克服し、低漏洩と低摩擦をさらに高いレベルで両立させることである。その実現に向け、表面加工といったアプローチの有効性を検証する。さらに、長期的な耐久性評価や、多様な運転条件下における性能限界を明らかにすることで、本4Dゲルシールの実用化を目指す。

6.謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、「NEDO 先導研究プログラム／マテリアル・パイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004)、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期／バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO)(JPNP23025)、JSPS 科研費(基盤 A JP23H00498、JP25H00890、基盤 C JP24K12997、JP24K15231)、ムーンショット農林水産研究開発事業(MS511)等によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Tomioka, J., Mori, T., Yamazaki, K., & Koyanagi, H. (1999). Sealing properties of mechanical seals for an axial flow blood pump. *Artificial organs*, 23(8), 708–711.
2. 中島祐, 田中良巳, 古川英光, 黒川孝幸, & 龔剣萍. (2008). 超高強度 Double Network ゲルの創製とその高強度化メカニズム. *高分子論文集*, 65(12), 707–715.
3. Ning, X., Huang, J., A, Y., Yuan, N., Chen, C., & Lin, D. (2022). Research advances in mechanical properties and applications of dual network hydrogels. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 15757.
4. Jin, L., & Che, L. (2024). Experimental study on stress relaxation of rubber O-ring for mechanical seal. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2691, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

平行切り込み切り紙の面外回転

Out-of-plane rotation of parallel-cut paper

家木 千里, 舘 知宏

Chisato IEKI, Tomohiro TACHI

東京大学

The University of Tokyo

【要約】

平行な切り込みを施した薄いシートをせん断変形させると、切れ目により分割された細い材が座屈し面外変形する。本研究では、FEM を用いてその変形過程を再現し、切り紙の厚みや切れ込みの間隔といった切り紙の形状特性を変化させた際の面外回転角と層間変移角の関係について調べた。さらに、変形過程の展開図のルーリング変化の観察をもとに簡易的な折紙モデルを提案し、任意の回転量をもつ切り紙シートの設計可能性を探る。また応用として、鏡面素材を用いて切り紙を作成することにより、材が面外回転した際にシートの裏面・表面とで二回反射して透明素材のように振る舞うことについて報告する。

キーワード: 切り紙, 面外回転, シミュレーション, 折紙モデル

【Abstract】

When a thin sheet with parallel cuts is subjected to shear deformation, the narrow strips separated by the cuts buckle and undergo out-of-plane deformation. This study used FEM to reproduce this deformation process and investigated the relationship between the out-of-plane rotation angle and the interlayer displacement angle when varying the geometric characteristics of the kirigami, such as its thickness and cut spacing. Furthermore, based on observations of ruling changes in the unfolded patterns during deformation, a simplified origami model is proposed to explore the design possibilities for kirigami with arbitrary rotation amounts. As an application, it is reported that by creating kirigami using mirror-like materials, the material behaves like a transparent material when rotated out-of-plane, reflecting twice -once on the surface and once on the buck surface.

Keywords: kirigami, out-of-plane rotation, simulation, origami model

1. はじめに

単純な切れ込みのパターンを持つ切り紙は、梱包材や七夕飾りの装飾などとして身近に用いられている。引っ張りから座屈を起こして立体構造が生まれるため、科学・工学・芸術においても着目されている。例えば、伸縮性電子デバイス向けに折紙の技術と組み合わせた折り畳み可能な切り折り紙構造の研究[1]や、切り紙の伸長性を太陽電池の光学追尾システムに応用した例[2]のほか、Ron Resch 氏による切り紙で形成された多様な形状の貝殻のアートワーク[3]などが挙げられる。

本研究では、七夕飾りの貝殻や提灯に用いられるものと同様の平行な切り込みのパターンを扱う。平行切り込み切り紙を、あらかじめ少し S 字状に撓ませてからせん断変形させると、切れ目により分割された細い材が座屈し面外変形することがわかった。

この平行切り込みパターンでの切り紙に関する先行研究としては、多様な形状の切り紙に引張力を加えた時の曲面形状分析[4]はあるが、面外回転の挙動について扱ったものは見られない。また、面外回転変形に関しては鋼性スリットせん断壁のエネルギー消散能力に関する研究[5]など、塑性変形によるエネルギー吸収に関

しての研究はみられる一方で、その変形過程や形状、特に弾性変形について扱ったものはみられない。

そこで、本研究においては平行切り込み切り紙の面外回転の挙動を有限要素法によって再現し、切り紙の厚みや切れ込みの間隔および初期形状といった、切り紙の形状特性を変化させた際の面外回転角と層間変移角の関係性について調べた。そしてこの結果をもとに挙動を説明する単純なモデルとして、折紙モデルを作成した。また、この面外回転挙動を応用し、平行切り込み切り紙を鏡面素材で作成した際に現れる光学的性質について紹介する。

2. 研究手法

2-1. 定義および変数

まず、ことばの定義について説明する。

- ・帯…隣接する2本の切れ込みの間の領域。
- ・帯の幅…隣接する2本の切れ込みの間隔。
- ・たわみの振幅…シートを S 字状に撓ませたとき、初期直線位置から最も離れた位置までの横方向変位量。
- ・平行端線…切れ込みに対して垂直な、シート上下のエッジ。

続いて、シミュレーション結果を分析するために用いる変数について説明する。

- ・層間変移角…平行端線が形成する、せん断変形の角度。
- ・面外回転角…帯を構成する2本の切れ込みの中点を結んだベクトルが、平行端線となす角。
- ・面外回転率…面外回転角を層間変移角で除した値。

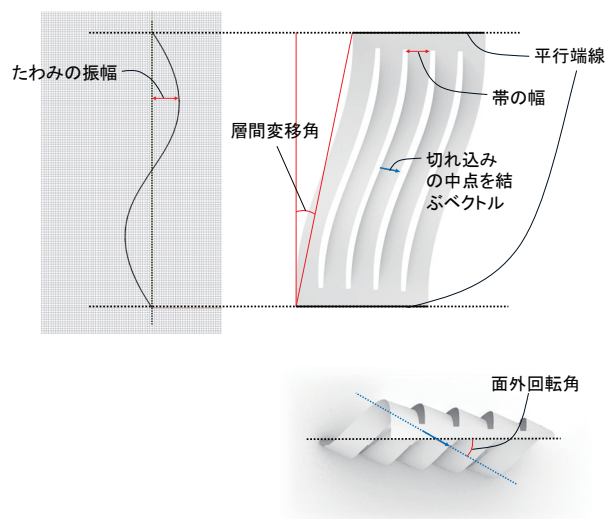


Fig.1. Definition diagram

2-2. シミュレーション

平行切り込み切り紙の変形過程を再現するにあたって、ダッソー・システムズ社が開発した統合有限要素解析 (FEA) ソフトウェアである Abaqus を用いた。

サーフェスモデルのデザインには Rhinoceros + grasshopper を用い、それを Abaqus にインポートして shell のパートを作成した。解析には Static General (静的解析) のモードを用いた。Nlgeom(非線形幾何変化)をオンにしておくことで、幾何学的非線形解析が可能である。

境界条件は、シート下端について、全ての並進運動及び回転運動を拘束、シート上端について、変移を与える方向の並進運動及び全ての回転運動を自由にしそれ以外の運動を拘束した。その条件下において、シート上端に対して最大変位量を設定し、時間内にその座標まで強制変移させることでせん断変形の挙動を再現した。そして、Abaqus でシート中央において帯幅を形成する2点の座標を追ひ、その2点のデータから帯幅方向のベクトルを作り、これを水平面に投影したベクトルとシート上下端方向のベクトルとの内積をとることで帯の面外回転角を求めた。

本研究では帯の幅、シートの厚み、初期形状(たわみの振幅)を変化させた際の帯の回転量と層間変移角の関係について調べる。基本となるモデルを、帯の幅 10mm、厚さ 0.5mm、帯の長さ 113.168mm、たわみの振幅 11.53mm とし、調べる形状特性以外については基準

モデルの寸法を採用してシミュレーションを行った。帯の幅については 5mm, 10mm, 20mm, 30mm で比較、厚さについては 0.05mm, 0.125mm, 0.25mm, 0.4mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm で比較、たわみの振幅については 0.5 倍, 1 倍, 2 倍, 3 倍で比較した。

2-3. ルーリング変化の読み取り

材料が十分に薄いとき、面内変形が相対的に起きにくいいため、可展面としてふるまう。従って、その幾何形状を可展面のルーリング(直線エレメント)で記述することを考える。可展面は、平面を除き、柱面、錐面、接線曲面の三つに分類される。(Fig.2.)ここでは、それぞれの可展面を構成するルーリングを“cylinder タイプ”、“cone タイプ”、“tangent タイプ”と呼ぶこととする。

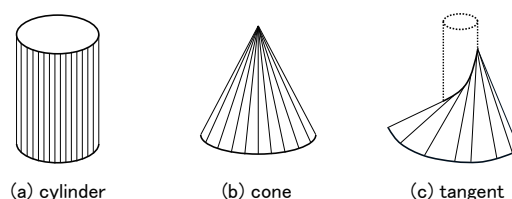


Fig.2. 3 types of developable surfaces and their rulings

本研究では平坦なシートの弾性変形過程を調べることから、変形過程のオブジェクトの中央の帯に着目して、その展開図のルーリングの入り方の変化を追うことで変形過程の立体形状の変化について理解することができると考えた。Abaqus でシミュレーションを行った厚み 1mm のモデルについて、変形過程のオブジェクトを追ひ、それらを Rhinoceros にエクスポートしてシート中央の帯を可展面に近似することによって、ルーリングの情報が含まれた帯の展開図を作成した。

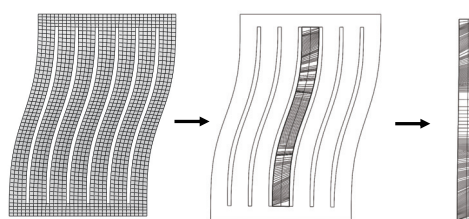


Fig.3. Process of generating the unfolded pattern of the strip

3. 回転量と層間変移角の関係

種々の切り紙の形状特性を変化させた際の回転角と層間変移角の関係を示したのが、Fig.4.である。全てのグラフにおいて、回転角のピークが確認された。グラフのピーク前後におけるオブジェクトの挙動を Abaqus 上で確認したところ、帯の端部、すなわち切れ込みの開始点付近でピーク通過後に特に応力がかかっていることが確認でき、そこで材料の伸びが発生することによって面外回転量が減少することが推測される。本研究においては、弾性変形内での面外回転挙動を扱うため、以降のグラフの考察においては、基本的にピーク手前

の、回転角と層間変移角が線形に近い関係を持って変化する領域に着目する。

続いて、切り紙の形状特性と面外回転挙動の関係について順番に見ていく。まず Fig.4.(a)帯の幅について、この変数を変えても、回転角と層間変移角の間に有意な差は見られなかった。このことから幅の変化は、回転角と層間変移角の関係にほとんど寄与しないことがわかった。また、(b)厚みを 0.05mm, 0.125mm, 0.25mm, 0.4mm, 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm と変化させた際には、厚みが小さいほど回転量が減る傾向が読み取れる。回転量が線形な領域における面外回転率はそれぞれ 4.30, 4.16, 3.23, 3.11, 3.03, 2.83, 2.43, 1.99 であり、厚みと面外回転率の両対数グラフ(Fig.4.(b'))を見ると、厚みが 0 に近づくほどグラフの傾きが 0 に収束することがわかる。このことから材が限りなく薄い場合には変形による伸び縮みが生じないため、材料特性に依存せず幾何学的に形状が決まることが推察される。一方、回転角と層間変移角の関係に特に影響が大きかったのは、(c)初期形状(たわみの振幅)である。振幅を 0.5 倍, 1 倍, 2 倍, 3 倍と変化させた時、線形関係に近似できる領域(ピークにおける層間変移角の半分の値までの領域とした)における面外回転率は 5.63, 3.03, 1.64, 1.12 であった。振幅が小さいほど、面外回転率が大きくなる。また、振幅が大きいほどシートが弾性変形する範囲の層間変移角の最大値は増えるのに伴って回転角の最大値も増えることがわかった。このことから、振幅として与えた初期不整があることによって座屈の起き方がより穏やかになっていると考えられ、振幅を少なくすれば、わずかな層間変移で顕著な面外回転挙動を起こすことが可能であると考えられる。

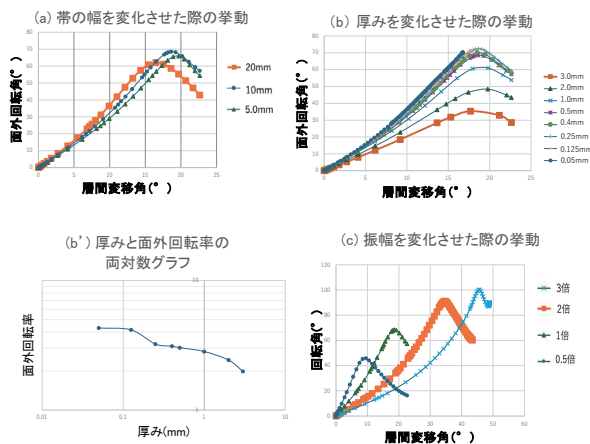


Fig.4. (a) strip width, (b) thickness, and (c) amplitude: their effects on the relationship between interlayer shear angle and out-of-plane rotation angle

(b') relationship between thickness and out-of-plane rotation ratio

4. ルーリング変化

Fig.5.は基本モデルの変形過程のオブジェクトと、それに対応する帯の展開図であり、右に行くほど層間変移角が大きくなるように配置している。この展開図に描かれたルーリングをだまかに見ると、端部に二つの cone タイプのルーリング、中央部に cylinder タイプのルーリングが入っている。そして、端部の cone タイプのルーリングの帯端線に対する入り角は、変形が大きくなるにつれて鋭くなる傾向が読み取れた。

実際に Rhino 上で得た展開図をより簡易的に解釈し直したのが Fig.6.(b)である。このように、帯端部に cone タイプのルーリングが入ることは、端部にねじれ線が入ることによって面外回転が生じることを説明している。そしてねじれ線の帯端線に対する入り角が鋭くなることによって、曲げに寄与する部分の長さが大きくなるのに伴い、面外回転量が大きくなっていると推測される。

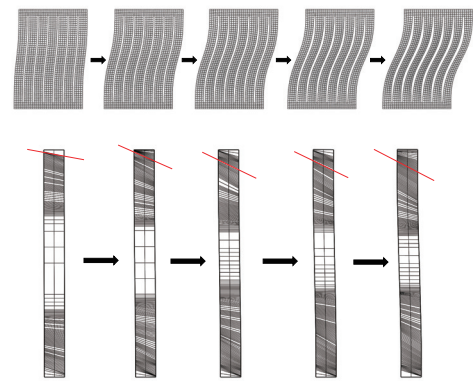


Fig.5. 3D deformation of kirigami structures and the corresponding rulings in the unfolded pattern

5. 折紙モデル

薄い材料のモデルにおいてはほとんど伸び縮みが生じないため、シートは可展面として振る舞い曲げだけで形状が決まっているといえる。よって、ルーリング変化の観察結果をもとにして折り目を設計することで、薄い材料の面外回転挙動における形状を離散化し、シンプルに折り目だけで表現することが可能であると考えた。

そこで、座屈による面外回転挙動を説明する簡易的な折紙モデルとして、cone タイプの二つの可展面の接続部分として現れるねじれ線を折り目としてみたモデルを提案する。Fig.6.に折紙モデル作成のためのルーリングの読み取り過程を図示した。(a)実際のルーリングによると、折り目は端部に2本ずつ存在するが、(c)折紙モデルの折り目で示したように、cone と cylinder の間の折り目を省略することでなるべく自由度を少なくし扱いやすくなった。

本モデルは帯に対する折り目の入り角 α 、及び折り目における折れ角 β の二自由度によって、平行端線間距離 x 及び層間変移角 θ の二自由度が定まる。grasshopper を用いて、このモデルを視覚化した。

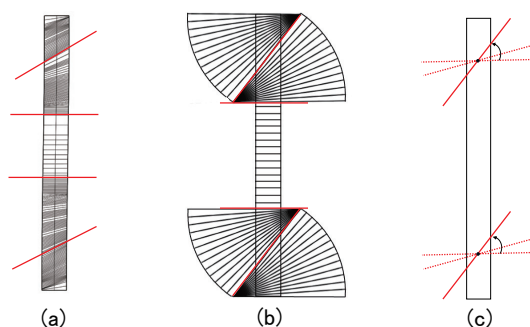


Fig.6. Process of origami modeling
(a) actual ruling (b) simplified ruling (c) creases in the origami model

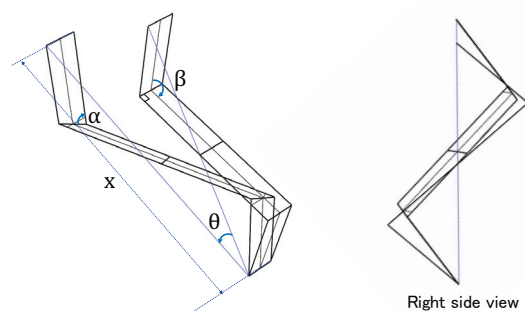


Fig.7. Variables of origami model

6. 応用

平行切り込み切り紙の面外回転挙動を応用し、鏡面素材を用いた場合に現れる光学的性質について紹介する。鏡面素材で切り紙を作成すると、シート裏側からの光が、帯の裏面と、その隣に位置する帯の表面とで二回反射する。これにより、鏡面素材があたかも透明素材のように振る舞うことが確認できた。つながるかたち展04では、この性質を利用した作品を展示した(Fig.8.)。また、他にも、シートの裏面に模様を書いたり、色を塗ったりすることで、切り紙に引張を加えた際に、模様が浮き上がって見えたり、色が混ざって見えたりといった視覚的効果を持たせることも可能である。

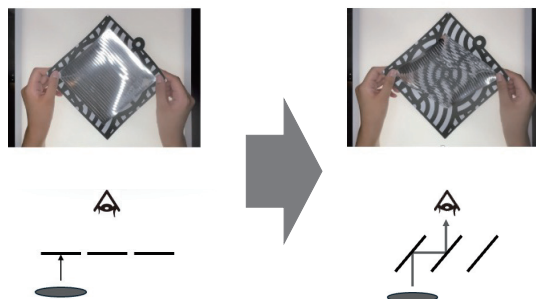


Fig.8. “the other side is visible”(Chisato IEKI (2024)/
CONNECTING ARTIFACTS 04)

7. 今後の展望

最後に、本研究における課題と今後の展望について述べる。本研究の FEM を用いたシミュレーションにお

いては、平行端線間距離を一定とした水平軌道モデルを用いた。ところがこのモデルでは変形挙動にピークが生じたように、伸び縮みによる変形の影響が強く生じる。そこで、可展面に加わる曲げやねじれのみによる立体形状変化を分析するにあたっては、シートの対角線距離を一定とする回転軌道モデルの方が導入する必要があると考えられる。

また、折紙モデルについて、本研究では grasshopper を用いて折り紙の折り方を決める二つのパラメータを設定することにより立体形状を視覚化したが、今後の課題としては、各パラメータの関係を立式することで、任意の立体形状から折り目の入り角と折れ角を導く逆問題の解決が挙げられる。これを解くことにより、任意の面外回転角を持つ切り紙シート的设计が可能となり、鏡面薄板の面外回転挙動とその光学的性質を利用したレンズなどを作成することが可能になると推測される。

8. 謝辞

本研究は科研費 22H04954 の支援を受けています。

参考文献

1. Park, J. J., Won, P., & Ko, S. H. (2019). A review on hierarchical origami and kirigami structure for engineering applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(1), 147–161.
2. Nakamura, N., & Iwase, E. (2025). Stretch-based kirigami structure with folding lines for stretchable electronics. *npj Flexible Electronics*, 9(1), 51.
3. Miller, M. (n.d.). *Sea Shells*. Ron Resch Official Website. <http://www.ronresch.org/ronresch/gallery/sea-shells/>
4. Hong, Y., Chi, Y., Wu, S., Li, Y., Zhu, Y., & Yin, J. (2022). Boundary curvature guided programmable shape-morphing kirigami sheets. *Nature communications*, 13(1), 530.
5. Bu, H., He, L., & Jiang, H. (2021). Study on steel slit shear walls with different characteristics of hysteretic behavior. *Thin-walled structures*, 168, 108271.

デジタルファブリケーションを活用したアップサイクル楽器の制作実践

Practical Production of Upcycled Musical Instruments Using Digital Fabrication

中山 華琳, 鈴木 杏子, 久保 歩風, 米津 七日, 川野 涼香, 井上 智博, 田井 則一, 津田 和俊

Karin NAKAYAMA, Ako SUZUKI, Honoka KUBO, Nanaka YONEZU, Suzuka KAWANO, Tomohiro INOUE,
Norikazu TAI, Kazutoshi TSUDA

京都工芸繊維大学

Kyoto Institute of Technology

【要約】

本研究は音楽フェスでの子ども向けワークショップを想定し、楽器との触れ合いを通じた循環型素材への理解と体験価値の向上を目的とする。リサイクル素材を活用したデジタルファブリケーションによる楽器制作の可能性を探り、2種類の打楽器を制作した。ひとつは、アップサイクルレザーの袋にどんぐりが入った楽器「マラコロ」である。全身で音を楽しめる設計とし、袋状の部分はモノマテリアルで制作した。もうひとつは、アップサイクルレザーと PLA 樹脂を用いた太鼓であり、音質向上のため造形寸法の調整を重ねた。

キーワード: アップサイクル, レザーカッター, 3D プリンター, ワークショップ, 楽器制作

【Abstract】

Designed for a children's workshop at a music festival, the project aims to promote understanding of circular materials and enhance the overall experience through hands-on interaction with instruments. This study explores the potential of musical instrument production using recycled materials and digital fabrication, resulting in two types of percussion instruments. One of the instruments is "Maracoro" made from a upcycled leather pouch filled with acorns. It is designed for children to enjoy using their whole bodies to make sound and is constructed entirely from a single material (monomaterial). The other is a drum made with a PLA resin body printed using a pellet-based 3D printer and a drumhead made from upcycled leather. To improve sound quality, repeated experiments were conducted by adjusting the design dimensions of the 3D print.

Keywords: upcycle, laser cutter, 3D printer, workshop, musical instrument making

1. 序論

近年、環境意識の高まりを背景に、循環型素材を用いたものづくりへの関心が高まっている。また、デジタルファブリケーション技術等の進展により、こうした新素材を活用した制作の新たな可能性が広がっている。

一方で、循環型素材もデジタルファブリケーション技術も認知は広がりつつあるものの、多くの人にとって実際に触れる機会は十分とは言えない。

こうした状況を踏まえ、それらに関する情報を噛み砕いて発信する場として京都工芸繊維大学 KYOTO Design Lab の学生チーム「アップサイクルセイダーズ^{*1}」を立ち上げた。その活動の一環として、「Colour Recycle System^{*2}」を開発した株式会社 colourloop^{*3}、株式会社 東谷商店^{*4} の協力のもと、野外フェス ARIFUJI WEEKENDERS^{*5} にてものづくりワークショップを毎年実施している。3 年目の実施となる今年は参加者に「全身を使って音楽を感じ楽しんでもらうこと」をコンセプトに、循環型素材とデジタルファブリケーションを使った楽器に触れる体験を提供することを目指した。具体的には、アップサイクルレザー素材「ReFIQ」や PLA 樹脂などを

材料に、レーザーカッターや 3D プリンターを活用して 2 種類の打楽器、オリジナル楽器「マラコロ」と太鼓を制作した。それにあたり、廃材を極力出さない持続可能性を意識した設計をおこなった。

本研究で使用した ReFIQ は、株式会社 colourloop がリサイクル繊維から成形した素材であり、レザーのような張りのある質感が特徴である。また、カラーバリエーションが豊富であることから、視覚的な魅力も兼ね備えている。

ReFIQ の活用例として、デジタルファブリケーションを用いて加工して故繊維の工業デザインへの応用の可能性を探った「Fabric Re-engineered as Products」展^{*6}がある。また楽器のワークショップの事例として、民族打楽器系譜の延長線上に 3D プリンターを使って作ることのできる新しい楽器(デジタル民族楽器)を提案したデジタル民族楽器ワークショップ^{*7}がある。これらの取り組みに対し本ワークショップは、メインターゲットである子供が親子ともに楽しめるように難易度や所要時間に配慮し、内容を野外フェスで行うことに特化させたものとして位置付けられる。

2. オリジナル楽器「マラコロ」について

2.1 コンセプト

オリジナル楽器「マラコロ」は、袋状になった ReFIQ の中にどんぐりが入っているもので、振って音を鳴らすマラカスに似た楽器である。このような形状にしたのは、気軽に音を奏でることができる楽器としての自由さや、携帯のしやすさがフェスの場に適していると考えたからである。体を動かしながら全身で音楽を感じてもらうことをコンセプトとして、心地よい音や、身につけ方による音の響きを調整しながら制作をおこなった。また、マラコロは制作ワークショップとして展開するため、小学生以下の年齢でも楽しめる難易度の調整をした。

2.2 制作

素材には、レザーの質感を持つ ReFIQ を用いた。ReFIQ を選んだ理由としては、程良い張り感や硬さにより音の響きが心地よかったことや、7 色という豊富なカラーバリエーションから魅力的なアウトプットが期待できたこと、ワークショップ後も使い続けることのできる耐久性が見込めたことなどが挙げられる。マラコロの本体はモノマテリアルで制作し、中身の素材をどんぐりにすることで、環境に配慮した楽器を目指した。加工には、ReFIQ と相性の良いカッターを使用し、ReFIQ と相性の良いレーザーカッター(SPIRIT GLS 60W)を使用し、実験で得られた適切な数値(Table 1 参照)で、カットと彫刻をおこなった。

ReFIQ の色の違いによって、適切な数値は変化する。パワーが弱すぎるとカットや彫刻が適切にできず、強すぎると表面が焦げてしまうため、最適な数値を記録し、作業を効率化した。また、ReFIQ をカットする際に余分なスペースをできる限り無くすため、展開図の工夫をして制作過程のゴミを削減した。

Table 1. Laser cutter (SPIRIT GLS 60W) setting

	レーザーカット (Power/Speed)		レーザー彫刻 (Power/Speed)	
濃い色 (紺・赤・紫・緑)	P 50	S 3	P 50	S 10
薄い色 (黄・白・水色)	P 70	S 5	P 50	S 10

2.3 形態

マラコロは、三角錐型と鈴型の 2 種類を制作した (Fig.1 参照)。三角錐型は、折り紙のように ReFIQ を折りながら形を作っていく、鈴型は、紐状になった ReFIQ を編み合わせながら形を作っていく。どちらも 2 色以上のカラーの組み合わせからなっており、親しみやすい見た目を目指した。比較的制作プロセスが易しい三角錐型のマラコロは、参加者が描いた絵を表面にレーザーで彫刻できるようにした。鈴型のマラコロは、制作の難易度を少々上げ、自らの手で作った実感を持てるワークショップを目指した。マラコロが 2 種類あることで、見た目の魅力が増すだけでなく、異なる制作プロセスを楽しめるようにした。さらに、従来のマラカスのように手で持ちながら音を鳴らすだけでなく、足首に付けたり、カバンにつけたりするなど多様に音を鳴らせる設計にし、全身で音楽を感じてもらうことを目指した。

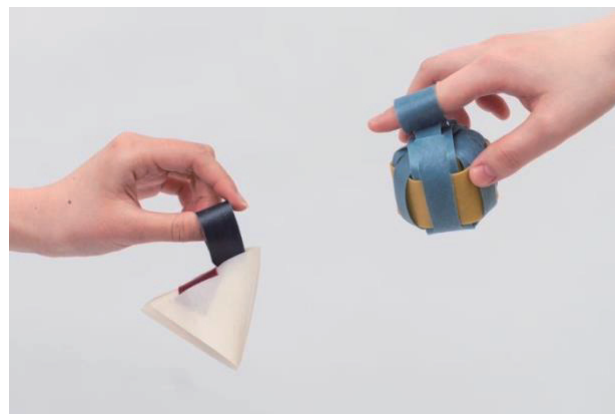


Fig. 1. Marakoro

Left: Triangular cone shape, Right: Bell shape

2.4 ワークショップの実施

色の組み合わせの選択やレーザー彫刻によって、参加者が自分だけの楽器を楽しそうに制作していた。また、子どもと一緒に参加していた保護者の中には、ReFIQ に触れることで自然と素材に興味を持ち、アップサイクルについて質問する参加者もいた。さらにワークショップ後もフェスの中でマラコロを振って楽しそうに音楽を奏でている子どもたちの様子も見られた (Fig.2 参照)。



Fig. 2. A child playing Marakoro

3. 太鼓について

3.1 コンセプト

子どもたちがフェスを楽しむためには、音楽を楽しむ身近な大人たちとのコミュニケーションが重要である。今回は、主にマラコロを作るワークショップをおこなったが、それだけでは子どもたちが個々で音を奏でることになる。そこで、子どもと大人が音楽の楽しさを共有できるように、親子でセッションができるスペースを設けることにした。このスペースに置いておく楽器の一つとして、子どもでも演奏しやすい太鼓を制作した。

3.2 素材探求

ReFIQ の新たな使い方を探求すべく、今まで試されてこなかったペレット式 3D プリンター(茶室 GEM121010)との組み合わせに取り組んだ。ReFIQ を使ってプロトタイプ制作を行い楽器としての可能性を探ったところ、硬くハリがある素材特性から、打楽器に適していると考えら

れた。伝統的に用いられている動物の皮の代わりに ReFIQ を太鼓の面として用いることで、動物由来の素材を使用しないため、環境への影響も低いと考えられる。

3.3 面の貼り方

一つめの試作では、円形の ReFIQ の内側と太鼓の胴の周囲に同数の穴を開け、並縫いの要領で紐を穴に通して固定した。しかし、ReFIQ に穴を開けると、面を張る時に紐で引っ張られた部分が裂けてしまったため、穴を開けずに ReFIQ を強く張る方法を新しく考える必要があった。

検討を重ねた結果、胴の円周よりひとまわり大きいリングを用いた方法に至った(Fig.3 参照)。全部で三つのリングがあり、二つは胴の上部、一つは胴の下部につける。上部二つのリングでレザーを挟み込み、上部二つのリングと下部のリングを紐で編んで締めることで ReFIQ を張っている(Fig.4 参照)。



Fig. 3. The ring at the top of the drum



Fig. 4. The drum

3.4 演奏の実施

当日は、マラコロのワークショップブースの隣に演奏スペースを設け、他の楽器と共に太鼓を設置した。ワークショップの待ち時間に他の楽器を触ることで、子どもたちが退屈せずに待つことができ、その結果、スタッフの心理的負担も軽減された。また、ワークショップの対象年齢に満たない 1,2 歳の子どもも家族やスタッフと一緒に演奏することができた。子どもと大人、共に笑顔が見られ、親子で音を鳴らす体験を楽しむ様子が見られた(Fig.5 参照)。



Fig. 5. A family playing the drums

4. 結果と展望

今回のワークショップを通して、参加者は音楽への新たな関わり方を獲得すると同時に、オリジナル楽器の制作を通じて素材の特性や構造への理解を深め、デジタルファブリケーションを使ったものづくりを体験することができた。

本研究は、ペレット方式 3D プリンター(茶室 GEM121010)の積層技術を用いた楽器制作の可能性を示すものであり、特にリサイクル素材との組み合わせによる表現の幅を広げた点に意義がある。使用する材料の自由度が高いため、今後は異なる素材特性を活かした音質の探究や、より多様な楽器表現への展開も期待できる。また、音楽フェスにおける子ども向けワークショップを想定する中で、参加者に循環可能な素材を使ったものづくりを「体験」として提供できた点は大きな収穫であった。特に、再生素材が身近な楽器として形になることで、素材への関心や持続可能性への理解を自然に促す機会となった。

今後は、楽器を鳴らす・組み立てるといった体験にとどまらず、素材選定や設計といった上流工程から来場者を巻き込むことで、より深い学びと創造的な関与を生むワークショップのあり方を探っていきたい。

5. 謝辞

研究をおこなうにあたって、株式会社 colourloop、株式会社東谷商店、ARIFUJI WEEKENDERS、FabLab Kitakagaya、アップサイクルセイダーズの支援を受けました。ここに感謝申し上げます。

注釈

1. アップサイクルセイダーズのこれまでの取り組み
<https://www.instagram.com/upcyclesaders/>
2. What is “Colour Recycle System”?
(参照: 2025.09.10),
<https://colourloop-jp.com/aboutus>
3. 株式会社 colourloop (参照: 2025.09.10),
<https://colourloop-jp.com>
4. 株式会社東谷商店 (参照: 2025.09.10),
<https://www.higashitanishouten.com>

5. ARIFUJI WEEKENDERS 2025 (参照: 2025.09.10),
<https://arifuji.com>
6. 「Fabric Re-engineered as Products 故繊維の工業デザインへの応用」展が東京ギャラリーにて開催(参照: 2025.09.10), www.d-lab.kit.ac.jp
7. デジタル民族楽器ワークショップ(デジファブ×楽器)(参照: 2025.09.10),
<https://www.youfab.info/2015/winners/digital-folk-instrument-workshop?lang=ja>

参考文献

1. Motoko UCHIMARU, Teruo KIMURA, Tetsuya SATO, Study on Recycling System of Waste Textiles based on Colour, Journal of Textile Engineering, 2013 年 59 巻 6 号 p. 159-164,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/senshoshi/56/10/56_819/_article/-char/ja/
2. 内丸もと子, 木村照夫, 佐藤哲也, 大迫勝徳, 色分別した故繊維を使う繊維強化プラスチック製品の成形時の色変化, 繊維製品消費科学, 2015 年 56 巻 10 号 p. 819-825,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/senshoshi/56/10/56_819/_article/-char/ja/
3. 内丸もと子, 木村照夫, 佐藤哲也, 混色繊維廃材のリサイクルにおける繊維形状が好感度に及ぼす影響, Journal of Textile Engineering, 2017 年 63 巻 1 号 p. 15-22,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jte/63/1/63_15/_article/-char/ja/

新しい支持構造を搭載した自作 3D プリンタの設計開発

Design and development of a homemade 3D printer equipped with a new support structure

堀田 晃靖¹, 松本 宏行²

Kosei HORITA¹, Hiroyuki MATSUMOTO²

¹ ものつくり大学大学院, ² ものつくり大学

¹ Graduate School of Technologists, ² Institute of Technologists

【要約】

本研究では、自作 3D プリンタの製作そのものを教育教材として活用することを主な目的としている。教育現場で 3D プリンタの利用が広まる中、その複雑な構成要素を自ら組み立てることで、装置への深い理解と、将来的なメンテナンススキルの習得が期待できるものと考えている。教材に適した 3D プリンタを開発するため、まずオープンソース・オープンハードウェアの 3D プリンタを基盤とし、実機の組み立てと各部の改良を通じて機構を検討した。次に、教材化における課題の一つである製作費用を抑えるため、動作機構を維持しつつ支持構造を見直し、部品点数と製作費用の削減を実現する新しい機構を考案した。

キーワード: 付加製造技術, ものづくり教育

【Abstract】

This study utilizes the construction of a self-made 3D printer as an educational tool. As 3D printers become widespread in education, we believe assembling one firsthand foster a deeper understanding of the device and imparts future maintenance skills.

To develop a 3D printer suitable for educational use, we first used an open-source, open-hardware 3D printer as a base and examined its mechanism through the assembly of an actual machine and improvements to each part.

We devised a new mechanism with a simplified support structure, which successfully reduced the number of parts and production costs while preserving functionality.

Keywords: Additive manufacturing technology, Making Things Education

1. 研究目的

付加製造技術の一つとして、3D プリンティングに着目し、自作 3D プリンタの製作そのものを教育教材として活用することを主な目的としている。教育現場で 3D プリンタの利用が広まる中、その複雑な構成要素を自ら組み立てることで、装置への深い理解と、将来的なメンテナンススキルの習得が期待できるものと考えている。

2. 研究基盤

教材に適した 3D プリンタを開発するため、まずオープンソース・オープンハードウェアの 3D プリンタを基盤とし、実機の組み立てと各部の改良を通じて機構を検討した。基盤とする 3D プリンタとしては日本発祥の Fraxinus プロジェクト [1]の機種、Fraxinus00w3 を選定した。本機種はアクリルフレームで軽量かつ小型という特徴を持ち、ワークショップ形式で参加者が自身で組み立てて、完成品を持ち帰るという運用を想定した場合に最適な仕様であると判断した。開発にあたり、公開されている部品リストや 3D データを元に部品表を新たに作

成し、発注を行った。部品には国内での入手が困難なものも含まれていたため、一部は海外の EC サイトを活用して調達した。組み立て後は、良好な造形品質が得られるまで試行錯誤をしていき、修正点を抽出した。修正点としては主に Z 軸のワイヤルーティングや保持トルク不足があり、これらの修正点から設計改良をしつつ教材化に向けての課題を検討していくこととした。

3. 設計 開発

教材化に向けての課題として製作費用の高騰が挙げられ、同等の性能を維持しつつ、いかにコスト低減するかが課題となった。性能維持の観点から動作機構は維持しつつ支持構造を見直し、製作費用の削減を実現する新しい方法を模索した。支持方法を見直していく中でベッドスリッパ方式の 3D プリンタで使用されている片持ち構造を取り入れようと考え、試作機で Z 軸の左側と X-Y 軸左側のリニアガイドを取り外して検証をおこなった。Z 軸は変化がみられなかったが、X-Y 軸に関してはリニアガイドを撤去した左側からガントリー部の沈み

込みが確認された。これは撤去したリニアガイドが担っていた垂直荷重の支持を失い、残った右リニアガイドがローリング方向のモーメント荷重を支持できなかったことが原因である。したがってガントリー部左の垂直荷重の解消が問題となった。対応策を検討する中で撤去したリニアガイドの代わりとしてリニアガイドに比べて安価なボールベアリングを検討した。右リニアガイドのヨーイング方向の動きを抑えられるようにフランジ付きボールベアリングをフレームの端で転がるようにして Fig1 のような構造にして検証をおこなった。ガントリー部の沈み込みが解消され、動作に影響がみられなかった。また、部品点数と部品種類の削減をおこない、インサートナットで締結していた箇所タップ穴化やネジの統一化をおこなった。これらの改良によって製作費用は製作時の価格で約 2000 円の削減、部品点数は基盤機種に比べて 15 点の削減を実現した。また、基盤機種でみられた修正点の改良として、保持トルク不足を解消するべく、小径プーリーの開発をおこなった。モーターサイズの変更ではなくプーリーの小径化を選択した理由としてモーターを大型化した場合に取り付ける場所が無いこと、プーリーであればソフト側の調整で容易に試せる利点がある。プーリーを熱溶解積層方式 3D プリンタで造形出来る最小径を目指し開発をおこない、検証をおこなった。脱調を起こす頻度が下がった事から小径プーリーを前提とした設計に変更する事とした。

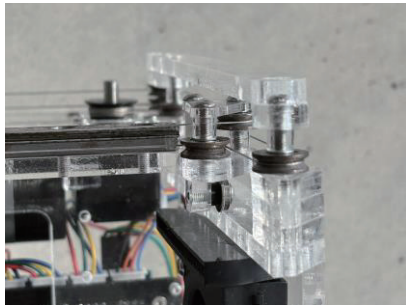


Fig. 1. A supporting structure that replaces linear guides

4. 検証

これらの検証を設計に取り入れて完成して 3D プリンタを Fig2 に示す。また、仕様一覧表を Table 1 に示す。

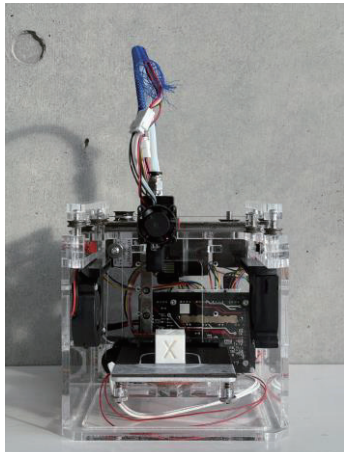


Fig. 2. Designed and manufactured 3D printer

Table 1. Specification

Build Volume(W*D*H)	65*65*60 mm ³
Nozzle Diameter	0.4mm
Max Hot End Temperature	300°C
Max Build Plate Temperature	80°C
Supported Filament	PLA, PETG
Power Supply	20V3.25A(USB PD)
Physical Dimensions	50*155*150mm(Main body only)
Net Weight	1.65kg(excluding filament)

本機種 Fraxinus00w3 を基盤としつつ片持ち構造、両持ち構造を組み換え事が可能な 3D プリンタとなっている。開発した 3D プリンタを片持ち構造、両持ち構造でそれぞれ製作し、造形物の比較をおこなった。Fig3 の結果から支持構造による変化はなく同等の造形品質で造形されている事がわかった。

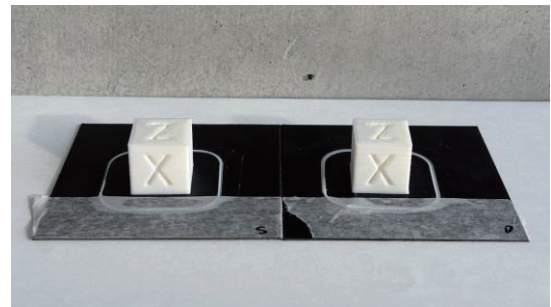


Fig. 3. Comparison of build quality Left: Conventional supporting structure Right: Developed supporting structure

5. 結論

3D プリンタの部品点数と製作費用の削減を目指して支持構造を見直し設計した結果、同等の造形品質でありながら部品点数と製作費用の削減を実現する事ができ、教材として扱える 3D プリンタの開発が出来た。今後は組み立てマニュアルの整備をしていき教材として完成していきたい。

参考文献

1. Fraxinus Project . “Home - Fraxinus” . Fraxinus . 2025 . <https://fraxinus.jp/>, (参照 2025-09-10).

ジェネラティブ・テクトニクス: コードと土の対話

Generative Tectonics: A Dialogue Between Code and Clay

石津 優子¹, 堀川 淳一郎², 井上 智博², 登尾 育海², 岩見 遙果²Yuko ISHIZU¹, Junichiro HORIKAWA², Tomohiro INOUE², Iumi NOBORIO², Haruka IWAMI²,¹株式会社 GEL, ²京都工芸繊維大学¹GEL Inc., ²Kyoto Institute of Technology

【要約】

本発表では、デジタル技術を応用し、設計者の抽象的な意図と物質的な成果物を結びつける統合的なセラミック制作のワークフローを提案し、実証する。このワークフローは三つの要素から成る。第一に、プロシージャルな 3 次元形状生成により、複雑で非反復的な形態の効率的な探求を可能とする。第二に、AI による意味論的な色彩提案と物理モデルを融合させ、釉薬の具体的な調合比率を算出する独自の色彩システムを開発する。第三に、粘土を素材とするクレイ 3D プリンタによる物理的造形を実施する。設計から色彩、造形までを統合することで、計算制御と素材の偶発性が共存する新たな造形表現の可能性を提示する。

キーワード: コンピュータショナルデザイン, デジタルファブリケーション, セラミック 3D プリント, マテリアルデザイン, 生成 AI

【Abstract】

This presentation proposes and demonstrates a workflow for ceramic production that bridges the designer's abstract intentions with material outcomes through digital technologies. The workflow consists of three components: (i) procedural 3D modeling, enabling the efficient exploration of complex forms; (ii) a color system that combines AI-driven semantic suggestions with physical models to scientifically derive glaze mixing ratios; and (iii) clay-based 3D printing for physical fabrication. By unifying design, coloration, and fabrication, the workflow introduces new modes of expression where computational control coexists with the inherent contingencies of material behavior.

Keywords: Computational Design, Digital Fabrication, Ceramic 3D Printing, Material Design, Generative AI

1. 序論

建築・デザイン分野のコンピュータショナルデザインにおいて、ノードベースでコードを管理し、モデリングの過程を可視化するプロシージャルモデリングが注目されている。この手法は、従来困難であった複雑で多様な造形を可能にし、さらに 3D プリント技術と組み合わせることで、デジタル設計から実物製作までを直接結びつける新しい設計プロセスとなる。

近年では、粘土を材料とするクレイ 3D プリンタとプロシージャルモデリングを組み合わせた陶器の造形が研究されている¹⁾。海外ではそのデザイン手法が徐々に確立しつつある²⁾が、日本においては未だ広く認知されて

いない現状がある。

この流れを発展させ、設計者の抽象的な意図と物質的な成果物を精密に結びつける統合的なセラミック制作のワークフローを提案し、実証する。筆者らは、Fig.1 と Fig.2 に示す複数のワークショップや展示を通じてこのシステムを開発・検証している。本稿では Fig.2 の Ceramic Walls AI について一連のワークフローを記す。ワークフローは以下の三つの要素から構成される。(i)Houdini³⁾を用いてプロシージャルに三次元形状を生成し、G-Code へ直接変換する。(ii)粘土を素材とするクレイ 3D プリンタを用いて造形する。(iii)AI による意味論的な色彩提案とクベルカ-ムンク理論の融合によって、



Fig.1 ワークショップで作成した 3D プリンタ製の陶器



Fig.2 CAADRIA2025 で作成した Ceramic Walls AI

釉薬の具体的な調合比率を科学的に算出する。

この設計から色彩、造形までを統合するプロセスを通じ、計算による制御と素材の偶発性が共存する新たな造形表現の可能性を探る。成果は、器やタイルといった作品の実物展示や制作プロセスのデモンストレーションを通じて提示する。

2. Houdini によるプロシージャルモデリング

Houdini は、ノードベースで複数のアルゴリズムを組み合わせて 3 次元形状を作成するソフトウェアである。内部の入力変数をパラメトリックに変化させることで、無数のパターンのデザインを生成できる。本発表では、Fig.3 に示すようなベクトルを 3 ステップごとに枝分かれさせるアルゴリズムを用いて、陶器タイルの表面に有機的な形状を施すデザインを生成した。

生成した表面デザインは Fig.4 のようになり、これをタイル壁面全体の表面模様とする。次に、これを元に立体的な表面形状を作り、さらにクレイ 3D プリンタの造形可能サイズに分割する。同時にタイルの断面形状も決定し、Fig.5 のように分割された状態でタイル壁面全体のモデリングを完了する。

次に、モデリングしたタイル形状をクレイ 3D プリンタで造形するためのパスを生成する。押し出し式の 3D プリンタを用いるため、押し出し速度 E などの設定値を決める G コードとして出力する。Houdini を用いて生成されたタイル状曲面モデルを、押出式 3D プリンタで造形可能な G コードへ変換するプロセスは以下である。

(i)生成された形状を造形領域に収まるよう座標系を調整する。基準座標はビルドプレート左前隅を原点とし、Z軸を上方向と定義する。(ii)スライス処理を行い、レイヤ高さ h 、レイヤ幅 w ごとに水平断面を抽出する。外周および充填領域のパスを得る。これらのパスは離散化され、各点間距離 d を算出することにより経路長 l を算出する。(iii)線幅 w 、レイヤ高さ h 、および経路長 l を用い、必要な押し出し量 E は以下で表される。

$$E = \left(\frac{V}{A}\right) \times m = \frac{w \times h \times l}{\frac{\pi r^2}{4}} \times m \quad (1)$$

この時、 m は押し出し倍率であり、材料やプリンタの条件に応じて実験的に決定する。(iv)層が切り替わるときおよび島状経路の移動時には出力を抑えるためのリトラクション処理を導入する。移動開始時に押出量を一時的に減算し、移動終了後に加算することで実現する。

以上の(i)~(iv)の処理を生成したタイルモデルに対して自動で実行するプログラムを Houdini 上で作成し、モデリングから G コードへの変換まで一貫する。最終的に Fig.6 のように出力時間、材料重量、出力サイズを Houdini 上で可視化し、G コードを出力する。

3. 生成 AI とクベルカ・ムンク理論による色彩システム

セラミック領域における釉薬設計は、経験的な試行錯誤

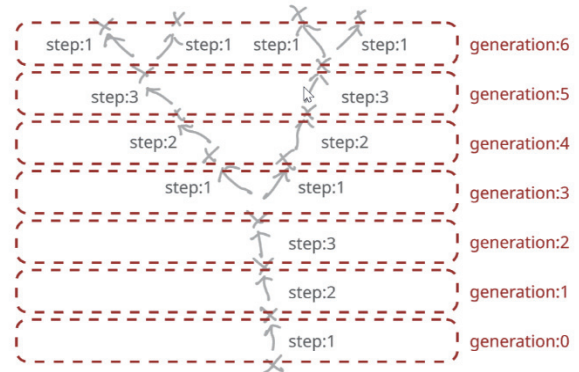


Fig.3 枝分かれのアルゴリズムによる形状生成のイメージ

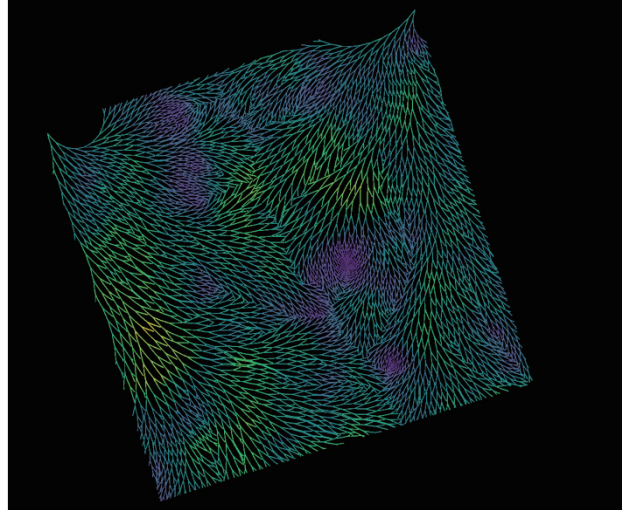


Fig.4 Houdini で生成したタイル壁面全体の表面模様

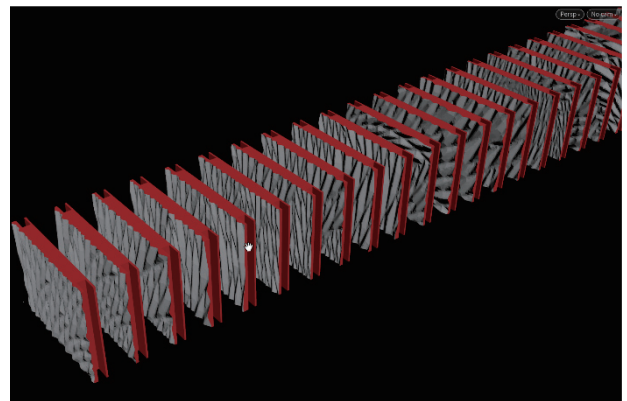


Fig.5 3D プリンタの造形可能サイズで自動分割されたタイル

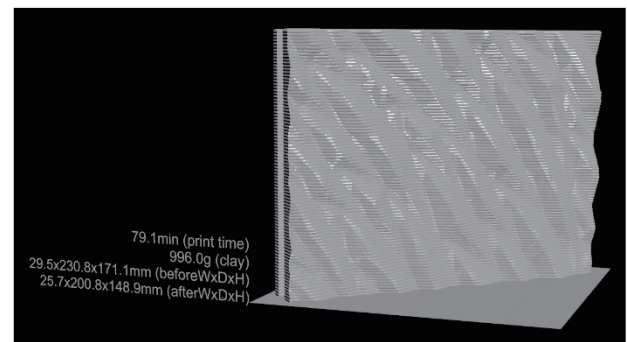


Fig.6 Houdini で可視化したタイル 1 枚を出力するための物理的な情報

誤に依存する傾向が強い。この問題に対して、生成 AI による意味論的な色彩提案と、物理光学に基づくケルカ-ムンクモデル⁴⁾(以下、KM モデルと呼ぶ)を統合することで、科学的かつ効率的に調合比率を導出する手法を開発した。

本手法では、生成 AI(大規模言語モデル)を用いてユーザーの言語的要求を入力とし、学習データから候補色を決定する。この意味論的な色彩推論は、最終的な色調の方向性を人間の感覚に即して提示する段階を担う。一方で、釉薬は透明ガラス質中に酸化顔料が分散した複雑な色彩を持ち、単なる絵具の混色とは異なる特性を示す。KM モデルは、材料中の吸収係数 K と散乱係数 S の比によって反射率を予測する光学モデルであり、釉薬における着色挙動の理論的基盤となる。

本手法は以下のプロセスで構成される。まず、Fig.7 に示す単色顔料の物理試験片を作成し、画像から色味を抽出する。そして、測定データから各顔料の KM モデルに用いる K/S 値を算出する。これにより、Fig.8 のような任意の混合比における色の予測を可能とする。さらに、生成 AI により、ユーザー要求を意味論的に解釈し、候補となる混合色を提示する。最後に、提示された候補色を CIELAB 空間にマッピングし、最小二乗法により近似的な顔料比率を算出する。

CAADRIA2025 では、本手法をユーザーが手軽に扱える釉薬シミュレーターとして Web アプリを作成した⁵⁾。釉薬シミュレーターは、以下のフローで実行される。

(i) アプリを起動し、Fig.9 の画面で利用する釉薬の顔



Fig.7 単色顔料を用いた釉薬の物理試験片

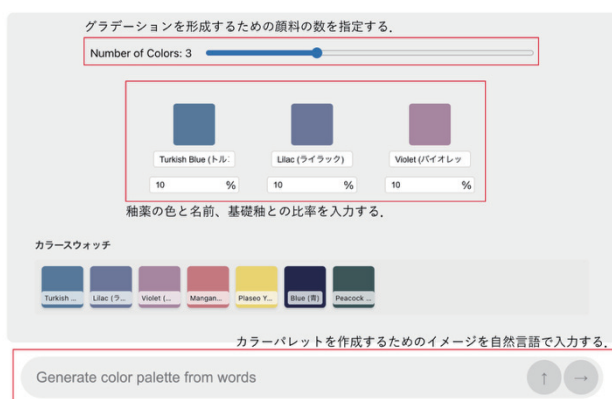
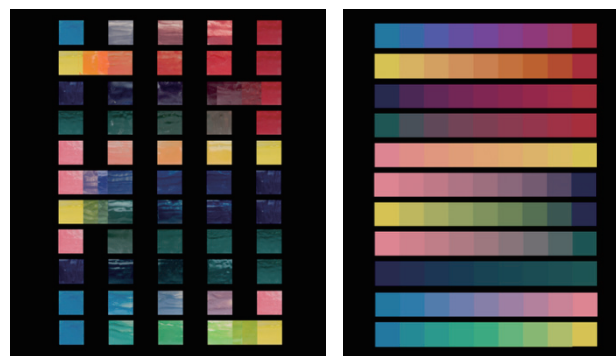


Fig.9 釉薬シミュレーターの web サイト画面(i)~(iii)

料の数を指定する。各釉薬の顔料(色材)について、焼成後の色(RGB 値)、名前、そして顔料に対する基礎釉との比率を入力する。

- (ii) (i)で指定した複数の釉薬の色から、ペアを作成し、KM モデルのライブラリ⁴⁾を使用して二色を 20 段階で混ぜたグラデーションパレットを自動で生成する。
- (iii) 作りたいカラーパレットを表すキーワードを自然言語で入力する。このキーワードがサーバーアプリに送信され、OpenAI GPT API⁶⁾により、キーワードに応じた 3 色構成のパレットが 3 種類生成される。生成されたパレットの各色は、先に作成したグラデーション色群から最も近い色を選び、最終パレットの色として決定する。
- (iv) 次に、Fig.10 の画面でパレットを選択し、指定した色からグラデーションが生成される。各段階の色について、その色を作るための釉薬顔料の割合が表示される。3D プレビューでは、Houdini から出力して事前に設定した 3D モデルに対してグラデーションが適用される。
- (v) 新しいパレットを作成したい場合は再度キーワードを入力できる。不要な場合はアプリを終了する。

本手法は、KM モデルを用いることで、物理的な色混合の予測を可能とし、Web アプリ上でユーザーが求める色味に対応する釉薬調合比率を提示できる。しかし、Fig.8 に示すように、KM モデルによる予測結果は、実際の釉薬試験片の発色



(a) 顔料釉薬の割合を変えて混 (b) KM モデルを用いて生成した物理試験片の色味
合した物理試験片の色味 顔料の混合予測

Fig.8 物理試験片の色データから作成した各顔料の混合予測結果

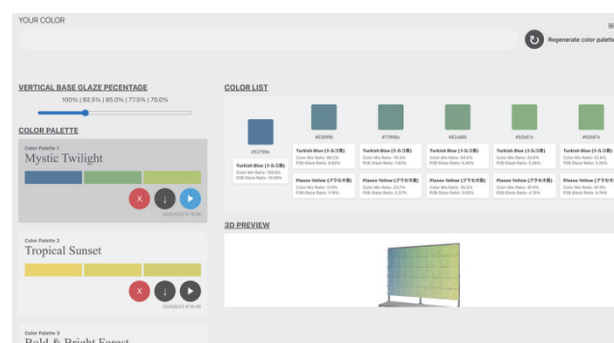


Fig.10 釉薬シミュレーターの web サイト画面(iv)

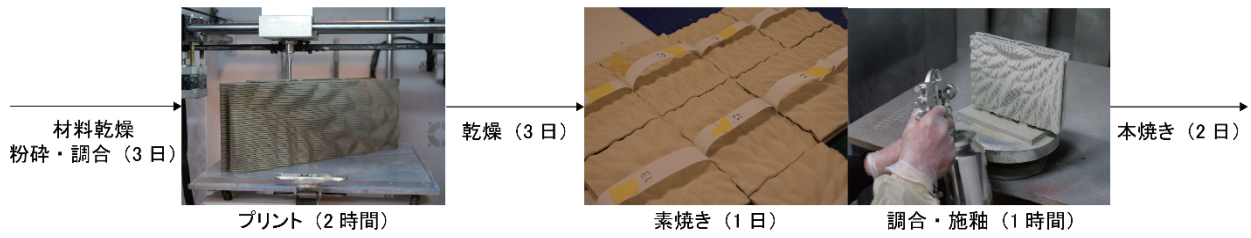


Fig.11 クレイ 3D プリントを用いた陶器タイルの施工手順

Table.1 陶器タイルの制作に用いた材料の割合

新徳鹿粘土	水	シャモット	ペントナイト
1	0.36	0.02	0.03

と一部で差異が見られる．これらの予測を現実により近づけることは今後の課題である．

4. クレイ 3D プリントを用いた陶器タイルの施工

2.で生成した 3 次元形状を，クレイ 3D プリントを用いて造形する．制作ではプリントの積層跡を含めたデザインとするため，空気圧で材料を密閉し，スクリューで押し出す積層形式の 3D プリントを採用した．

制作物の材料特性の再現性を確保するため，一度購入した粘土を乾燥させ，粉碎・調合を行った材料を用いる．なお，釉薬の色への影響を抑えるため，色の白い新徳鹿粘土を採用した．調合の割合を Table.1 に示す．シャモット（素焼きを砕いたもの）は形状と乾燥の安定させるために加え，ペントナイトは出力を安定させるために加える．試行錯誤的に決定したこの調合により，粒度分布や水分量を制御しつつ安定した押出性を確保した．

施工プロセスを Fig.11 に示す．まず，粉碎・調合した粘土を造形用のペーストとして準備し，クレイ 3D プリントを用いて約 2 時間かけて造形する．その後，3 日間の自然乾燥を経て素焼き（800 °C）を実施し，形状を安定化させる．続いて，釉薬の調合および施釉を行い，2 日間の本焼き（1,200 °C）によって仕上げる．

3.で示した手法で生成したグラデーションを作るため，各タイルの釉薬の調合比率が異なる．全てのタイルに対して均一に，かつ釉薬の無駄が出ないようスプレーガンによる吹付け形式の施釉を採用した．これは，実際の建築タイル工場でも採用される方法である．

完成したタイルを Fig.12 に示す．CAADRIA2025 では，この建築タイル 50 枚を組み合わせることで Fig.2 に示す Ceramic Wall AI と題して展示した．

5. 結論

本稿では，Houdini を用いたプロシージャルモデリングとクレイ 3D プリントを組み合わせることで，複雑な三次元形状を持つ陶器の設計から施工までを一貫的に実現するプロセスを示した．さらに，生成 AI（大規模言語モデル）による意味論的な色彩提案とクベルカ-ムンク理論を融合させることで，ユーザーの求める色味を実際の陶器で再現するための釉薬の調合比率を科学的に導

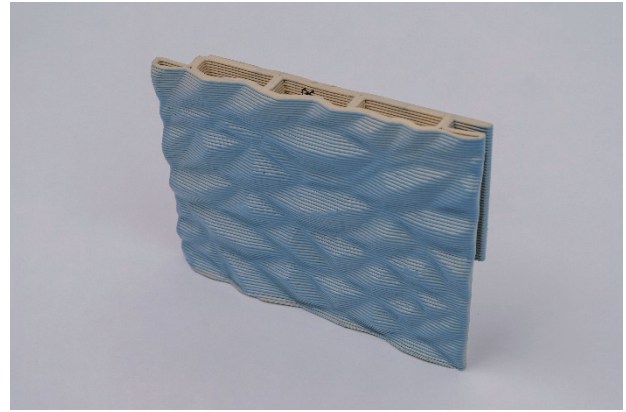


Fig.12 完成した 3D プリント製の陶器タイル

出する方法を提示し，Web アプリとして公開した．

施工段階では，購入した粘土を乾燥・粉碎・再調合して利用することで，材料特性の再現性を確保した．その結果，安定した押出性と乾燥過程における形状保持性を両立し，タイルを成形・焼成することが可能となった．

以上の成果は，設計者の抽象的な意図と物質的な成果物とを精密に接続する，新たな陶器制作のワークフローの可能性を示す．

クレイ 3D プリントを用いた造形精度の向上と予測の困難な乾燥収縮による変形への対処，混ぜ合わせた釉薬の色予測の精度の向上が今後の課題である．

参考文献

- 1) Chris Martins: How the U.K.'s 3D Ceramix Renaissance Inspired U.S. Artists to Combine Ancient Craft With Modern Tech, Robot Pottery's Golden Age, 2016.10
- 2) Diego Garcia Cuevas, Gianluca Pugliese: Advanced 3D Printing with Grasshopper: Clay and FDM, Independently published, 2020.4
- 3) SideFX: houdini, <https://www.sidefx.com/ja/products/houdini/> (2025.9.3 参照)
- 4) Saraka Sochorova, Ondrej Jamriska: Practical Pigment Mixing for Digital Painting, ACM Trans. Graph, Vol. 40, No. 6, Article 234, 2021.12
- 5) Junichiro Horikawa: Ceramic AI Coloring Simulator, <https://jhorikawa.com/app/ceramicaicoloring/> (2025.9.3 参照)
- 6) Open AI: Open AI API <https://openai.com/ja-JP/index/openai-api/> (2025.9.3 参照)

プレシャスプラスチック×デジタルファブリケーションの社会実践

Social practice of precious plastics x Digital Fabrication

芳澤 海飛¹, 井上 智博²

Kaito YOSHIZAWA¹, Tomohiro INOUE²

¹京都工芸繊維大学, ²Kyoto Design Lab

¹Kyoto Institute of Technology, ²Kyoto Design Lab

【要約】

本研究は、廃棄プラスチックを素材とした「プレシャスプラスチック×デジタルファブリケーション」の実践である。大量生産・消費される日用品の循環の中で廃棄されるプラスチックに着目し、学生自らが回収・分別・洗浄・乾燥・粉砕を行うことで素材化を試みた。製作実験では、粉砕したキャップと PLA 端材を混合したペレット式 3D プリンターによる造形、および PP 板材化したキャップを用いたレーザーカット加工を実施し、それぞれ安定した出力と複雑形状の精密な再現を可能にした。さらに、得られた手法を基盤に、イベントにおけるワークショップ、インスタレーション、製品販売、子供向け素材提供といった多様な社会実践を展開した。これらの活動を通じて、アップサイクルを生活に近い取り組みとして、またサーキュラーエコノミーの担い手を拡げることが目的とした実践を行なった。

キーワード: プレシャスプラスチック, デジタルファブリケーション, アップサイクル, 学生プロジェクト, 社会実践

【Abstract】

This study reports a practice of "Precious Plastic × Digital Fabrication" using discarded plastics as materials. Focusing on plastics discarded in the cycle of mass production and consumption of daily products, students themselves carried out collection, sorting, washing, drying, and shredding to prepare them as materials. In fabrication experiments, a pellet-based 3D printer was used to create objects by mixing shredded caps with PLA scraps, and laser cutting was applied to PP sheets made from caps, enabling both stable output and precise reproduction of complex shapes. Building on these methods, diverse social practices were developed, including workshops, installations, product sales, and providing materials for children's creative activities at various events. Through these activities, the project was conducted as a practice of bringing upcycling closer to everyday life and as an effort to expand the number of practitioners contributing to the circular economy.

Keywords: precious plastic, digital fabrication, upcycling, student project, social practice

1. 研究背景

地球温暖化や海洋プラスチック汚染などの地球規模の環境問題は、人類全体が直面する喫緊の課題である。これらを解決するためには、資源を循環させて無駄を最小化する「サーキュラーエコノミー」への移行が不可欠である。その実現は事業者や自治体に任せきりでできるものではなく、一般の人々も身近な生活のなかでできることから実践することが重要である。

とりわけ、大量に生産・消費されている日用品の循環に目を向けると、使い終わればすぐに廃棄されてしまうものが数多く存在する。そのなかから廃棄物を素材として捉え直し、新たな製品や体験を生み出す「小さなサイクル」を積み重ねていくことが求められる。さらに、そのプロセスをできるだけ多くの人に体験してもらうことで、生活実践者を増やし、サーキュラーエコノミーの実現に近づくことができる。

2. 先行事例

世界的な事例としては、分散的な廃プラスチック再利用を推進する Precious Plastic、廃棄プラスチックを

回収・交換する仕組みを提供する Plastic Bank、マレーシアを拠点にデザインとリサイクルを掛け合わせた活動を行う Biji-Biji Initiative が挙げられる。日本国内では、市民参加型のアップサイクル実践として“Two Cranes” Co-Creation Project が活動を展開している。

本研究は、これらの組織に直接参加するものではなく、それらの活動を参照しながら、学生が主体となって素材選定・回収・加工・展示までを一貫して行った。

3. 実践内容

本研究の実践は、①事前準備、②製作実験、③社会実践の三段階で構成される。

3.1 事前準備

アップサイクルの対象素材は、ペットボトルキャップ (PP・PE) および PLA とした。

- ・ ペットボトルキャップ

Precious Plastic などの事例でも多く扱われており、世界的に広がりを見せている。また、日常的に大量に廃棄される身近な素材であり、本体ボトルに比べて熱整形しやすい。学内におけるゴミ箱付近

に回収ボックスを設け、ペットボトルキャップを回収した(Fig. 1).

- PLA

大学内のデジタル工房で発生する端材であり、3Dプリントの失敗品やサポート材など、通常のフィラメントとして利用できない廃材を活用した(Fig. 2).



Fig. 1

Fig. 2

素材は学生自身が 回収 → 水洗(Fig.3) → 乾燥 → 分別 → 粉碎(Fig.4) の工程を行い、加工可能な状態に整えた。このプロセスは、廃材を素材へと再定義する体験そのものであり、循環型社会の一端を実感できるステップとなった。



Fig. 3

Fig. 4

3.2 製作実験

製作実験として、ペレット式 3D プリンターとレーザーカッターの二つのデジタルファブリケーションを用いた。

3.2.1 ペレット式 3D プリンター

ペレット式 3D プリンター (GEM121010) を用いて造形実験を行った。最初に PP のみで出力を試みたが、粘性が高く出力は安定しなかった。そこで PLA を混合することで流動性が改善し、出力に成功した。条件は回転数 15 rpm、ヒーター温度は上部 165 °C・下部 190 °C とした(Fig.5)。

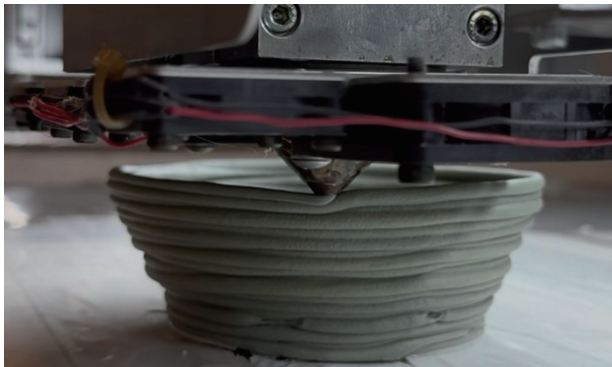


Fig. 5

また、本来であればリペレタイズ(再ペレット化)を行うが、これは追加のエネルギーを要する。そこで本研究では粉碎後の粒径が不均一な状態のまま投入し、安定した出力を実現した。この結果、工程の一部を省略し、

時間とエネルギーの節約につながった(Fig.4)。

3.2.2 レーザーカッター

ヒートプレスを用いてペットボトルキャップ由来の PP 板を作成し、レーザーカッター (NOVA16 Elite 130W) を用いた加工実験を行った。出力条件はスピード 10、パワー 75 とし、厚さ約 5 mm の PP 板を切断した(Fig.6)。当初はレーザーカッター (SPIRIT GLS 40W) を使用していたが、ワット数の不足により一度では切断できず、切断面が溶けて再付着する現象も確認された。加工機を変更し出力条件を調整することで、漢字のような細かい形状を精度よく切り出すことに成功した (Fig.7)。



Fig. 6

Fig. 7

3.3 社会実践

アップサイクルを社会に普及する取り組みとして、ワークショップ、インスタレーション、製品販売、子供向け素材提供など、多様な形態で活動を展開した。

3.3.1 ワークショップ (ARIFUJI WEEKENDERS 2025)

フェス参加者が持参したペットボトルキャップを用いて、オリジナルのキーホルダーを製作するワークショップを実施した。各色の粉碎ペットボトルキャップを参加者が選び、ヒートプレスでプレートを作成した(Fig.8)。また、レーザーカッターで作成したスタンプを用いて「ARIFUJI」の文字を刻印した (Fig.9)。



Fig. 8

Fig. 9

3.3.2 インスタレーション (ARIFUJI WEEKENDERS 2025)

フェス内で多く廃棄されていたビールカップを回収し (Fig.10)、その場で積層・組み合わせて円形の大型構造物を制作した。子供の遊具や写真撮影スポットとして

機能し、フェスという日常的空間におけるアップサイクルの可能性を示した (Fig.11).



Fig. 10

Fig. 11

3.3.3 プロダクト販売(COSMIC PARADISE VOL.3)

外国人向けのフェスにて、ペットボトルキャップ由来のPP板をレーザー加工して制作した漢字キーホルダーを「おみくじ」と組み合わせて販売した (Fig.12). 約 30 名が参加し、多くの外国人に興味を持たれた (Fig.13, Fig.14).



Fig. 12

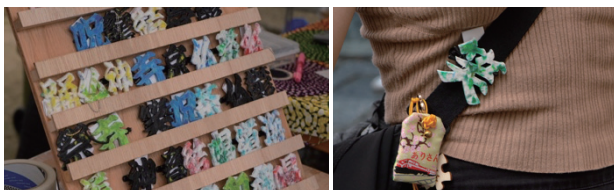


Fig. 13

Fig. 14

3.3.4 マテリアル提供(ONE MUSIC CAMP 2025)

子供たちがキャップの色を選び、自分だけの作品を制作するワークショップを行った。約 30 名が参加し、素材がペットボトルキャップ由来であることに驚きと興味を示した (Fig.12, Fig.13).



Fig. 15

Fig. 16

これらの活動により、廃材アップサイクルの成果を参加者と直接共有、体験してもらい、身近な場面で触れてもらう機会を提供した。

4. 考察と今後の課題

本研究を通じて、廃材活用はワークショップ、インスタレーション、プロダクト、マテリアル提供といった多様な形態で社会実装できることを確認した。参加者は子供

が多く、カラフルな素材感や「キャップからできている」という意外性に魅力を感じていた。一方で、大人の参加は比較的少なく、今後は幅広い世代にアプローチする方法を検討する必要がある。

また、プロダクトデザインやワークショップパッケージの洗練を進めることで、より多くの人々に持続的に受け入れられる実践へと発展できると考える。

5. まとめ

本研究は、ペットボトルキャップと PLA という身近な廃棄素材を用い、学生主体でアップサイクルに取り組んだ実践を報告した。素材特性を活かした造形の工夫と、ワークショップ・インスタレーション・プロダクト・マテリアルといった多様な社会実装の試みによって、サーキュラーエコノミーに向けた小さな循環を提示した。今後は、参加者層の拡大と実践形態の洗練を通じて、より持続可能な活動へと発展させていくことを目指す。

6. 謝辞

本研究の活動には、多くの学生メンバー・先生にご協力を得た。ここにそのお名前を記し、深く感謝の意を表する。(五十音順)

有田協人, 乾結心, 加藤ひなた, 川村雅樹, 川野涼香, 久保歩風, 駒井涼, 崔美韻, 杉山鼓太郎, 鈴木杏子, 高田ほのか, 高木琉嘉, 田井則一, 田淵智彦, 中尾匠, 中島百萌, 中道咲花, 中山華琳, 林賢太郎, 藤岡遼, 宮田梨穂子, 南美瑛, 森湖音, 矢野絢子, 米津七日, ARIFUJI WEEKENDERS・COSMIC PARADISE・ONE MUSIC CAMP 関係者様

7. 図目次

- Fig. 1. 回収されたペットボトルキャップ
- Fig. 2. 工房内の PLA ゴミ
- Fig. 3. ペットボトルキャップを洗浄している様子
- Fig. 4. 粉碎されたペットボトルキャップ
- Fig. 5. ペレット 3D 式プリンターの造形時の様子
- Fig. 6. ペットボトルキャップ由来の PP 板をレーザー加工している様子
- Fig. 7. レーザー加工によって切り出された漢字キーホルダー
- Fig. 8. ヒートプレスワークショップを行っている様子
- Fig. 9. ヒートプレスしたプレートに「ARIFUJI」のスタンプを押している様子
- Fig. 10. フェス内で回収したビールカップ
- Fig. 11. フェス内で実施したインスタレーション
- Fig. 12. ブース全体の様子
- Fig. 13. 漢字キーホルダー
- Fig. 14. 購入者が身につけている様子
- Fig. 15. 粉碎ペットボトルキャップを色ごとに分別されたボックス
- Fig. 16. ペットボトルキャップ由来の PP 板を素材として子どもが製作した作品

参考文献

1. IGES, “Upcycling Workshop in Redang Island, Malaysia”, Workshop Report (2023). Available at: <https://www.iges.or.jp/en/events/20230916> (accessed 2025-09-14).
2. AIT, “Turning Trash into Cash: Workshop on Upcycling Plastic Waste by Precious Plastic Bangkok”, Workshop Report (2021). Available at: <https://ait.ac.th/2021/02/turning-trash-into-cash-special-workshop-on-upcycling-plastic-waste-by-dominic-chakrabongse/> (accessed 2025-09-14).
3. Bali Waste Management Training Center, “A Workshop on Upcycling Plastic Waste”, Community Workshop Report (2020). Available at: <https://baliwmtc.com/a-workshop-on-upcycling-plastic-waste/> (accessed 2025-09-14).
4. Ministry of the Environment Japan / Keio University COI-NEXT, “Upcycling of Waste Plastic in Kamakura: RecyCreation Lab”, Case Study (2022). Available at: <https://j4ce.env.go.jp/en/casestudy/171/> (accessed 2025-09-14).
5. 唐津 SDGs プロジェクト, “Precious Plastic 唐津: Re:CYCLE ワークショップ [Precious Plastic Karatsu: Re:CYCLE Workshop]”, Community Event Report (2022). Available at: <https://www.karatsusdgs.com/recycle-report.html> (accessed 2025-09-14).
6. Terra Cypria, “Supporters Workshop: Crafts Using Recycled Plastic”, Workshop Report (2021). Available at: <https://terracypria.org/supporters-workshop-we-made-crafts-using-recycled-plastic/> (accessed 2025-09-14).
7. 岡山県立大学デザイン学部, “岡山県立大学でのデジタル・ファブリケーション環境を活用したものづくり [Makers’ workshop using digital fabrication environment at Okayama Prefectural University]”, *Proceedings of the 61st Annual Conference of the Japanese Society for the Science of Design* (2014), Session C5-03.

応力解析を用いたインフィル効率化による軽量・高剛性 3D プリント手法

A Novel 3D Printing Technique for Fabricating Lightweight and High-Stiffness Structures through Optimized Infill Distribution Based on Stress Analysis

谷口 朝洋¹, 矢田 美涼¹, 田中 浩也²

Tomohiro TANIGUCHI¹, Misuzu YADA¹, Hiroya TANAKA²

¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学

¹Keio University Graduate School, ²Keio University

【要約】

MEX 方式 3D プリンタでは、スライスソフトが 3D モデルを外周壁と内部の格子構造(インフィル)からなる造形データに変換する。しかし、従来のインフィルは基本的に密度が均一であるため、材料や造形時間の観点から非効率という課題があった。

そこで本研究では、構造解析による応力分布に基づきインフィル密度を部位ごとに最適化する手法を提案し、それを実現するソフトウェア『Strecs3D』を開発した。

本ソフトウェアは、応力が高い領域には密なインフィルを、低い領域には疎なインフィルを配置する造形データを生成する。本手法を用いて製作した造形物の評価を通じて、材料使用量と造形時間を削減しつつ、剛性を大幅に向上できることを確認した。

キーワード: 3D プリンタ, インフィル, ソフトウェア, 応力解析, FEA

【Abstract】

In Material Extrusion (MEX) 3D printing, slicing software converts a 3D model into fabrication data, which consists of outer shells and an internal lattice structure known as infill. However, conventional infill typically has a uniform density, posing a challenge of inefficiency in terms of material consumption and fabrication time. This study proposes a method for locally optimizing infill density based on stress distribution derived from structural analysis. To implement this method, we have developed a software tool named "Strecs3D." This software generates fabrication data by assigning a dense infill to high-stress regions and a sparse infill to low-stress regions. Evaluation of fabricated parts demonstrates that the proposed method can significantly improve stiffness while simultaneously reducing both material usage and fabrication time.

Keywords: 3DPrinter, Infill, Software, Stress Analysis, FEA

1. はじめに

1.1 背景

積層造形(Additive Manufacturing, AM), 特に熱溶解積層(Fused Deposition Modeling, FDM)方式の 3D プリンティング技術は、試作品製作から最終製品の製造に至るまで、その応用範囲を急速に拡大させている。FDM 方式において、造形物の内部を充填する構造は「インフィル」と呼ばれ、その密度やパターンは、完成品の機械的強度、重量、そして造形時間を決定づける極めて重要な設計パラメータである[1]。

従来、多くのスライサソフトウェアで採用されている標準的なアプローチは、インフィルの密度やパターンをモデル全体にわたって均一に適用するものであったが、構造力学的な観点からは課題を内包している。

実際の工学製品が荷重を受ける際、その内部に生じる応力は決して均一に分布しない。応力は特定の箇所に集中する一方、他の多くの領域ではごくわずかな応力しか発生しないのが一般的である。しかし、均一なインフィルを適用する従来の手法は、このような不均一な応力分布を考慮していない。その結果、応力がほとんど

かからない不要な部分にも過剰な材料が配置される一方で、強度が最も要求される応力集中部では材料が不足するという、構造的な非効率が生じる。

このような非効率な材料配置は、材料の無駄や、重量および造形時間の増加につながる。また、大きな力がかかる部分では強度が不足し、意図しない破損を招く可能性もある。したがって、軽量で信頼性の高い部品を造るためには、実際の負荷に応じて材料を効率的に配置する、新たなインフィル最適化技術が求められる。

1.2 関連研究

3D プリンティングにおけるインフィル最適化のアプローチは、その原理と実装の複雑さから、スライサーに統合された幾何学的ヒューリスティクスと、物理シミュレーションに基づく先進的な計算設計フレームワークに大別される。

前者は、Prusa Slicer の「アダプティブキュービックインフィル」機能[2]に代表されるように、モデルの外壁からの距離といった幾何学的特徴に基づいて経験則的に密度を変化させる手法である[3]。これらは計算コストも低く一般的なスライスソフトへ統合されておりユーザビリティ

ティが高いものの、実際の荷重条件を考慮しないため最適化の精度には限界がある。

後者は、構造解析や計算設計フレームワークを駆使する、より専門的で理論的なアプローチである。その中核をなすのが、与えられた設計領域、荷重、境界条件の下で剛性などの性能を最大化するように材料の最適配置を算出する計算手法であるトポロジー最適化(TO)だ。これをインフィルに応用する研究として、例えば Jun Wu らは、部品の外殻を維持しつつ、内部の均一なインフィルを TO によって生成された耐荷重性に優れたラティス構造に置き換える手法を提案した[4]。また、Li Yi らは TO の解析結果をフィラメントの吐出量を局所的に制御する手法に埋め込み、最適化された密度分布を物理的に再現するアプローチを提示している[5]。他にも Yamin Li, Samuel Rilling らをはじめ、TO の結果からインフィル密度を局所的に変化させる試みは数多く存在する[6,7]。

さらに、Kam-Ming Mark Tam は密度ではなく、応力解析に基づきフィラメントの経路自体を主応力方向に沿わせることで最適化を目指すなど、多様な研究が進められている[8]。

1. 3 研究目的

前節で示した、大多数のユーザーが利用する簡易な手法と、一部の専門家のみが利用可能な高度な手法との間には、応用上の断絶、いわゆる「アカデミック・プラクティショナー・ギャップ」[9]が存在する。本研究で開発した Strecs3D(Fig. 1)は、このギャップを埋めることを目的とする。基本的な有限要素解析(FEA)の結果に基づき、工学的に妥当な応力分布に従ってインフィル密度を最適化する。これにより、TO ほどの複雑性を伴わずに物理ベースの最適化を可能とし、専門家でないエンジニアや設計者にもアクセス可能な実用的ソリューションを提供するものである。

Table1. Comparison with conventional methods

手法	基本原理	主な入力	主な出力	計算コスト	主な利点	主な限界
Adaptive Cubic[2]	幾何学的ヒューリスティクス	スライサー設定	G コード	低	周辺部の強度向上	荷重を考慮しない
Modifier(手動修飾子)	ユーザーの直感	Modifier メッシュ	G コード	低	局所的な制御	非科学的、非スケラブル
グラデーションスクリプト ³	幾何学的ヒューリスティクス	G コード+スクリプト	変更された G コード	低(後処理)	滑らかな勾配	外部ツールが必要
Strecs3D	FEA 応力マッピング	STL + VTU (荷重/拘束)	密度領域を持つ 3MF	中(前処理)	アクセス可能な物理ベース最適化	等方性を仮定、非反復的
トポロジー最適化[4, 5, 6, 7]	数学的最適化	設計空間+荷重	最適化された STL/STEP	高	新しい形状の生成	計算コストが高い
応力整合ツールパス ⁸	異方性プロセス最適化	FEA 応力場	曲線 G コード	非常に高い	異方性強度を最大化	研究レベルの複雑性

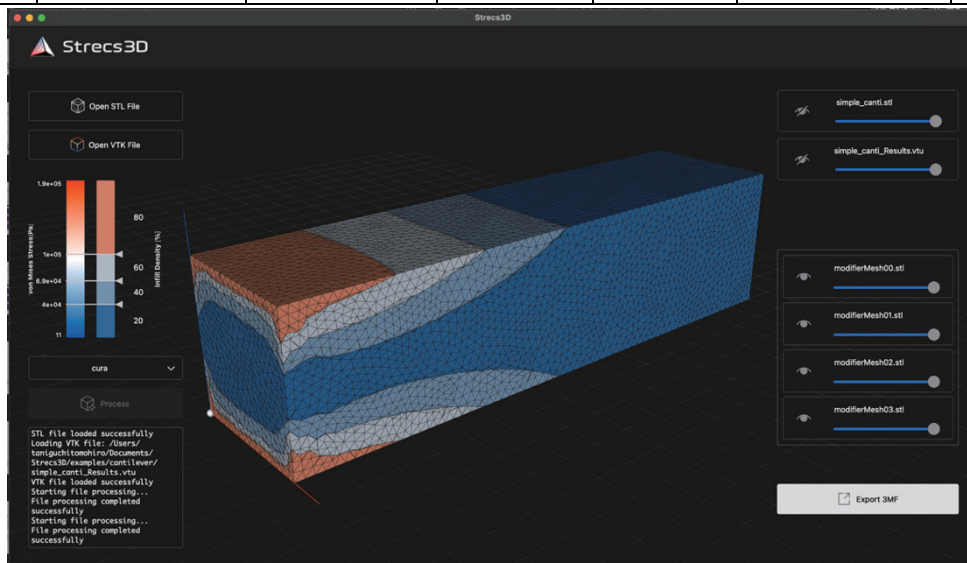


Fig.1. Screenshot of Strecs3D

2. 提案手法

本研究では、3D プリント部品の内部構造を力学的な要求に応じて最適化するため、汎用ツールと独自開発のソフトウェアを連携させる新たなワークフロー「Strecs3D メソッドロジー」を提案する。本手法は、(1)汎用 CAE ソフトによる応力解析、(2)提案ソフトウェア Strecs3D による最適化意図の具体化、(3)主要スライサーによる最終的な G-code 生成という 3 つのステップで構成され、専門的な知識がなくとも応力に基づいたインフィル設計を可能にする。

第一に、FreeCAD などの汎用 CAE ソフトを用いて、対象モデルに想定される荷重・拘束条件に基づいた有限要素解析 (FEA) を実行し、内部の応力分布データ (VTU ファイル) を取得する (Fig. 2)。

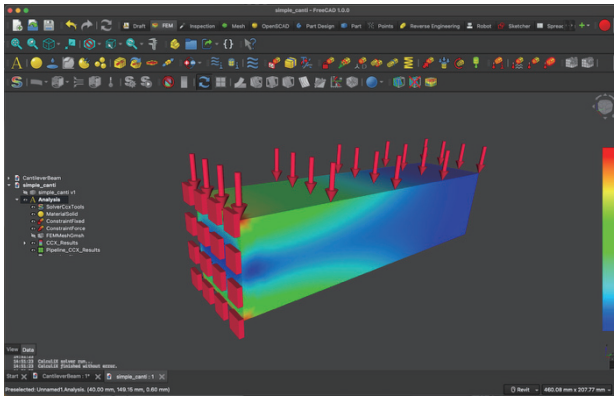


Fig.2. An example of an FEA simulation in FreeCAD

第二に、本研究で開発したソフトウェア「Strecs3D」に、モデル形状 (STL) と先の応力分布データ (VTU) を読み込む。ユーザーは、ソフトウェア上で可視化された応力分布を確認しながら、応力とインフィル密度の対応関係を設定する。Strecs3D は、このルールに基づき、高応力領域や低応力領域を自動で抽出し、その空間を囲むモディファイア・メッシュを生成する。これにより、力学的な要求に応じた局所的な材料配分の「意図」が、具体的な 3D データとして具現化される。

最終ステップとして、モデル本体と自動生成された複数のモディファイア・メッシュを、オブジェクトの相対位置関係と各々の役割情報 (モデルかモディファイアか) を保持できる。3mf 形式の単一ファイルとして出力する。

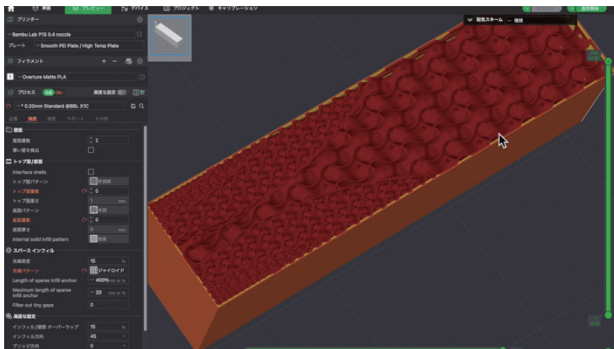


Fig.3. Slicing the data output from Strecs3D

サーで開くと、最適化の意図が正確に伝達され、ユーザーは各モディファイア領域に任意のインフィル設定を割り当てることができる (Fig.3)。それを実際に造形したものを Fig. 4 に示す。

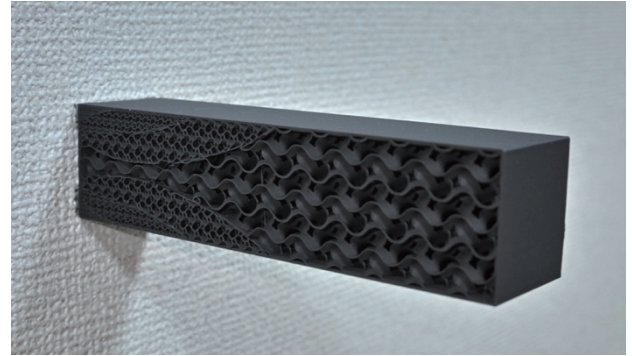


Fig.4. An actual 3D-printed cantilever beam

本手法の技術的特徴は、ツールパス自体を直接生成するのではなく、最適化の抽象的な「意図」を標準化された形式で既存のスライサーに伝達する点にある。複雑な G-code 生成は各スライサーが持つ高度に最適化されたアルゴリズムに委ねることで、特定の実装に依存しない高い堅牢性と将来性を確保した。これは、アカデミックな理論と実践的なものづくりとの間に存在するギャップを埋める、現実的かつ持続可能なソリューションである。

3. 実験

3.1 試験片の作成

Strecs3D の有効性を検証するため、本実験では 2 種類の試験片を作製し、その機械的特性を比較した。両試験片は共通の条件として、寸法を 50mm × 90mm × 7.5mm、材料を PLA (Polylactic Acid) とし、Bambu Lab P1S を用いて造形した。

試験片 A は、応力解析ソフトウェア「Strecs3D」を用いて作製した。本ソフトウェアによる応力解析結果に基づき、以下のマッピングに従って局所的なインフィル密度を最適化した。作製した試験片 A の質量は 8.3 g、造形時間は 16 分 42 秒であった。

応力下限値 [Pa]	応力上限値 [Pa]	インフィル密度 [%]
1.2×10^4	9.2×10^4	5
9.2×10^4	3.2×10^5	15
3.2×10^5	5.6×10^5	25
5.6×10^5	7.5×10^5	40

比較対象として、インフィル密度を均一にした試験片 B を作製した。試験片 B のインフィル密度は、試験片 A と質量を等しくするため、全体で 16% に設定した。その際の造形時間は 16 分 40 秒であった。

3.2 実験結果

圧縮試験の結果、剛性の指標となるピーク荷重は、試験片 A が 365N であったのに対し、試験片 B は 220N を記録した (Fig.5)。この結果は、Strecs3D を適用することにより、同一重量・同一造形時間でありながらピーク荷

重が 145N 高く、剛性が約 66%と大幅に向上していることを示す。



Fig.5. Compression test setup: (a) Streccs3D-applied infill,
(b) uniform infill

4. 考察と今後の展望

本研究では、応力解析結果に基づき、スライサーのモディファイア・メッシュ機能を活用してインフィルを適応的に最適化する前処理ワークフロー「Streccs3D」を提案した。本手法は、.3mf フォーマットを介して既存のツールエコシステムにシームレスに統合され、高度な最適化を一般ユーザーに解放するものである。

本研究の貢献は、新たな最適化アルゴリズムの発明ではなく、既存技術を革新的に統合することで新しいワークフローを創出し、それによる技術の民主化を実現した点にある。これは、専門家と一般ユーザーの間に存在する「アカデミック・プラクティショナー・ギャップ」を埋める実用的なソリューションとして位置づけられる。

一方で、本ワークフローはアクセシビリティを最大化するために、シミュレーションの物理的忠実度においていくつかの実用的な妥協を含んでいる。第一に、異方性の未考慮である。FDM 方式の 3D プリント品は積層方向に起因する顕著な異方性を持つ。そのため、シミュレーション上の応力分布と実際の物理モデルにおける応力分布には乖離が生じる。第二に、非反復的な最適化プロセスである点である。インフィル構造を変更すると全体の剛性が変化し、応力分布も再計算されるべきだが、本手法は初期の FEA 結果のみに基づく一方の「オープンループ」プロセスを採用している。

これらの限界は認識しつつも、均一なインフィル設定と比較して強度重量比を大幅に改善できる実用的な価値は大きいと考えられる。今後の展望としては、異方性を考慮した材料モデルの導入や、簡易的な反復計算ループを実装することを検討するなどの高忠実度化が挙げられる。さらに、機能拡張として、応力の種類(引張, 圧縮, せん断など)に応じて最適なインフィル「パターン」や「配向」を選択・制御する機能への拡張も目指す。

謝辞

本研究は IPA(情報処理推進機構)の未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援を受けている。加えて、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2111 の支援を受けたもの

である。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. Raise3D. "Infill 3D Printing: Patterns, Density and Issues." Raise3D Blog. Accessed September 7, 2025. <https://www.raise3d.com/blog/infill-3d-printing/>.
2. Prusa3D. "Infill patterns." Prusa Knowledge Base. Accessed September 7, 2025. https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130.
3. Herman, Stefan. "Gradient Infill for 3D Prints." CNC Kitchen. Accessed September 7, 2025. <https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints>.
4. Wu, Jun, Niels Aage, Rüdiger Westermann, and Ole Sigmund. "Infill Optimization for Additive Manufacturing – Approaching Bone-like Porous Structures." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 24, no. 2 (2018): 1127-40. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2655523>.
5. Li, Yi, Jan Mertes, Matthias Klar, Shradha Ghansiyal, Chengkai Fei, Moritz Glatt, and Jan C. Aurich. "A New Gradient Infill Design Method for Material Extrusion Using Density-Based Topology Optimization and G-Code Extension." Manufacturing Letters 37 (2023): 21-25. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.06.003>.
6. Li, Yamin, Chenyang Shi, Xiangyu Wang, Shangqin Yuan, Jihong Zhu, and Weihong Zhang. "A Mapping-Based Graded Infill Structure Design Method and Continuous Printing Path Planning." Additive Manufacturing 98 (2025): 104639. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104639>.
7. Rilling, Samuel, Ignacio Ríos, Álvaro Gómez, Marian Valenzuela, Angelo Oñate, and Victor Tuninetti. "Optimized Infill Density Through Topological Optimization Increases Strength of Additively Manufactured Porous Polylactic Acid." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 129 (2023): 3739-50. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12554-z>.
8. Tam, Kam-Ming Mark, and Caitlin T. Mueller. "Additive Manufacturing Along Principal Stress Lines." 3D Printing and Additive Manufacturing 4, no. 2 (June 2017): 63-81. <http://dx.doi.org/10.1089/3DP.2017.0001>.
9. Kaufman, Bruce E. "The Academic-Practitioner Gap: Past Time to Bring in the Practitioner Perspective." Human Resource Management Review 32, no. 2 (June 2022): 100895. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100895>.

食品廃棄物を原料とする,香りを有した 3D プリント材料とその応用先の開拓

Scented 3D Printing Materials Derived from Food Waste and Their Potential Applications

黄家慧¹, 吉田る花², 鳥居巧¹, 田中浩也²

Kawai WONG¹, Ruruka YOSHIDA², Takumi TORII¹, Hiroya TANAKA²,

¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学

¹Keio University Graduate School, ² Keio University

【要約】

本研究は,地域で回収された有機廃棄物から,押出式 3D プリンタ用の DIY バイオプラスチックを開発し,その応用の可能性を探るものである。廃棄物処理による環境負荷が深刻化し,再資源化が求められる中,食品残渣や花,貝殻といった廃棄物を材料として活用するだけでなく,それらに固有の香りに着目した。DIY バイオプラスチックの価値として,廃棄物に含まれる香りを付与することで,新たな応用が期待される。これらの香りを生かしたまま加工できるゼラチンなどを基材とし,香りを楽しむことのできる DIY バイオプラスチックの開発を試みた。さらに,押出式 3D プリンタの造形によって土との接触面を拡張し,DIY バイオプラスチックならではの生分解性を最大限に活かすことで,最終的に土壌へと還元される構造を設計する。これらを通して,使用時には香りを楽しみつつ,使用後には土壌に還元される多機能な素材の開発とその応用方法を模索した。

キーワード: DIY バイオプラスチック, 3D プリンティング, 廃棄材リサイクル, 生分解性, 香り

【Abstract】

In this research, DIY bioplastics for extrusion 3D printing were developed using locally collected organic waste, including food scraps, flowers, and shells, with a focus on retaining their unique scents. Gelatin-based materials preserve these natural aromas, allowing users to enjoy fragrance while using the material. The 3D printing approach increases the material's contact with soil, enhancing biodegradability and enabling structures to return to the environment after use. This study explores multifunctional, scent-infused bioplastics that combine sensory experience with sustainability, offering new possibilities for waste recycling and eco-friendly material applications.

Keywords: DIY bioplastic, 3D printing, waste recycling, biodegradability, scent

1. はじめに

1.1 背景

近年,プラスチック廃棄物による環境負荷は国際的に深刻な課題となっている。こうした時代背景を受け,石油由来プラスチックに替わる持続可能なバイオプラスチックに関して,幅広い研究が進められている。食品残渣や枝葉などの廃棄物は「汚い」「臭い」という消極的なイメージを持たれ,再利用可能性があるにも関わらず,焼却・埋立処理されているのが現状である。

DIY バイオプラスチックとは,ゼラチン,キトサン,寒天,澱粉質,アルギン酸ナトリウムなど天然由来の高分子を主成分とし,自然環境下で生分解可能な素材である。家庭環境や手に入りやすい設備で制作可能であり,食品残渣といった有機廃棄物を材料として活用できる。このため DIY バイオプラスチックは生分解性を持つとされているというメリットがある[1]。昨今の環境意識の高まりに伴い,教育分野およびデザイン分野における活用が拡大している[2]。

DIY バイオプラスチック研究はその生分解性や環境適

合性が注目され発展してきた。その分解性ゆえに機械的安定性に乏しく,工業用途での実用化の妨げとなっているとの報告もある[3]。一方で,既存のプラスチックの用途とは異なる活用方法を模索する試みの中で,生分解性を最大限に引き出す手法も検討されている。材料の組成や架橋度が分解速度に影響し,さらに土壌の種類・湿度・温度などの環境条件によって分解挙動も変動することが報告されている[4]。しかし,これまで DIY バイオプラスチックを使用する上で,生分解性というメリットが強調されてきたが,その特性を構造設計に積極的に取り込んだ研究はまだ十分に進んでいない。

地域に根ざした資源循環や再利用の仕組みが求められていることを踏まえ,本研究ではまず, DIY バイオプラスチックを 3D プリンタで造形できるよう,原料を配合する割合を調整した。これにより,DIY バイオプラスチックを 3D プリントならではの複雑な形状に加工することができる。複雑な形状は土との接地面積を増やし,土壌生分解が早く進行することが期待される。次に,藤沢市で回収された有機廃棄物を原料にし,香りに着目しながら DIY バイ

オプラスチックを制作した。

1.2 関連研究

アート・デザインの分野では、近年 3D プリンタを利用した DIY バイオプラスチックの成形が試みられている。例えば、MIT Media Lab の Mediated Matter Group はキトサンやセルロースを材料にした 3D プリント技術を開発し、生分解性を有する建築部材のデザインを製作している [5]。

一方で、多くの芸術系大学や個人スタジオにおいては、機材設備や技術的制約のため、依然として鋳型を用いた板材や膜状の平面的な成型加工が主流である。たとえば FabTextiles の Anastasia Pistofidou がゼラチンとグリセリンを用いて鋳型成形した DIY バイオプラスチックによる衣服は、シンプルな鋳型で生地やテクスチャを作る可能性を示している [6]。しかし、一般的に広く知られる DIY バイオプラスチックのレシピでは、鋳型成型による厚みのある造形では、内部の乾燥が進みにくく、ひび割れやカビが発生しやすいという課題も存在する。

1.3.本研究の目的

本研究では、押出式 3D プリンタを活用し、立体的かつ空隙構造を付与することで、均一に乾燥しやすくしつつ、生分解効率の最大化を目指す。加えて、本研究では藤沢市から収集した有機廃棄物を材料として DIY バイオプラスチックに活用する。製品の使用期間中に廃棄物由来の香りを活かし、従来の機能性志向の研究にはみられない、嗅覚的な価値を付与することを目指す。

2.造形方法

本研究で使用した材料とその検討過程について述べる。

2.1.素材の割合の探求

DIY バイオプラスチックの原料として、ゼラチン、寒天、キトサン、ペクチンなどを凝固剤として用いることが知られている。これらは単独、あるいは植物繊維などの天然原料と混合し、加熱や攪拌を経て DIY バイオプラスチックとして利用される。

今回、割合選定の基準として、材料が押出式 3D プリンタで安定的に押出され、成形後に形状を保持し、さらに乾燥過程において収縮や変形を生じないことを重要視する。また、これらの過程を経て制作される造形物に香りが残るようにした。

これらの要件を踏まえ、ゼラチン、澱粉質、アルギン酸ナトリウムを組み合わせた配合実験を行った。ゼラチンは冷却後に速やかにゲル化する特性を持ち、押出直後の形状保持に寄与する (Fig.1 Left)。一方、澱粉質は乾燥後の硬度や強度を補う。また、本研究で使用する 3D プリンタは、材料がシリンジからチューブを通してノズルに送られる過程で加熱されないため、急速な凝固による詰まりを防ぐ必要がある。そのため、凝固速度の比較的遅いアルギン酸ナトリウムを配合することで、シリンジおよびチュ

ーブ内の押し出される前の素材を固まりづらくした。一方、押出後は形状が保持する必要があるため、表面へ濃度 1% 程度の塩化カルシウム溶液を噴霧した [7]。

乾燥過程においてサンプルの収縮や反りが観察された (Fig.1 Middle)。これは含水率が高いため、完全乾燥時に収縮が生じることに起因すると考えられる。この問題を解決するため、地域で回収した貝殻を粉碎した粉末を配合に加え、固形成分の割合を高めることで変形の抑制を試みた (Fig.1 Right)。

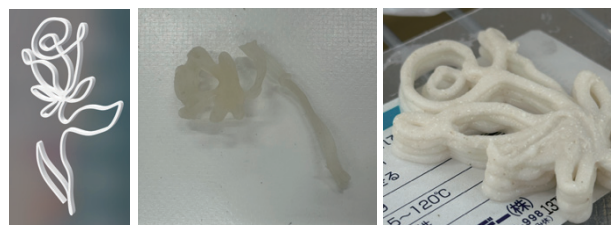


Fig. 1. 3D printing file 1 (Left)

Sample showing shrinkage (Middle)

Drying process after adding shell powder (Right)

2.2.プリンタとパラメータの設定

複数回の実験の結果、やや粘性のあるペースト状の素材は、安定して成形され、吐出時に材料が広がりづらく、積層しやすいことが分かった。そこで、プリントの押出方式を参考に、Ender-3 V3 SE (Creality 社製) にシリンジと吐出幅の広いエクストルーダを装着し、改造したセラミック対応 3D プリンタを用いてプリントを行った。シリンジエクストルーダの設定は subdiv を P-04、モーター速度を 60 として連続運転し、レイヤーピッチを 1 mm、線幅を 1 mm とした (ただしエクストルーダの補正により実際の押出量には誤差が生じる)。材料の粘度が高いため、プリント速度は 4 mm/s とやや遅く設定した。この素材は 3D プリント中にリトラクションが可能であり、様々な形に造形できる。

DIY バイオプラスチックの製作手順は以下に示す通りである。

3.製造工程

3.1.原料の収集

藤沢市のレストランや花屋など香りを持つ素材が出そうな場所へ赴き、素材の回収を試みた。調査の結果として、藤沢市の海鮮料理を提供する居酒屋から貝殻類が収集可能であることを確認した。また、イタリア料理屋からはオレンジの皮を回収でき、花屋では廃棄された花や枝葉を手に入れることができた。

3.2.準備

素材を重曹、クエン酸で洗浄する (Fig.3)。オレンジの皮と枝葉などはあらかじめ、香りをアロマオイルとして抽出する。その後、風通しの良い場所で乾燥させる。最後に、粉碎機でパウダー状にする (Fig.4)。

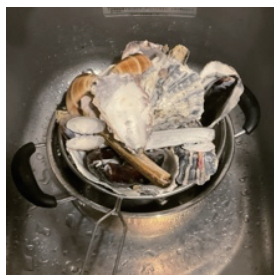


Fig. 3. Cleaning process



Fig. 4. Powdering process



Fig. 7. Sheet drying process (Left)

Fig. 8. 3D printing file 2 (Right)

3.3 プリント用素材の製作プロセス

最終的な配合比はアルギン酸ナトリウム:澱粉質:ゼラチン:グリセリン:貝殻粉末:水=2:30:3:1:20:100 とした。

まず、ゼラチン、澱粉質、アルギン酸ナトリウムなどをレシピ通り正確に秤量する。そして、澱粉質を冷水に入れて攪拌し、均一になった後、65 度程度まで加熱されたらゼラチンを加える (Fig. 5)。最後に加熱を止めて、アルギン酸ナトリウムを入れる。すべての材料を溶解・混合した後、プリント用シリンジに充填する。



Fig. 5. Material preparation process

3.4.香りのするプロダクトの試作

以上にみられる手法を用いて、DIY バイオプラスチックによるプロダクトのプロトタイプを制作した。この製作物は香水などの香りを試すための「ムエット」というアイテムから着想を得ている。このプロトタイプは、オレンジの香りがするシートと花の香りがするシートの間に、その 2 種類の香る素材を表した形の 3D プリント造形物の中に挟み込んだ構造になっている (Fig. 6)。香りシートについては、ゼラチン:グリセリン:水=4:1:20 の割合で調製し、型に流し込み乾燥させた (Fig. 7)。3D プリントされた DIY バイオプラスチック (Fig. 8) は、その香りに対応する形状にすることで、ユーザに香りを想起させることを狙った。シートと同じ材料・配合で両シートの縁に塗布し、接着することで一枚のムエットを作成する。最後に固定用の紐を結び付け、これにより DIY バイオプラスチック版のムエットが出来上がる (Fig. 9)。

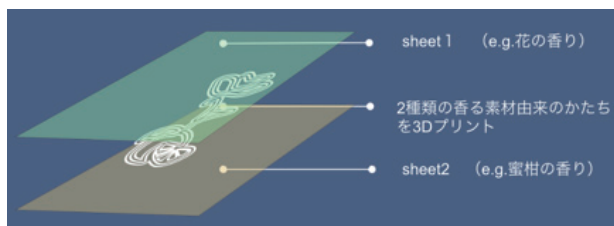


Fig. 6. Description of the Structure and Visualization of the Final Product



Fig. 9. Printing to completion - appearance of the mouette sample

4.生分解性の検証

同じ割合と素材で作製した DIY バイオプラスチック素材を型成形サンプル (以下、サンプル a とする) と 3D プリントサンプル (以下、サンプル b とする) を用いて、分解の様子を比較した。両サンプルを土壌に埋設し、2025 年 8 月 15 日から 31 日までの約 2 週間にわたり分解過程を観察した。それぞれ同じ重量 (13.3g) になるように切り出し (Fig. 10)、土を充填した容器内に入れて、CT スキャナを用いて 12 時間ごとに撮影を行った。



Fig. 10. Samples adjusted to the same weight (left-sample a; right-sample b)

CT スキャンの結果、8 月 15 日時点では両サンプルともに土壌中に埋設されて、内側まで灰色になっていることから、中身が詰まっていることがわかった (Fig. 11 Top)。識別のため、図中では緑色の線で示した。8 月 26 日時点では両サンプルの内部に広範な黒色の領域が出現したことから分解が進行していることを確認した。サンプル a では中央部から黒色領域が拡大しつつも灰色の外縁が明瞭に残存していたのに対し、サンプル b では灰色領域が大幅に減少し、外縁も不明瞭で、黒色領域が全体に占める割合が a より b の方が大きいことが確認された (Fig. 11 Middle)。8 月 30 日にはサンプル a の外縁が崩壊を始め、サンプル b はわずかな断片を残すのみとなり、緑線で示した範囲の黒色領域には明確な境界が認められなかった (Fig. 11 Bottom)。

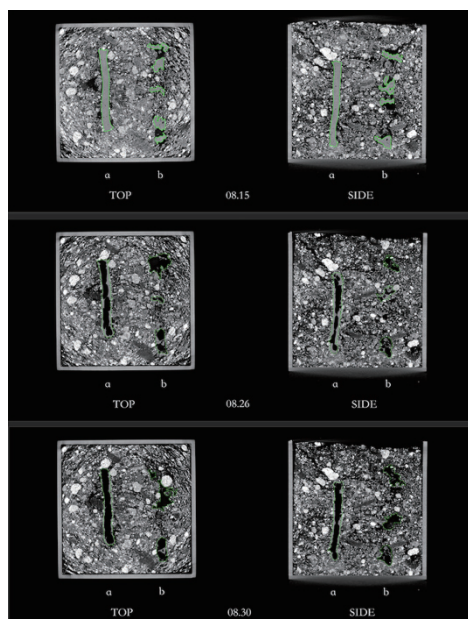


Fig. 11. CT scan results (from top: 08.15 – 08.26 – 08.30)

9月4日に土壌の一部を掘り出した際には、両サンプルとも回収不能であり、肉眼で確認できる断片も存在しなかった。これにより、両サンプルは8月15日から9月4日までの約3週間の間に完全に分解したと推察される (Fig.12)。重量を揃えてもサイズを完全に統一させることはできなかったが、CTスキャン像の比較から、土壌との接触面が多い空隙構造において分解効率が高い可能性が示唆される。



Fig. 12. Comparison between installation and post-retrieval conditions

5.まとめと展望

本研究では、材料の配合比を調整することを通して、押出式3Dプリンタを用いた、DIY バイオプラスチックの基本的な成形プロセスを確立した。さらに、試作された空隙構造のサンプルは、乾燥の均一性を向上させる可能性を示し、分解性においても一定の改善効果が見られた。

今後の展望として、まず香りの持続性や強度を検討し、展示空間における使用者の体験に組み込む。これにより、単なる製品にとどまらず、インタラクティブな体験を創出することを目指す。

今回は一部市販の精油を配合しており、できた3Dプリント物はその「香り」を保っていたことを確認した。今後の製作では全て藤沢市から回収した材料から作る精油を使っていきたい。また、茶屋から収

集する茶殻など地域に根ざした素材をさらに掘り下げることによって、藤沢市ならではの香りのバリエーションを探求し、素材段階・製品段階・分解段階を一連の流れとして設計していく。

謝辞

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

参考文献

1. 阿部辰海, 坂田拓人, 牧田陽奈子, 安宅絢音, 滑川由記, 松岡康友, 田中浩也. DIY バイオプラスチックの割合検討と3Dプリント葉脈への応用可能性. Conference on 4D and Functional Fabrication, 2022.
2. Ana Isabel Escobar Ostolaza(2024/11/21) 「STEM KitWorkshop」 . <https://www.fau.edu/engineering/community-outreach/stem-kit-workshop/> ,(参照 2025/09/07)
3. NEWJI Inc. (2025)「生分解性プラスチックの最新動向と市場導入の課題」.<https://newji.ai/supplier/manufacturing-industry/recent-trends-and-challenges-in-the-market-introduction-of-biodegradable-plastics/> ,(参照 2025/09/07)
4. Martucci, J. F., & Ruseckaite, R. A. . (2009) 「Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions. Polymer Degradation and Stability, ,94(8), 1307-1313.
5. Mediated Matter Group, MIT Media Lab. (2021-2023)「Aguahojá III」 .[Project overview].<https://www.media.mit.edu/projects/aguahoja-iii/overview/> ,(参照 2025/09/07)
6. Cueva, O. (2023). 「Casting larger sheets of gelatin bioplastic [Student experiment]. Fabricademy. <https://class.textile-academy.org/2023/olivia-cueva/project%20Development/04-experiments/> ,(参照 2025/09/07)
7. R. RussoM. MalinconicoG. Santagata (2007) 「Effect of Cross-Linking with Calcium Ions on the Physical Properties of Alginate Films」. 『Biomacromolecules』 2007, 8, 10, 3193-3197

素材の時間変化への関心を引き出す、 塩を用いた朽ちやすいコンクリートの提案

Proposal for Perishable Concrete Using Salt to Evoke Awareness of Material Temporal Change.

平下 ひなた, 平野 央, 田中 浩也

Hinata HIRASHITA, Oh HIRANO, Hiroya TANAKA

慶應義塾大学

Keio University

【要約】

本研究では、都市の公共インフラの老朽化が進む現代において、その素材への関心を高めることを目的とした新素材を提案する。この素材は、老朽化の一因である塩害に着目し、塩分をコンクリートに混入することで、その割合に応じて脆化を制御可能とした朽ちやすい加工を施したコンクリートである。本素材を用いたプロダクトの経過観察では、短期間での形状変化に加え、白華現象による表面の白色化など、時間経過に伴う視覚的变化が確認された。本稿では、この塩を利用したコンクリートの劣化過程を通じて、都市における素材そのものへの関心を喚起する手法を提案する。

キーワード: コンクリート, 塩, 朽ちやすさ, 素材への関心喚起, 時間変化

【Abstract】

This study introduces “decay-prone concrete,” a salt-infused material designed to encourage awareness of the materiality of urban infrastructure. By incorporating salt into the concrete mix, its fragility was intentionally increased, enabling controlled short-term transformations. These include structural changes and visual effects such as surface whitening caused by efflorescence. Through this process of accelerated decay, the research examines how material degradation can serve as a design strategy to reveal the temporal nature of urban infrastructure and stimulate new perspectives on its lifecycle.

Keywords: concrete, salt, material fragility, awareness of materials, temporal change

1. 序論

近年、公共インフラの老朽化が社会的課題として顕在化している[1]。都市を支える公共インフラの設計では、安全性や強靭さが特に重視され、変形や劣化に対して否定的な価値観のもと、耐久性の高い素材が用いられてきた。しかし、その素材の強靭さゆえに時間的な変化が少なく、都市生活者が公共インフラに用いられる素材そのものに関心を持つ機会はほとんどなく、結果としてその変化に無関心になりやすい[2]。このことは、公共インフラの劣化の兆候を見逃すことにつながりかねない。したがって、素材の時間変化に目を向けることは、都市の安全性や持続可能性を確保するうえでも必須である。今後、公共インフラの老朽化が現れていく状況と付き合いしていくには、いかに都市生活者の関心を、素材の時間変化に向けるかが重要である。

一方、芸術の領域においては素材の時間的な変化を積極的に取り込む実践が数多く見られる。風化をはじめとした自然現象を作品や空間の一部として扱うことで、人々に環境や素材そのものに対する新たな視点を提示してきた。こうした取り組みは、公共インフラの老朽化という文脈においても、人々の関心を時間経過による素材の変化に寄せる手がかりとなり得る。

本稿では、都市の公共インフラに広く用いられる素

材として代表的なコンクリートに着目し、素材への関心を高めることを目的とした新素材を提案する。コンクリートの老朽化の一因である塩害を参考に、塩分をあえて混入することでその割合に応じて脆化を制御可能とする、朽ちやすい加工を施したコンクリートを開発した。本論では、そのコンクリートの制作過程及び、展示を通じた都市生活者の素材への関心を喚起する手法について報告する。

2. 先行事例

2.1. 都市におけるコンクリートの経年変化の観察

都市におけるコンクリートの自然な劣化の様子を把握するため、フィールドワークを実施した。塩害による劣化が顕著に見られる海沿いの地域として、神奈川県の日置駅から東日置駅にかけてのエリアを選定した。

観察の結果、潮風の影響によって緑石ブロックが錆び、内部の鉄筋が露出している様子や、線路沿いの柵が劣化し一部が木製のものに置き換えられている状況が確認された。また、ごみ収集所のトタンが錆によって大きく変色しているなど、時間経過とともに素材が朽ちていく事例を数多く発見することができた(Fig.1)。これらの観察では、露出した鉄筋や素材の置き換え、錆による変色といった状況が、素材の時間的な変化を強く示して

いた。さらに、こうした劣化は線路や歩道、ごみ収集所といった生活に身近な場所で確認され、都市空間の至る所に素材の変化が存在していることが明らかになった。



Fig.1 Deterioration of Concrete in Urban Areas

2.2. 芸術領域における実践

自然現象による物資の経年変化は、公共インフラの設計において忌避される反面、芸術領域において積極的に取り入れられてきた。とりわけランドアートおよびプロセスアートの実践では、作品とその周辺環境との密接な相互作用を表現するために、素材の変形や変色といった時間的変化が用いられてきた。本章では以上 2 つの芸術領域における実践を取り上げ、素材への着目を喚起する具体的な事例について紹介する。

(1) ランドアート

ランドアートは、自然環境そのものを素材として扱い、その変化や作用を作品に組み込んでいる。ロバート・スミソンによる『スパイラル・ジェッティ』[3]では、風や水位の変動、塩の結晶化といった自然現象によって作品が絶えず姿を変え続ける(Fig.2)。こうした変化を、作品を通して可視化することで、鑑賞者は環境との新たな関わりを体感することができる。



Fig.2 Robert Smithson 『Spiral Jetty』 [4]

(2) プロセスアート

プロセスアートは、素材そのものが時間とともに変化する過程を作品に取り込み、鑑賞者の体験を通してその意味を生成している。リチャード・セラの『インサイド・アウト』[5]では、時間の経過によって錆をまとうていく鋼材の質感が、作品の重要な要素となる(Fig.3)。鑑賞者は巨大な鋼板の間を歩くことで、光や音、質感の変化を身体的に経験し、素材そのものの存在を新たに認識する。

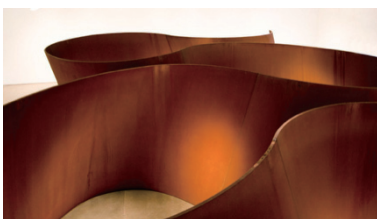


Fig.3 Richard Serra 『Inside Out』 [6]

以上のように、ランドアートやプロセスアートの実践においては、自然現象や素材の時間的変化を作品の本質的要素として取り込み、鑑賞者の感覚や認識を揺さぶる試みが行われてきた。これらの知見は、都市の公共インフラにおいて素材の時間変化への都市生活者の無関心を打破する方法として参考になる事例である。

3. 実験

3.1. 朽ちやすい加工を施したコンクリートの開発

コンクリートの老朽化における主要因として塩害が挙げられることに注目し[7]、塩分を意図的に混入することでコンクリートの劣化速度を制御できるという仮説を立てた。また、その過程を観察することで、素材の経時的変化に着目できると考えた。これらの仮説を検証するため、実験を実施した。

コンクリートの劣化速度が塩分混入量に依存するかを検証するため、セメントと水に対する食塩の混合比率を 6 段階(①80.0%,②75.0%,③60.0%,④25.0%,⑤10.0%,⑥ 0.0%)とし、6 つの試験片を制作した(Fig.4) (Table.2)。なお、いずれの試験片も制作時の重量はすべて 360 g である。

	混合比率 (g)		食塩比率 (%)
	食塩	水 : セメント	
①	240	60 : 60	80.00
②	225	60 : 75	75.00
③	180	60 : 120	60.00
④	75	60 : 225	25.00
⑤	30	60 : 270	10.00
⑥	0	60 : 300	0.00

Table.1 Mix ratio of salt to cement and water



Fig.4 6 samples placed outdoors for 3 weeks

ブロックの形状は、経時的な劣化の様子を観察しやすくするため、角を多く持つ正五角形および菱形を組み合わせた多面体とした。型枠は 3D プリンタを用いて制作し、そこにコンクリートを流し込んだ後、屋外の日陰で 3 日間乾燥させた(Fig.5)。その後、型枠を取り外し、計 6 つの試験片を屋外に 3 週間設置した。劣化の進行を評価するにあたり、各試験片の重量変化率を定量的指標とし、併せて表面の外観変化を観察・記録した。



Fig.5 Formwork made with a 3D printer

3週間屋外に設置後、各試験片の重量を測定し、初期重量に対する重量減少率を算出した(Table.2). 結果、全ての試験片において重量の減少が観察され、減少率は初期の塩混合比率が高い試験片ほど顕著であった. 塩分を含まない試験片⑥の重量減少率は 17.64%であったのに対し、最も塩分混入量が高い試験片①では 61.78%に達した. さらに、初期重量に対する塩混合比率と重量減少率との間に正の相関が認められた. また、塩コンクリートブロックの表面が、白華現象[8]により最も白色に覆われていたのは試験片①であった(Fig.6) .

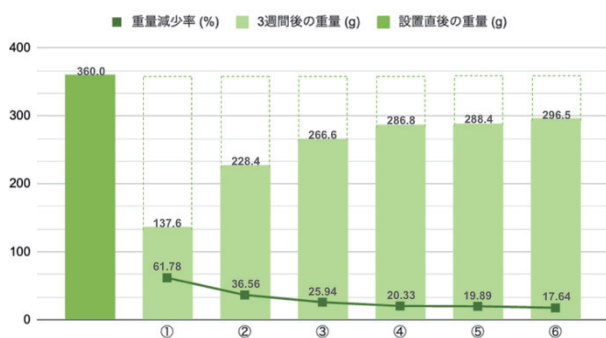


Table.2 Weight after 3 weeks (g) and weight loss ratio (%)



Fig.6 Sample① with pronounced efflorescence

この結果から、塩を多く混入したコンクリートほど、時間経過による物理的劣化が顕著であるといえる. 見た目の崩れや白華現象による表面の白色化が著しく、重量変化も大きいことから、塩分の量がコンクリートの劣化速度に直接的な影響を与えることがわかる.

3.2. 展示

本研究では、開発した新素材が都市生活者に対して素材への関心を喚起し得るかを検証するため、朽ちやすい加工を施したコンクリートを用いた模型の展示を行った.

展示は、塩害の影響を受けやすい海沿いの地域である神奈川県鎌倉市にて実施し、都市の風景の模型と試験片を設置した(Fig.7) .



Fig.7 Exhibited model

訪れた参加者は、展示された朽ちやすいコンクリートを手に取り、重さやその手触り、表面の白華現象による塩の塊を観察するなど、素材そのものに関わっていた(Fig.8) . 中には、崩れやすさを確かめるためにブロックを転がしたり、舐めてみたりする行動も見られ、能動的に素材の性質を知ろうとする姿が確認された. さらに、参加者との会話では「これからまちを歩くとき、まちの隅々を見てしまいそうです.」「まちの朽ちているものを探すようになるかもしれません.」といった発言があり、展示での体験を通して都市空間や素材への新たな視点が生まれていた. また、展示後に行われたフィールドワークでは、参加者が自発的に朽ちたものを探して写真を撮影したり、まちの朽ちているものに注意を向けたりする様子が観察され、まちに存在する素材への関心を引き出すことや行動の変化につながる事が確認された.



Fig.8 Viewers interacting with the display

この展示を通して、朽ちやすい加工を施したコンクリートの時間的変化は、都市空間において素材に対する新たな認識や関心を喚起する手法のひとつとして有効であることが示された.

4. 結論

本稿では、都市の公共インフラに用いられる素材の時間的変化への関心喚起を目的として、食塩の混入によって朽ちやすい加工を施されたコンクリートの開発を行った. 実験の結果、食塩の混入比率が高いほど、3週間経過後の減少量が高まることが確認され、食塩混入によってコンクリートの脆化を制御できることが実証された. 加えて、コンクリートの表面には白華現象による変色や結晶化が観察されたことで、重量変化に併せて視覚的な変化も同時に発現することが明らかとなった.

また、展示期間中に近隣住民である都市生活者が

開発した素材に触れる過程で、その朽ちやすさを確認しようと、転がす、舐める等の行動が誘発されていたことが観察できた。一部の参加者からは、都市環境における劣化現象への関心の向上を示す発言も得られた。これらの現象は前述の芸術領域における先行事例とも深く関連していることから、変形や変色そのものに意味や機能を与え、素材への関心を喚起することが可能であることを示している。

今後の展望として、現行の公共インフラが素材の時間的変化に対する都市生活者の無関心を引き起こしている現状を改善するため、開発素材が公共インフラに部分的に実装されることが期待できる。しかし、芸術領域での手法を直接的に応用することは、安全性等さまざまな制約が存在することから困難である。この課題を克服するためには、素材特性や機能性のみに焦点を当てた議論だけではなく、社会的な条件を包括した視点からの検討が必要である。そうすることで、本開発素材の潜在的な価値やより効果的な使用方法について検討することが可能になると考えられる。

謝辞

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

参考文献

1. 土木学会. (2021, 6 月 8 日). インフラメンテナンスに関する土木学会声. 2021. 今、そして未来に欠かせないインフラメンテナンス、直面する困難を乗り越えるための処方箋.
2. 株式会社日本経済研究所 社会インフラ本部. (2014, 2 月). 公共施設に関する住民意識調査. 日本政策投資銀行.
3. Robert Smithson. "The Spiral Jetty." Arts of the Environment. edited by Gyorgy Kepes. 1972
4. Steinhauer, J. (2014, April 1). Mr. Big Stuff: Richard Serra Piles It On. Hyperallergic. (アクセス: 2025 年 9 月 7 日).
<https://hyperallergic.com/92340/mr-big-stuff-richard-serra-piles-it-on/>
5. Urth Magazine. (2021, December 23). Robert Smithson and the Sublime Landscape of the 'Spiral Jetty'. Urth. (アクセス: 2025 年 9 月 7 日).
<https://magazine.urth.co/articles/robert-smithson-spiral-jetty>
6. Whipple Russell Architects. The Gravity of Art: Richard Serra's Modern Vision in Steel. (アクセス: 2025 年 9 月 7 日).
<https://whiplerussell.com/blog/the-gravity-of-art-richard-serras-modern-vision-in-steel>
7. 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会. 浸透拡散型亜硝酸リチウム『プロコン 40』を用いた

塩害・中性化・ASR 補修技術 - リハビリ断面修復工法. 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会. (アクセス: 2025 年 9 月 7 日).

<https://www.j-cma.jp/?cn=102632>

8. MAPEI. (2018, August 7). Technical Bulletin: The Causes and Cures of Efflorescence. MAPEI Headquarters of North America. Retrieved from. www.mapei.com

水中での構造物や機構の挙動を 部品ごとの密度設計により制御する手法

A Density-Based Control Method for Underwater Behavior of Structures and Mechanisms Using
Component-Wise Design

加藤 遼真, 高橋 一成, 橋田 朋子

Ryoma KATO, Issey TAKAHASHI, Tomoko HASHIDA

早稲田大学大学院

Waseda University

【要約】

4D プリンティングの分野では、素材固有の特性を利用して自律的な変形を実現する研究が進められているが、素材が限定される点や変形の自由度に課題がある。本研究では、3D プリンタによる充填率操作で物理特性である密度を調整することで、水中での浮力と重力の合力による鉛直方向の動きを制御し、自律的かつ多様な変形の実現を目指す。異なる密度を持つ複数の部品で一つの装置を構成することで、水中における鉛直方向の力をそのまま活用する変形を実現し、さらに同一の素材・形状の装置の変形を多様にするために各部品の鉛直方向の動きを反転させることや水中への沈める向きを反転することで変形に制御を加える。また、機構を設計し、部品に組み込むことで鉛直方向の動きを間接的に利用し、他方向に変換した変形を実現する。

キーワード: 水中, 浮力, 変形, 充填率, 沈む

【Abstract】

In 4D printing, autonomous deformation is often achieved by utilizing material-specific properties, but these approaches face limitations in material selection and deformation diversity. This study controls vertical motion underwater, driven by buoyancy and gravity, by adjusting part densities through 3D printer infill density. A device is composed of components with different densities, enabling deformation by directly utilizing vertical forces underwater. Furthermore, by reversing component vertical motion or device submersion direction, deformation can be selectively controlled. Additionally, embedded mechanisms indirectly convert vertical motion into other directional deformations.

Keywords: underwater, buoyancy, deformation, infill density, submersion

1. はじめに

地球上の広大な面積を占める水環境の理解と活用は、私たちにとって極めて重要である。4D プリンティングの分野において、特定の外部刺激に反応する素材を活用する研究の中でも、水を外部刺激として用いる事例が多くなっている[1][2]。最近では、さらに水環境での利用を想定した事例も増えており、例えばハイドロゲルと硬質素材を組み合わせ用い、水による変形によって水上を進むことに適した車輪の形状に変形させる事例[3]がある。しかし、これらのような素材固有の特性を利用する手法は、素材が限定されることに加え、素材の変形を直接構造の変形に利用するため、変形の種類が限定されやすい。

筆者らは、水中において自律的かつ多様な変形を実現することを目指している。そのために物理特性である密度を利用することを考え、特に 3D プリンタにおいて造形物の充填率操作が、物理特性である密度の操作と捉えることができることと、造形物の密度を変えることで水中における鉛直方向の動きを制御できることに着目する。密度を調整した複数の部品で一つの装置を構成することで各部品に水中における鉛直方向の動きが生

じ、装置全体の自律的な変形が可能となる。

本研究では、まず各部品の鉛直方向の動きを直接利用した自律的に変形する装置を実現する。この装置では特に同一の素材・形状であるが水中で異なる変形をするものを目指す。次に、各部品に生じる鉛直方向の動きを間接的に利用して変形する装置を実現する。これは動きの方向を変換する機能を持たせた部品を装置に加えることで可能となる。以上より本研究は、水中において、各部品に働く浮力と重力の合力を動力とすることで、電氣的エネルギーを用いることなく装置の変形を実現する点も特徴とする。

2. 関連研究

水中での自律的な変形を、物理特性の活用や構造設計によって実現する先駆的な事例として、地上では自立しないが、水中で重力と浮力の釣り合いによって形状を安定して保つ構造物[4]や、拘束する部品が劣化して破断すると、蓄えられた弾性エネルギーが解放されて変形する構造物[5]などが挙げられる。これらはいずれも変形することが目的で水中における様々な変形を追求するものではない。

水中での物体の動きを、本研究と同様に 3D プリンタの充填率操作による造形物の密度調整によって制御する研究として、児玉ら[6]は、水中での単体の造形物の姿勢制御や、水溶性フィラメントを用いた造形物が沈んだ後に浮く動きを実現している。本研究では、造形物単体の水中での姿勢や鉛直方向の動きではなく、浮く部品と沈む部品を組み合わせることで装置全体の多様な変形を実現する点異なる。

3. 提案手法

提案手法は、密度を調整した複数の部品から構成される装置で、水中に沈めた際に自律的かつ多様な変形を実現するものである。浮力は、押しのけた流体の重さに等しい力が重力の逆向きに作用するため、造形物と流体の密度の大小関係によって鉛直方向の動きが生じる。本研究では、流体に水を用いるため、水の密度 (1.0 g/cm^3) よりも密度が大きいと沈み、小さいと浮く。3D プリンタの充填率操作で密度の調整を行うことができることに着目すると、Fig.1(a)のように同一の素材・形状の造形物で、Fig.1(b)のように水中に沈めた際に異なる鉛直方向の動きを生じさせることが可能となる。この基本原理を利用した複数の部品で装置を構成することで、水中に沈めた際の各部品の鉛直方向の動きの違いによって、装置を変形させることができると考えた。本研究では、水中での自律的かつ多様な変形の実現を目指し、「直接変形型」と「変換変形型」の二種類の装置を提案する。

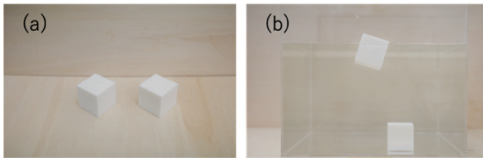


Fig. 1. Object appearance on land (a) and underwater (b)

直接変形型は、水中における各部品の浮力と重力の合力による鉛直方向の動きをそのまま利用し、装置全体の自律的かつ鉛直方向への変形を実現する。この直接変形型においては特に、同一の素材・形状の装置による異なる変形を目指す。構造としては内側の部品とその側面を囲む外側の部品で装置を構成し、各部品に逆向きの鉛直方向の動きが生じるように充填率を調整することで、変形が生じる位置や変形する方向を制御できる装置を設計する。また、内側の部品と、その側面の上半分および下半分をそれぞれ囲む二つの部品で装置を構成し、上下の部品に逆向きの鉛直方向の動きが生じるよう充填率を調整することで、水中に沈める向きによって変形の有無が変化する装置を設計する。

次に、変換変形型では、部品に動きの方向を変換する機構の機能を持たせることで、装置全体の自律的かつ鉛直方向の動きを他方向に変換した変形を実現する。この変換変形型においては、鉛直方向以外の方向の変形を目指し、リンク機構やカム機構を部品に用いることで鉛直方向の動きを変換する。

4. 実装

水中で鉛直方向に自律的な変形をする直接変形型と、鉛直方向の動きを他方向へと変換して自律的な変形をする変換変形型を実装する。いずれも Autodesk Fusion を使用してモデルを設計し、Creality Print にて充填率操作を行なった上で、3D プリンタ (K1 Max, Creality 社) で製作する。フィラメントは PLA を用いる。

今回の実装ではわかりやすさのために浮くように密度を調整した部品を白色の PLA、沈むように調整した部品を黒色の PLA で製作する。密度を調整する充填率は装置ごとに適切な数値が異なるため、装置ごとに設定する。また、装置の外形は変形の違いを分かりやすくするために、全て直径 60 mm、高さ 80mm の円柱形状で造形する。用意した水環境として 200 mm × 200 mm × 200 mm のアクリル製の水槽を使用し、水面付近で手を離すことで装置を沈める。

4.1. 直接変形型

直接変形型の装置は水中で異なる鉛直方向の動きが生じる複数の部品で構成され、各部品の動きを直接利用することで、水中に沈めた際に鉛直方向に自律的に変形する。特に、同一素材・形状で変形が生じる位置や変形する方向が異なる装置と、同一の装置で変形の有無を選択できる装置を設ける。前者を直接変形一体型、後者を直接変形分離型と呼ぶ。

はじめに、直接変形一体型は外側部品と中央部品で構成される。Fig.2(a)に上面図および断面図、Fig.2(b)に地上での外観を示す。外側部品は中央部品の側面を囲む構造を持ち、中央部品は鉛直方向に可動する。外側部品から抜けられないように中央部品に返しを設計する。このような基本設計のもと、同一の素材・形状の装置を二つ製作し、充填率操作によって、一つを外側部品が沈み、中央部品が浮くように調整し、もう一つを外側部品が浮き、中央部品が沈むように調整する。なお、充填率は沈む部品を 100%、浮く部品を 80% に設定する。

これら二つの装置を製作し、水中に沈めると、前者は水底から鉛直上向きへの変形 (Fig.3 左)、後者は水面から鉛直下向きへの変形が生じた (Fig.3 右)。これにより、同一の素材・形状で変形が生じる位置や変形する方向が異なることを確認した。



Fig.2. Direct deformation integrated configuration (a) and appearance (b)



Fig. 3. Direct deformation integrated underwater

次に、直接変形分離型は軸と二つの外周部品で構成される。Fig.4(a)に上面図および断面図、Fig.4(b)に地上での外観を示す。二つの外周部品は軸の側面の上半分及び下半分を囲む構造を持ち、鉛直方向に可動する。この際、互いの外周部品がすり抜け、上下の位置関係が入れ替わることを防ぐため、軸を中心に上側の外周部品の底面と下側の外周部品の上面が重なり合う領域を持つように設計する。加えて二つの外周部品を同一形状で設計することで、装置の天地を反転しても同一の外観を保つようにもする。充填率は、一方の外周部品を沈むように、もう一方を浮くように調整し、沈む部品を100%、浮く部品を80%、軸を100%に設定する。

この装置を製作し、浮く外周部品が沈む外周部品の上にある状態で水中に沈めると、二つの外周部品は互いに接触することなく、水面付近と水底でそれぞれ安定し、自律的な鉛直方向の変形が生じた(Fig.5 左)。一方で装置の天地を反転して水中に沈めると、沈む外周部品が浮く外周部品にのしかかるように動くため、二つの外周部品は水底で安定し、変形が生じず(Fig.5 右)、同一の装置で変形の有無を選択できることを確認した。

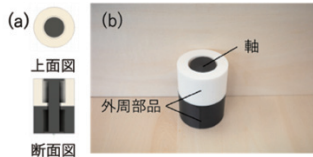


Fig.4. Direct deformation separated configuration (a) and appearance (b)



Fig.5. Direct deformation separated underwater

4.2. 変換変形型

変換変形型の装置は水中で異なる鉛直方向の動きが生じる複数の部品で構成される。一部に動きの方向を変換する機構の機能を持たせ、鉛直方向の動きを間接的に利用することで、水中に沈めた際に、鉛直方向の動きが他方向に変換され、自律的に変形する。特に、鉛直方向の動きが横方向へ展開する動きに変換され、変形する装置と、鉛直方向の動きが鉛直方向を軸とした回転に変換され、変形する装置を設ける。前者を変換変形展開型、後者を変換変形回転型と呼ぶ。

はじめに、変換変形展開型は、可動部品、外殻部品、リンク、ねじで構成される。Fig.6(a)に可動部品の上面図・正面図、Fig.6(b)に外殻部品の上面図・断面図、Fig.6(c)に変換変形展開型の地上での外観を示す。この装置は外殻部品に可動部品と、長いリンク二本と短いリンク二本からなる二組のリンク機構が取り付けられており、可動部品が鉛直方向に動くと、リンクが横方向に展開する(Fig.7)。本装置では、充填率操作によって外殻部品を沈むように、可動部品を浮くように調整し、装

置を製作する。なお、充填率は沈む部品を100%、浮く部品を15%、リンクとねじを15%で設定する。

この装置を製作し、水中に沈めると、可動部品の鉛直上向きの動きで横方向に展開する動きが生じ(Fig.8)、リンク機構を介することで鉛直方向の動きが横方向に変換され、装置が変形する様子を確認した。

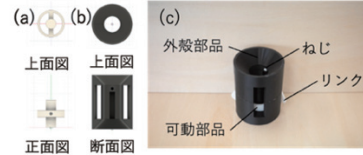


Fig.6. Conversion deformation expansion configuration (a)(b) and appearance (c)



Fig.7. Conversion deformation deployable mechanism



Fig.8. Conversion deformation expansion underwater

次に、変換変形回転型は、中央部品、外側部品で構成される。Fig.9(a)に中央部品の上面図・正面図、Fig.9(b)に外側部品の上面図・断面図、Fig.9(c)に変換変形回転型の地上での外観を示す。中央部品の外壁には一回転分の螺旋状の溝を、外側部品の内壁にはそれに対応する突起を設け、両者の噛み合いによってカム機構を構成する。この機構により、中央部品が突起に沿って動くため、鉛直方向の動きが鉛直方向を軸とした回転する動きに変換される。本装置では、充填率操作によって外側部品を沈むように、中央部品を浮くように調整し、装置を製作する。なお、充填率は沈む部品を100%、浮く部品を40%で設定する。

装置を水中に沈めると、中央部品の鉛直方向の動きで、鉛直方向を軸として一回転する動きが生じ(Fig.10)、カム機構を介することで鉛直方向の動きが回転に変換され、装置が変形する様子を確認した。

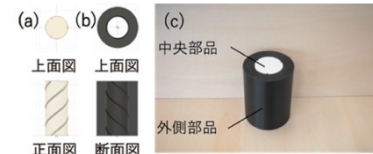


Fig.9. Conversion deformation rotation configuration (a)(b) and appearance (c)

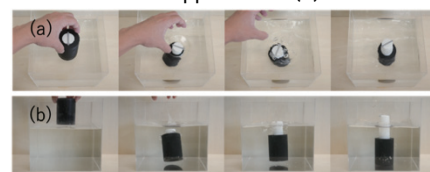


Fig.10. Conversion deformation rotation underwater: top views (a), side views (b)

5. アプリケーション

本章では、4章で実装した基本構造を組み合わせた装置と基本構造を応用した装置を紹介する。なお、本章で扱う装置は、外見からは変形動作が予測できないようにするため、実装時に用いた浮き沈みに応じたフィラメントの色分けは行っていない。

一つ目は、一つの装置で複合的な変形を実現することを目指し、直接変形分離型と変換変形回転型を組み合わせた装置を実装した。直接変形分離型の軸と二つの外周部品にカム機構を設計し、装置に加える。浮く外周部品が沈む外周部品の上にある状態で水中に沈めた際に、Fig.11(a)に装置を上から見た変形の様子を、Fig.11(b)に横から見た変形の様子を示す。装置の天地を反転して水中に沈めた際に、Fig.11(c)に装置を上から見た様子を、Fig.11(d)に横から見た様子を示す。これにより、装置の天地を反転させて水中に沈めることで変形の有無の選択と、鉛直方向を軸とする回転の動きの有無の選択が可能となった。



Fig.11. Underwater deformation of combined device: top-floating (a)(b), bottom-floating (c)(d)

二つ目は、複数の装置を用いることで形成される空間そのものの変形を実現するために、機構の応用と装置の連結を実装した。まず、変換変形展開型のリンク機構を応用し、リンクが横方向に伸長する装置を実装した。Fig.12(a)に地上での外観と、Fig.12(b)に水中での変形の様子を示す。また、この装置のリンクが伸びる方向を内角 60° に調整することで三つの装置が連結可能となり、リンクによって三角形を構成する装置群を実装した。この装置群を水中に沈めると、三角形の各辺が同時に伸長し、囲まれた空間全体が拡張される様子が確認された。Fig.13(a)に地上での外観と、Fig.13(b)に上から見た変形の様子、Fig.13(c)に横から見た変形の様子を示す。このように、機構を応用し、複数の装置を連結することで、一つの装置の変形だけでなく、装置群が囲む空間の拡張を実現した。

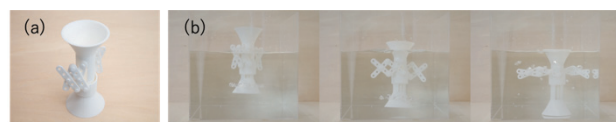


Fig.12. Extension type appearance on land (a) and underwater (b)

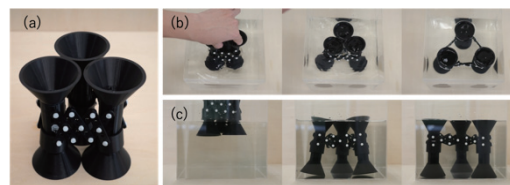


Fig.13. Extension type group appearance on land (a) and underwater: top views (b), side views (c)

6. まとめ

本研究では、密度の異なる複数の部品で装置を構成することで、水中での多様な変形を実現する手法を提案した。3Dプリンタによる造形物の充填率操作によって密度を調整し、水中での鉛直方向の動きをそのまま利用した直接変形型と、鉛直方向の動きを他方向に変換して変形する変換変形型の二種類を提案した。また、直接変形型においては同一の素材・形状の装置による多様な変形を実現するために、各部品の鉛直方向の動きを反転させたり、装置の天地を反転させたりすることで変形に制御を加える手法を提案した。最後に実装した装置を用いたアプリケーション例も紹介した。

本研究の手法は、同一の形状・素材という特徴を保持しながら、水中での動き方を設計要素として付与できるため、今後は部品ごとに着脱や再利用を可能にする設計へと発展させることで、部品の組み替えによって動作を選択できる装置へ展開できると考えられる。また、本研究で着目した鉛直方向の動きを基点としつつ、適切な機構設計を組み合わせることで、より多様な変形や機能を実現する装置へと発展させることにも取り組む。

参考文献

1. K. Narumi et al, "Inkjet 4D Print: Self-folding Tessellated Origami Objects by Inkjet UV Printing", ACM Transactions on Graphics, No.117, pp.1-13, 2023
2. D. Correa et al, "3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations", 3D Printing and Additive Manufacturing, Vol.2, No. 3, pp.106-116, 2015
3. Z. Liu et al, "SFEM-4DP: A strain-based finite element model for 4D printing", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.302, 2025
4. H. Misawa, "waterscape", 三澤デザイン研究室 - MISAWA DESIGN INSTITUTE, <https://misawa.ndc.co.jp/works/99/>, (参照: 2025-08-14)
5. Q. Lu et al, "Degrade to Function: Towards Eco-friendly Morphing Devices that Function Through Programmed Sequential Degradation", UIST '24, No.109, pp.1-24, 2024
6. T. Kodama et al, "水中での PVA の溶解を利用した分離と密度設計により物体の浮き沈みや特定的水中姿勢を実現する手法", インタラクシオン 2025 論文集, pp.1020-1024, 2025

The MEWron: Open-source Melt Electrowriting

Simon Luposchainsky¹, Paul D. Dalton², Huaizhong Xu¹

¹Kyoto Institute of Technology, ²University of Oregon

【Abstract】

This research develops new hardware for specialized 3D printing of microfibers via electrohydrodynamic jetting. This approach significantly lowers the barriers of entry into this field of research and empowers scientists to adapt or modify their hardware to their specific research needs free of financial or other third-party limitations. In this approach, existing 3D printer designs from the open-source Voron project are modified to facilitate MEW printing. By using existing hardware designs as a starting point, we simplify part sourcing and can tap into the vast existing knowledge base of the open-source 3D printing community and also train the next generation of users of this technology in all fundamental concepts of fused filament fabrication and leading them to MEW, from hardware to software to process. Thus, this project will accelerate and proliferate MEW technological developments and contribute to overall improved study outcomes involving it.

Keywords: MEW, open-source, fiber, hardware

1. Introduction

Originating in tissue engineering research, melt electrowriting (MEW) is an additive manufacturing technique that forms macroscopic structures from microfibers via electrohydrodynamic jetting of solvent-free thermoplastic melts. Due to its roots outside of traditional engineering disciplines, many research groups depend on highly specialized and expensive commercial systems to perform experiments with MEW. This limits proliferation and advancement of MEW technology even though the underlying physical principles are simple to harness and suitable for open-source hardware adoption as exemplified by the fused filament fabrication (FFF) 3D printing ecosystem.

2. Concept

Our work adapts existing open-source hardware from the Voron FFF ecosystem into capable, low-cost MEW printers while retaining the open access ideas they were built on. We demonstrate the power of this approach by building a fully functioning “MEWron” printer for below 200,000 JPY capable of processing thermoplastic filaments at up to 300°C melt temperature. We produced fiber diameters of 7 μm from medical-grade ε-Polycaprolactone (PCL) as part of this proof-of-concept study. We also introduced MEWron variants to solve material-specific challenges and used them to process quickly degrading biopolymers on flat and tubular heated substrates.

Building on this established platform, our work now improves key areas of the MEWron by offering alternatives to improve supply chain constraints, ease of assembly and use, or enhanced functionality of the

electronic hard-and software, printhead and high voltage contacting components such as the collector. We will be presenting samples printed using MEW technology in our research group, as well as a fully operational MEWron printer adapted for live demonstrations of this bleeding edge manufacturing process.

3. Conclusion

The Voron open-source hardware ecosystem is a readily accessible, modifiable, and powerful system to facilitate the development of emerging manufacturing approaches. We anticipate increasing adoption of this low-cost approach for MEW in the coming years and are striving to expand the available configurations of printers for different use cases.

References

1. A Reizabal, T Kangur, PG Saiz, S Menke, C Moser, J Brugger, PD Dalton, S Luposchainsky, Additive Manufacturing 71, 103604

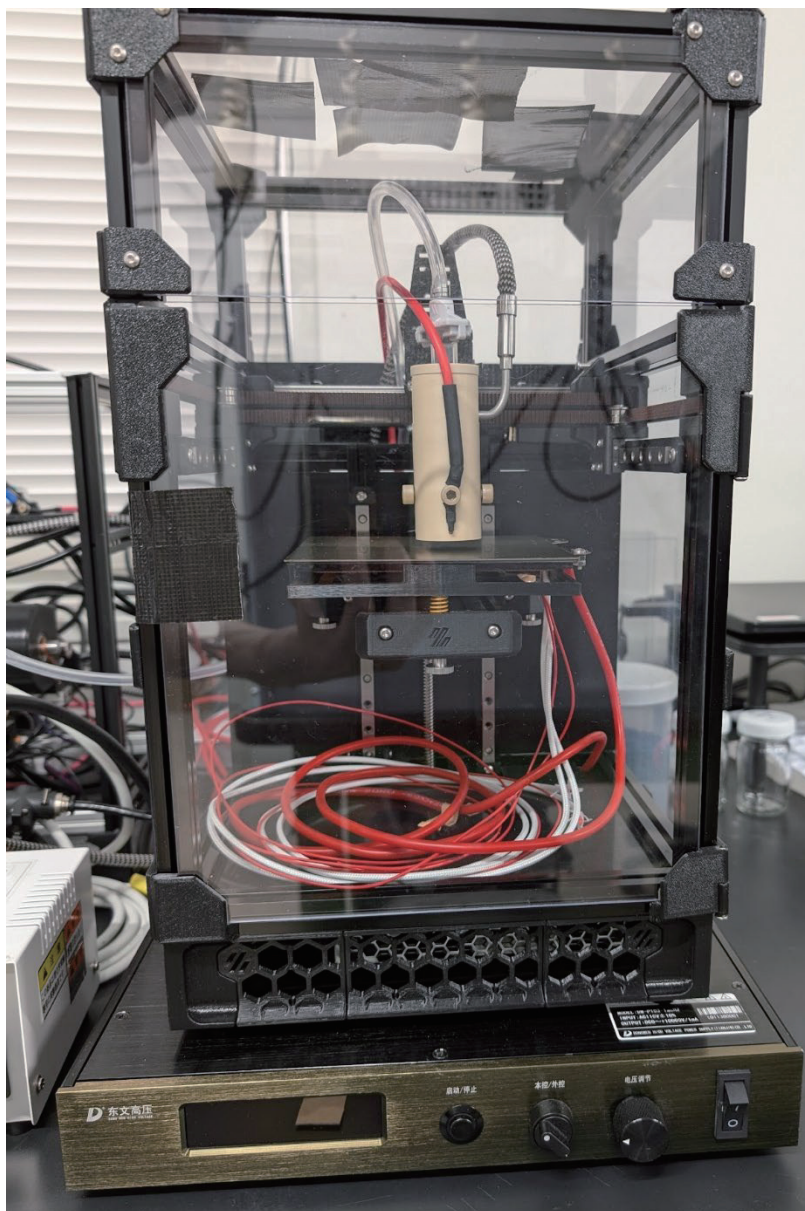


Fig. 1. Portable MEWron device for planar printing.

InThread: Enabling Co-Creation Through Interactive Weaving

InThread : インタラクティブな織りを通じた共創の実現

Innamia INDRIANI , Akira KATO , Junichi YAMAOKA

インナミア インドリアニ , 加藤 朗 , 山岡 潤一

Keio University, Graduate School of Media Design

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

【要約】

InThreadは、デジタルデザインと手作業による織物制作をつなぐインタラクティブな織機システムであり、テキスタイル制作における共創を促進します。伝統的な織りは素材の知識、リズム、精密さを必要としますが、デジタルツールはしばしばプロセスを見えにくくします。InThreadはカスタムソフトウェアとLEDの表示を組み合わせ、シャフトの上げ下げやパターンの進行を示し、織機を反応的なパートナーへと変えます。このハイブリッドシステムは触覚的な関わりを保ちながら、複雑なパターンの探求を可能にします。ユーザーは手を動かしながら学び、適応し、実験を重ねることで、人間と機械の共同制作と意味あるインタラクションを育みます。自動化ではなく、InThreadは作り手の役割を拡張し、デザイン研究、ハイブリッドクラフト、人間と素材の相互作用に関する議論に貢献します。

キーワード: 共創、ヒューマンマシンインタラクション、ハイブリッドクラフト、インタラクティブ織機、テキスタイル制作の革新

【Abstract】

InThread is an interactive weaving loom system that bridges digital design and manual fabrication, fostering co-creation in textile-making. Traditional weaving requires material knowledge, rhythm, and precision, while digital tools often obscure process. InThread integrates custom software with LED prompts to signal shaft lifting and pattern progression, transforming the loom into a responsive partner. This hybrid system preserves tactile engagement while enabling exploration of complex patterns. Through hands-on interaction, users learn, adapt, and experiment, fostering shared authorship and meaningful human-machine interaction. Rather than automating craft, InThread amplifies the maker's role, contributing to design research, hybrid craft, and human-material interaction discourse.

Keywords: 3D, Co-creation, human-machine interaction, hybrid craft, interactive weaving loom, textile-making innovation

1. Introduction

Textiles uniquely blend cultural symbolism and functionality, representing connection, wholeness, and transformation. And textile-making, often seen as meditative and generative, fosters calmness through repetitive motions, making it both a creative and therapeutic practice [1]. In contemporary design, textile creators are at a crossroads, balancing traditional hand craft with digital innovation. While computational tools offer new possibilities, textiles remain inherently material and haptic, requiring hands-on interaction to preserve their tactile essence [2]. Given their adaptability, textiles have emerged as a compelling medium for HCI research, offering diverse approaches to material-driven interaction and fabrication. They enable novel methods of construction through multi-material

integration, customization, and form-giving processes such as weaving and knitting—techniques that hold untapped potential for interaction design [3].

Textiles have long influenced human interaction and design. Weaving technique bridges craft and computation, offering insights into materiality within HCI [3]. While the mechanical loom revolutionized fabric production, weaving's artistic value endures. Today, blending traditional techniques with modern technology enables unique textile designs [5]. Textile methods continue to inspire innovations in soft circuitry, dynamic interfaces, and sensing systems. Collaborations between textile artisans and HCI researchers are crucial to preserving craft knowledge in interactive design [4]. Building on this, this research aims to develop tools that support textile designers to integrate digital

technologies into their creative practice while preserving traditional craftsmanship. With research objectives specifically:

- Develop tools that merge traditional and digital techniques to enhance textile designers' work while maintaining manual processes.
- Create tools that support textile practitioners' creative concerns, ensuring digital technologies assist rather than dictate their process.
- Integrate traditional craft with digital innovation to expand design possibilities while preserving the material essence of textiles.

2. Concept

2.1. Weaving and Weaving Loom

Weaving is one of the oldest known craft techniques, originating in the Neolithic Age [6] or the pre-pottery era [7]. Despite technological advancements, the fundamental weaving process has remained consistent. Early weaving techniques included the warp-weighted loom, used in ancient Greece and by Native Americans, where fabric hung from a rod with weighted ends. The two-barloom, developed in ancient Egypt, allowed horizontal or vertical weaving and influenced modern tapestry machines. The back-strap loom, originating in Pre-Columbian Peru, offered adjustable tension and remains in use in parts of Asia and the Americas. Tools such as bobbins, shuttles, reeds, and heddles—including harnesses—enabled the production of more intricate fabrics [7]. With the development of more intricate fabrics, looms also evolved, including the introduction of the drawboy or drawgirl on the drawloom, who played a role in helping the weaver lift the harnesses from the top of the harnesses, before the invention of the Jacquard loom [6]. Handweaving has shifted from industrial production to decorative purposes, but remains vital in creative industries for idea development. It is still valued in art schools for exploring materials and is used in occupational therapy [7]. Documenting the weaving process on a specification sheet is essential for recording thread sequences, shaft movements, and design details, ensuring accurate pattern replication and tracking of lifting combinations and weft variations [8]. This highlights the continued relevance of manual processes and handloom weaving.

2.2. Weaving Loom Development in HCI

Makers and textile designers today blend traditional

craft with digital tools to innovate while preserving core techniques. Since the rise of hacker spaces in 2016, makers have combined 3D printing, sewing, and server tech, reflecting the fusion of craft and technology [2,9]. HCI researchers recognize textiles as foundational to early computing, renewing interest in traditional crafts [10]. About 53.19% of hybrid craft studies in the past decade explore this link [11]. Although textiles in HCI research are valued for their rich potential in digital fabrication techniques, it is also possible that tools themselves can contribute to research in this area. Several studies in the HCI field focus on the development of the weaving loom itself, such as Loominary by Sullivan et al., which uses a rigid heddle tabletop loom as a game controller, turning player choices into tangible objects [13]. LoomPedals by Wu et al. introduces modular foot pedals for TC2 Digital Jacquard looms, enabling real-time design improvisation [10]. The Low-Cost Jacquard Loom by Albough et al., combines traditional hand weaving with computational patterning, allowing hands-on weaving with real-time design adjustments [12]. And last, the Escapeloam by Desphande et al., where they designed an augmented loom that links weaving with many creatives' possibilities. They didn't use exact weaving loom because traditional looms are complex which caused novices struggle to understand warps, wefts, heddles, drafts, and how they synchronize [14]. These four studies contribute to the development of weaving tools that not only focus on fabric production but also highlight how these tools provide innovation and contribute not only to the woven fabric in the process but also to the user experience. These four studies focus on weaving looms or tools that maintain a strong user role while also providing the freedom for users to express their creativity, even though the tools allow for creative interventions. It showed the potential of merging traditional and digital techniques in certain fields

3. Framework

InThread is being developed as an interactive handloom system (see Fig.1) that integrates digital technologies to support real-time feedback, creative exploration, and emotional engagement. While preserving the tactile, flexible, and improvisational qualities of traditional weaving practices. With the target user of this prototype are craft practitioners (including artist, designers, who working in textile-based creative

practices) who seeking a balance between digital control and hands-on exploration. Interactive fabrication system that being built on InThread compared to the other weaving process, the traditional one and the digital one can be seen on Fig.2.

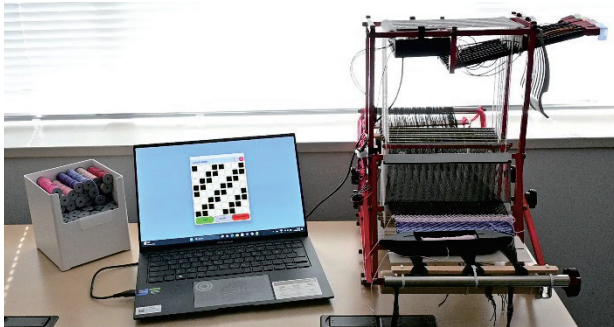


Fig. 1. InThread system

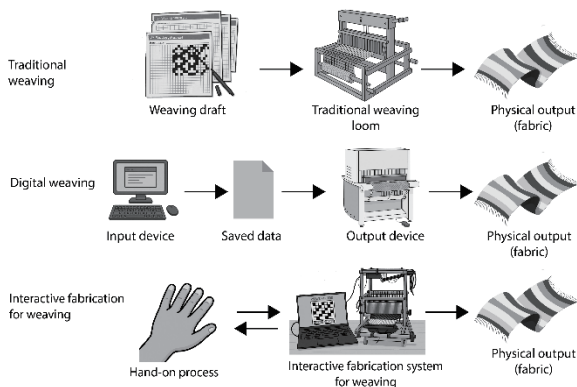


Fig. 2. Interactive fabrication for weaving compared to traditional weaving and digital weaving

The system is built by integrating electronic components into the Handy Loom 200, a portable tabletop loom by Tokyo Teoriki designed for compatibility with modern tools. This setup combines hardware elements such as an ESP32 microprocessor, limit switches, and LEDs with simple software installed on a computer. The Handy Loom 200 was selected for its foldable design, ability to maintain warp tension during weaving, and support for various yarn types, making it easy to transport and use in different environments. Also, consideration of employing traditional looms lies in the intention to preserve their cultural value, ensuring that the form and structure of the tool remain unaltered.

The accompanying software features a minimalistic 8x8 grid interface, allowing users to quickly sketch or input patterns without detailed previews that are usually used in weaving drafts. The concept of the grid was based on the weaving loom that was used, the table top loom with direct tie-up system where each lever connected directly to each shaft and can't be changed. Each column in the grid corresponds directly to an LED that is installed on each loom lever, enabling seamless communication between the user's pattern input and the

loom's LED system during weaving as can be seen on Fig 3 and Fig 4.

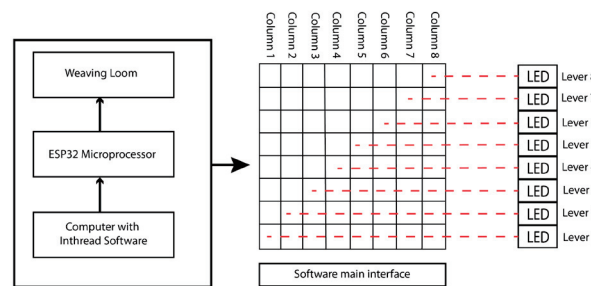


Fig. 3. Connection between software interface and LEDs

The software itself has two main features: Real-Time Pattern Modification and Co-Production. Real-Time Pattern Modification enables users to connect the software directly to the loom and input patterns or images without needing to create a traditional weaving draft first, fostering creative experimentation with patterns and materials. The Co-Production feature provides random pattern suggestions during weaving, creating an interactive dialogue between the loom and the user. Users can follow their original designs or adapt them based on the loom's suggestions, encouraging collaboration and enhancing the creative process.

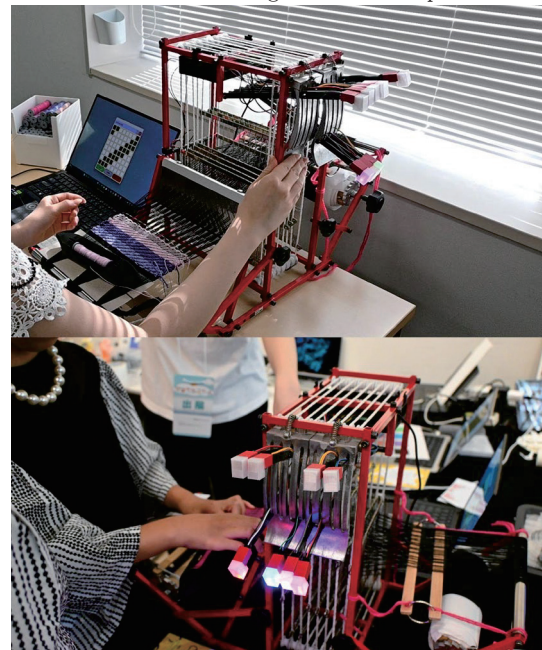


Fig. 4. InThread system being used by the users

An early pilot study (can be seen from below picture in Fig 4) was conducted to identify the appropriate users for the tools, which can be characterized as simple yet multifaceted. The tools were exhibited at a children's exhibition for two days, during which a fabric measuring 12 cm by 180 cm was produced while using 3-ply cotton threads for the weft yarn. Approximately 40 children from various ages were engaged with the tools, demonstrating a clear interest. However, the tools consisted of three components requiring user attention—the software interface, the LEDs and levers, and the

shuttle with yarns—which proved challenging for the children to manage simultaneously. Most participants could only focus on one aspect at a time, leading to difficulties in fully understanding the overall process. As a result, the approach was adjusted on the second day: the weaving patterns were pre-determined within the software, allowing the children to concentrate solely on the hands-on weaving experience. These changes improved usability by reducing cognitive load and enabling more focused interaction with the weaving activity.

4. Conclusion

These findings showed that InThread successfully integrates digital technologies with traditional weaving practices to support creativity and engagement, the complexity of managing multiple interactive components may pose challenges for novice users, such as children. However, for the intended target users—designers and textile artists—balancing real-time digital control with hands-on interaction is essential to foster creative exploration without causing cognitive overload. Simplifying or adapting the interface based on user skill levels can improve usability and focus. Therefore, future development should aim to refine the system's interaction design to provide flexible, responsive tools that empower craft practitioners to seamlessly combine digital and tactile elements in their creative workflows.

References

1. B. Gordon, "Textiles: The Whole Story", Thames & Hudson, London (2011).
2. N. Nimkulrat, F. Kane, K. Walton, "Crafting Textiles in the Digital Age", Bloomsbury, London (2016).
3. L. Devendorf, S. de Koninck, E. Sandry, "An Introduction to Weave Structure for HCI: A How-to and Reflection on Modes of Exchange", *Proc. 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference* (Virtual Event, Australia) (2022), pp.629-642.
4. L. Devendorf, K. Walters, M. Fairbanks, E. Sandry, E. R. Goodwill, "AdaCAD: Parametric Design as a New Form of Notation for Complex Weaving", *Proc. 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Hamburg, Germany) (2023), Article 127, 18 pages.
5. I. Indriani, S. I. Sakina, D. Widiawati, "Penerapan Teknik Double Weaving Sebagai Sirkuit Tekstil Benang Konduktif Untuk Kain E-textiles", *Arena Tekstil* 36,1 (2021), 375643.
6. E. Broudy, "The Book of Looms: A History of the Handloom from Ancient Times to the Present", Brandeis University Press, Hanover, NH (2022).
7. A. Albers, "Anni Albers On Weaving", Princeton University Press, Princeton, NJ (2017).
8. J. Shenton, "Woven Textile Design", Laurence King Publishing, London, UK (2014).
9. S. R. Davies, "Hackerspaces: Making the Maker Movement", Polity Press, Cambridge, UK (2017).
10. S. Wu, X. A. Corr, X. Gao, S. De Koninck, R. Bowers, L. Devendorf, "Loom Pedals: Retooling Jacquard Weaving for Improvisational Design Workflows", *Proc. 18th Int. Conf. on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Cork, Ireland) (2024), Article 10, 16 pages.
11. G. Liu, Q. Shi, Y. Yao, Y.-L. Feng, T. Yu, B. Liu, Z. Ma, L. Huang, Y. Diao, "Learning from Hybrid Craft: Investigating and Reflecting on Innovating and Enlivening Traditional Craft through Literature Review", *Proc. 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Honolulu, HI, USA) (2024), Article 674, 19 pages.
12. L. Albaugh, J. McCann, L. Yao, S. E. Hudson, "Enabling Personal Computational Handweaving with a Low-Cost Jacquard Loom", *Proc. 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Yokohama, Japan) (2021), Article 497, 10 pages.
13. A. Sullivan, J. A. Mc Coy, S. Hendricks, B. Williams, "Loominary: Crafting Tangible Artifacts from Player Narrative", *Proc. 12th Int. Conf. on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (2018), pp.443-450.
14. H. Deshpande, H. Takahashi, J. Kim, "EscapeLoom: Fabricating New Affordances for Hand Weaving", *Proc. CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems* (CHI '21) (2021), pp.1-13.

弾性リボン多角形ユニット座屈の 曲げ・ねじれ解析

Bending-Torsional Buckling Analysis of Elastic-Ribbon Polygonal Units

青木 馨, 今田 凜輝, 舘 知宏

Kaoru AOKI, Rinki IMADA, Tomohiro TACHI

東京大学

University of Tokyo

【要約】

本論は、弾性シートに往復する等間隔スリットを施したリボン構造の端部を接続し閉ループ化した構造を扱い、内部の曲げ応力により尖角をもつ N 角形状が自発形成される現象を解明する。まず $N = 4$ の四角ユニットを対象に、シェルモデルによる解析及び、簡易な曲げ-ねじれモデルを通して、内部に蓄積されるひずみエネルギーを評価し、平面形から折り畳み形への遷移に関する安定性を論じる。さらに、当該ユニットを要素とするアセンブリを提案する。ユニットを直列に剛接合した構造では、全体に引張または圧縮を与えることで、各ユニットが左右交互に回転しながら展開する特有の運動が観察される。また、接続様式の違いにより多様な動的挙動が実現されることを示す。

キーワード: 座屈, 回転, 歪エネルギー, 多角形, 安定性

【Abstract】

This study examines a ribbon structure made of an elastic sheet with uniformly spaced alternating slits. When the ends are joined to create a closed loop, the system forms a distinct N -gon shape because of internal bending stresses. Focusing first on $N=4$, we evaluate the stored strain energy using a shell model and a simple bending-torsion model and analyze the stability of the transition from a planar to a folded configuration. We further propose assemblies that use this unit as a building block. In chains where units are rigidly connected in series, applying global tension or compression induces a characteristic deployment in which neighboring units rotate alternately. We also show that varied connection schemes give rise to diverse dynamic behaviors.

Keywords: buckling, rotation, strain energy, polygon, stability

1. 序論

環状ストリップ (ring/hoop) の折り畳み・巻取り・再展開は、マイクロスケールの機械要素から、建築スケールの可搬構造・仮設パビリオンに至るまで、広範な応用可能性をもつ。とりわけ、平面円から鞍形を経て、多重コイルへと連続的に形状が遷移する現象は、収納性・可変性・組立性の観点からその力学的挙動解明の研究が行われてきた [Mouthuy et al. 2012, Wu et al. 2022, Tian et al. 2021]。こうした遷移は、細長部材の面外座屈を誘起し、曲げ・ねじれの釣合いによって多様な立体形状や多安定性を引き出す枠組みである。また、これらの力学的な構造は、アートの文脈でも探索されている [荒牧 2023]。

このような細長部材の構造は部材の組み立てで作られることがほとんどであるが、本論では、平面紙に切り込みを施し (Fig. 1)、帯を一周閉環させるという簡便なプロセスで実現可能な構造を提案する (Fig. 2)。製造面では、平面素材から無駄のない展開 (ネステイング) が可能である。力学的には、整数パラメータ N (折返し回数/多角形角数) に依存して変形様式と安定性が離散的に切り替わる点が特徴である。

本ユニットの基本的な変形挙動を紹介したのち、シエルのシミュレーションによって力学的な安定性や全体形状を議論する。そののち、挙動を説明する簡易な幾

何学モデルを導入し、最後にユニットを複合させた構造を提案する。



Fig. 1. Alternating slits in a flat sheet

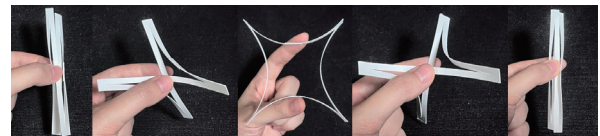


Fig. 2. Motion sequence of the quadrilateral unit

2. 形状変形の観察

提案構造は、直線状に折り畳まれた状態から平面上的 N 角形状を経由し、再び別の折り畳み状態に移行する (Fig. 2)。 $N = 6$ では、[Wu et al. 2022, Lu et al. 2023] の構造と類似した構造となり、折り畳み状態において、曲げもねじれもゼロになることから、折り畳み状態が明らかな安定状態となり、二つの状態の間をスナップして推移するバイステーブル構造となることが知られている。

これに対し四角形ユニット $N = 4$ では、この一連の変形の安定点は一見して明らかではなく、三つの状態それぞれで安定するようにも見える。四角形ユニットのそれぞれの状態を観察すると、折り畳み状態においては、上下の端辺（ユニットの角部/折り返し部分）の向きが約 90° 回転しており、帯にねじれが起きていることがわかる (Fig. 3)。一方で、平面に近い配置ではねじれはほとんど起きず、一つの帯が 90° 回転の曲げをしていることがわかる (Fig. 2)。これらのバランスによる総ポテンシャルエネルギーの変化を調べることによって、安定性を詳しく評価できると考えられる。

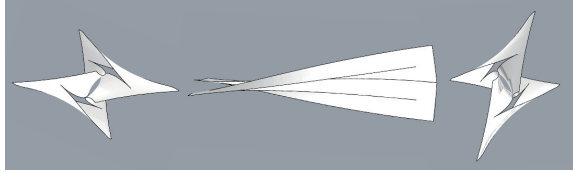


Fig. 3. End details

3. シェルモデル解析

3.1. 解析手法

ここでは、Grasshopper/Kangaroo を用いて四角形ユニットのメッシュモデルを構成し、シェルモデルに基づく形状変化のシミュレーションとエネルギー計算を行う。まず、メッシュモデルの構成に当たり、厚みを無視した長方形サーフィス 4 枚を互いの端部で積み重なる形で螺旋階段状に積層し、1 枚目と 4 枚目の端部を結合してループを形成する。本モデルを Grasshopper 上で三角メッシュを用いて離散化した後、Kangaroo を用いて各辺に適切な長さバネや角度バネを割り当て、動的緩和法シミュレーションを行う (Fig. 4)。

ここで採用したシェルモデルでは、面内歪エネルギー U_m と、面外の曲げエネルギー U_b の総計を最小化する。これらのエネルギーは[Grinspun et al. 2003]のモデルを用いて離散化し、それぞれ各辺 e の伸びエネルギー及び二面角 (Fig. 5) によるエネルギーに基づき、以下で定義される：

$$\begin{aligned} (\text{面内歪エネルギー}) &= U_m = \sum \left(\frac{1}{2} k_m \Delta l_i^2 \right), \\ (\text{面外曲げエネルギー}) &= U_b = \sum \left(\frac{1}{2} k_b \Delta \rho_i^2 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

なお、後で Fig. 7 に示すデータは、ヒンジ剛性 3959、線要素剛性 3825、また帯のアスペクト比(長さ/幅)10 の設定のもとで得られたものである。

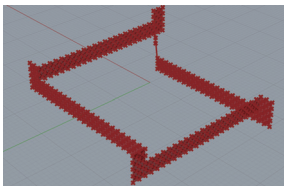


Fig. 4. Lapped four edges

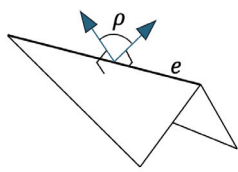


Fig. 5. Dihedral angle

3.2. 解析結果

シェルモデルを基に、平面状態(距離倍率1)から向かい合う帯の間の距離を漸減させる制約を与えることで、各ステップの静的平衡形状を追跡し、エネルギーの遷移を数値的に再現した結果を示す (Fig. 6, Fig. 7)。

Fig. 7 より、四角形ユニットは $U_b \gg U_m$ なので、全エネルギーのうち面外曲げの寄与が支配的であることがわかる。距離倍率の増加に伴いエネルギーは滑らかに低下し、一連の動きは低エネルギー谷を辿る単安定挙動を示す。階段状メッシュを、平面状四角形ユニットを必ず経由するように拘束すると、総計エネルギーは平面状態で最小値を取り、いずれの剛性・帯のアスペクト比(長さ/幅)でも平面状態が安定状態である。

上の結果を生じさせる原因の一つとして、「三角形メッシュのシェルモデルでは、材料を等方線形弾性体と仮定していること」が挙げられる。この仮定と本論で用いる拘束条件の下では、平面状態が総計エネルギーの極小となる。一方、実際のシート材は一般に直交異方性を示し、紙では製造方向(紙の目)に依存して曲げ剛性が大きく変動する。紙は層状の微細構造を有するため、等方材に比べて有効せん断弾性率 G が相対的に小さく、結果としてねじれ剛性 GJ が低くなる傾向がある。弾性係数の差異が全体挙動に与える影響を定量化するため、曲げとねじれに縮約した簡易梁モデルを導入する。



Fig. 6. Modeling in Grasshopper

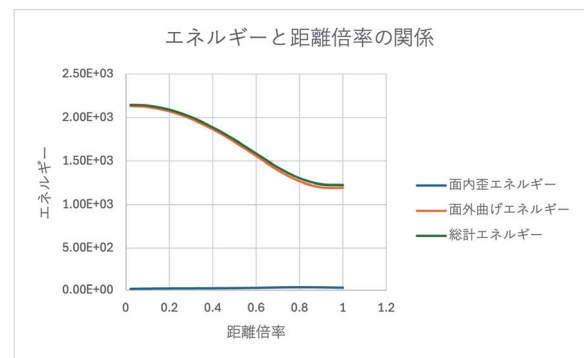


Fig. 7. Relationship between distance scaling factor and energy

4. 簡易梁モデルによる解釈

4.1. モデルの定義とエネルギー計算

ここでは、スリットの往復トリボン幅による階段状のずれを無視し、各帯を円弧に沿う梁で近似した簡易モデルを導入する (Fig. 8)。以下では、対称性に基づいて円弧の形状を幾何的に導出し (Fig. 9)、梁の曲げとねじれによる弾性エネルギーを評価する。

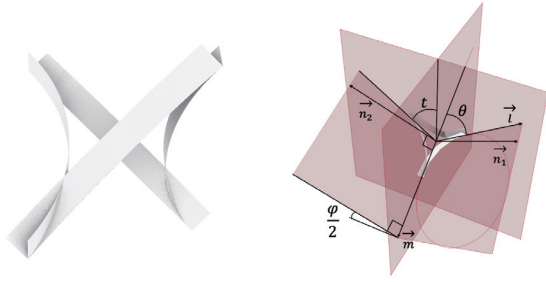


Fig. 8. Simplified beam model Fig. 9. Parameter definitions

対称な動き(C_{4v} 対称性)を仮定すれば、四つの梁は合同となり、互いに直交する二つの鏡面に接する曲線を鏡映反転させたものとしてモデル化可能である。ここで、シンプルな弧長一定の円弧として近似し、面内伸びを無視する(等長仮定)。中心角は θ に相当し、平面状態(四分の一円)の円弧長を L , 半径を R とすれば、

$$R = \frac{L}{\theta}. \quad (2)$$

この関係で幾何形状が一意に定まる。この円弧の回転角 θ が曲げエネルギー U_b に対応する。また、円弧を含む2つの鏡映平面の相対的回転角 φ (平面状態からの回転角の合計) が梁全体に分散しているという状態を考えて、ねじれエネルギー U_t に対応する。

以下、エネルギーを規定する曲げ角 θ とねじれ角 φ の関係を論じる。対称性を基に、Fig. 9 のように直交する鏡面で直交座標系を構成する。ここでは、円弧を含む平面と鏡面との交線と Z 軸のなす角を t とし、これを用いて曲げ角とねじれ角を表すことを考える。まず、円弧端部の接線方向の単位ベクトルを $\mathbf{l}$, $\mathbf{m}$ とすると、これらは以下のように表せる:

$$\begin{aligned} \mathbf{l} &= [0, -\sin t, \cos t]^T, \\ \mathbf{m} &= [-\sin t, 0, -\cos t]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、両者の内積と円弧の回転角 θ が以下の式で関連付けられる:

$$\mathbf{l} \cdot \mathbf{m} = -\cos^2 t = -\cos \theta. \quad (4)$$

また、 $\mathbf{l}$ の $\mathbf{m}$ に直交する成分 $\mathbf{n}_1$ とその鏡映対称 $\mathbf{n}_2$ ベクトル、平面同士の角度 φ は、以下の式で関連付けられる:

$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = -(1 - \cos^4 t) \cos \varphi. \quad (5)$$

ここで、式(5)の左辺を $\mathbf{n}_1 = \mathbf{l} + \cos \theta \mathbf{m}$ を用いて計算し、式(4)を用いて t を消去すると、以下の曲げ角とねじれ角の関係式が得られる:

$$\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta} = \cos \varphi. \quad (6)$$

すなわち、ねじれ角 φ は曲げ角 θ のみで規定される。以上より、対称性を仮定すると、円弧の形状は t をパラメータとする1自由度系として扱える。

上で導出した円弧の曲げ角とねじれ角を用いて、多角形のねじれエネルギーと曲げエネルギーは、以下のように表せる:

$$\begin{aligned} (\text{ねじれエネルギー}) &= 4 \times U_t = 4 \times \frac{GJ\varphi^2}{2L}, \\ (\text{はり曲げエネルギー}) &= 4 \times U_b = 4 \times \frac{EI\theta^2}{2L}. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、式(6)から、エネルギー間に以下の関係式が成り立つ:

$$U_t = U_b \frac{GJ (\cos^{-1} \frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta})^2}{EI\theta^2}. \quad (8)$$

よって、 t が与えられれば、式(7)と(8)から(同一剛性を共有する)多角形のエネルギーが計算できる。

4.2. 安定状態の遷移

式(7), (8)より、簡易モデルでは、平面に近い(θ が大きい)配置では曲げエネルギー支配、折り畳み配置(θ が小さい)ではねじれエネルギー支配となることがわかる。次に厚さ 0.1 の細幅帯を対象に、折り角 t をパラメータとして総エネルギー $U = U_b + U_t$ を評価する。

材料の弾性係数比 G/E を変化させると、 $t \in (0, \pi)$ の範囲では $U = U_b + U_t$ はモノステーブルまたはバイステーブルであり、極小を与える折り角 t' は G/E に依存して連続的に移動する。Fig. 10 から読み取れるように、 $G/E \leq 0.01$ の場合は $t' \approx 0, \pi$ に近づき2つの折り畳み側で安定化し(バイステーブル)、 $G/E \geq 5$ の場合は $t' \approx \pi/2$ となり平面側で安定化する(モノステーブル)。

なお、つり合い状態を計算すると、極小条件から、以下の式が得られる:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{EI\theta^2}{2L} + \frac{d}{dt} \frac{GJ\varphi^2}{2L} = 0. \quad (9)$$

ここで、 $J = 4I$ とすると、弾性係数比 G/E と t' の関係式が得られる:

$$\frac{G}{E} = \frac{\cos^{-1}(\cos^2 t') \cos t' \sqrt{1 + \cos^2 t'}}{4 \sin t' \cos^{-1} \left(\frac{\sin^2 t'}{1 + \cos^2 t'} \right)} = R(t'). \quad (10)$$

区間が $t \in (0, \pi)$ であれば、対称性 $R(t') = R(\pi - t')$ より、 $t' = \pi/2$ となるような R_0 以外では $R(t') = R_0$ に対する解は2つあり、バイステーブルである(R_0 は G/E の任意の設定値)。

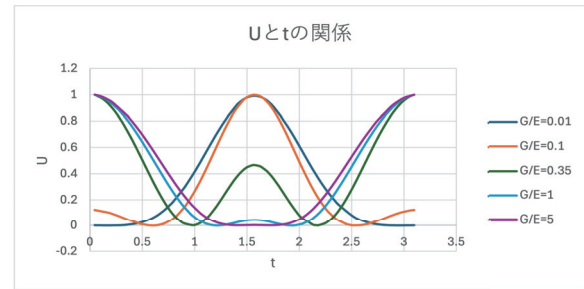


Fig. 10. Potential Energy U over the deployment t with different stiffness ratio G/E , U is normalized by its maximum value

5. 多ユニット連結

ユニットを辺結合または頂点結合で直列接続すると、全体の引張/圧縮操作により左右交互に回転しながら展開・収納する運動が得られる。接続方式の選択により、展開モードや必要外力の履歴特性を制御でき、多様な動的パターンを設計できる。これによりアクチュエータの少ない受動展開機構、可変剛性要素、折紙的メタマテリアルなどへの展開が期待される。

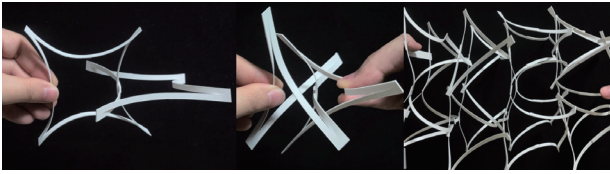


Fig. 11. Edge joint

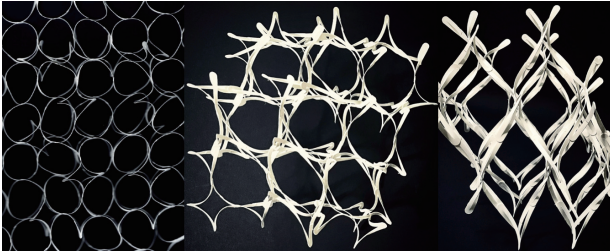


Fig. 12. Vertex joint

6. 結論

本論では、四角形ユニットの座屈挙動に伴うエネルギー変化をシェルモデル、簡易梁モデルにより体系的に解析を行った。結果として、シェルモデルでは面内伸長に比べ、面外曲げの寄与が大きいということがわかった。提示した「平面状四角形を経由する」拘束下では平面状態が全ポテンシャルエネルギーの最小となることを示した。したがって、本構成はトリステータブルではなく、一つの安定点を持つということになる。シート材の異方性による影響を解釈するため簡易梁モデルを導入し、平面状態から折り畳み状態に変形する過程で、ねじれ角と曲げ角の関係式(6)を導出した。これにより、平面近傍では曲げ支配、折り畳み側ではねじれ寄与が増大するという支配機構が定量的に説明される。

更に材料弾性係数比 G/E を指標としてパラメトリック解析を行い、極小エネルギーを与える折り角 θ' は G/E に依存して連続的にシフトすることを示し、 G/E の値によってモノステーブル・バイステーブルとなることが決まることを示した。これにより、等方性を仮定したシェルモデル単独では捉えがたい挙動の変化が明らかとなった。

このように、 $N = 4$ ユニットは $N = 6$ ユニットとは異なる挙動を示すことがわかる。特に実材料に内在する初期自発曲率や残留応力(いわゆる「くせ」)に強く依存し、具体的には、初期状態から異なる形(平面状態近傍または折り畳み状態近傍)へと安定形状が変化する現象が確認された(Fig. 13)。この遷移は、低エネルギー経路に沿って生じる準メカニズム的変形として位置づけられる。

次に、繊維方向と曲げ軸の相対関係が最終安定形状を大きく規定することを確認した。すなわち、材料の異方性は方向別の伸び・曲げ抵抗を変化させ、エネルギー極小の位置に影響する。具体的には、紙の目をスリットと平行した場合は折り畳み状態で安定化し、直交させた場合は平坦状態で安定化することが確認できた。一方で、厚さや帯のアスペクト比の影響は一般には無視できないものの、本論のシェルモデルシミュレーション範囲では、これらを変更してもエネルギー曲線の位相的特徴は大きく変わらず、主として自発曲率と異方性

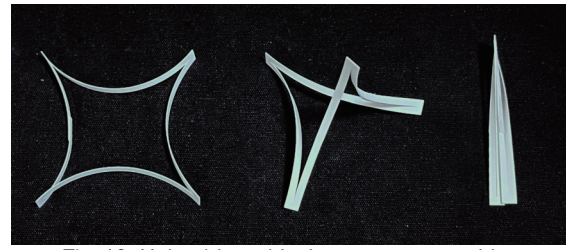


Fig. 13. Unit with residual curvature — stable state

(とりわけ G/E)が力学構造を決めることが示唆された。言い換えれば、剛性はエネルギーのスケールを、異方性は安定点の位置を主に決定する。

ただし、この簡易梁モデルは、原モデルが有する端部の段差的積層に起因する拘束・相互作用を省略している。そのため、本結果のみから原モデルが任意の t 、 G/E に対してモノステーブル・バイステーブルであると断定することはできない。原モデルの安定性評価には、直交異方性構成則を組み込んだ解析、あるいは対応する実験的検証を含む追試が今後の課題である。

謝辞

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR232T の支援を受けています。

参考文献

1. Aramaki, H. (n.d.). *Haruka Aramaki* [Home page]. <https://harukaaramaki.com/>
2. D. Rutten, Grasshopper v1.0.0008 (2025).
3. Grinspun, E., Hirani, A. N., Desbrun, M., & Schröder, P. (2003, July). Discrete shells. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH* (pp. 62–67).
4. Lu, L., Dai, J., Leanza, S., Hutchinson, J. W., & Zhao, R. R. (2023). Multiple equilibrium states of a curved-sided hexagram: Part II—Transitions between states. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 180, 105407.
5. Mouthuy, P. O., Coulombier, M., Pardoën, T., Raskin, J. P., & Jonas, A. M. (2012). Overcurvature describes the buckling and folding of rings from curved origami to foldable tents. *Nature communications*, 3(1), 1290.
6. R. McNeel, Associates, Rhinoceros 8 (2025).
7. Wu, S., Dai, J., Leanza, S., & Zhao, R. R. (2022). Hexagonal ring origami—Snap-folding with large packing ratio. *Extreme Mechanics Letters*, 53, 101713.
8. Yu, T., Dreier, L., Marmo, F., Gabriele, S., Parascho, S., & Adriaenssens, S. (2021). Numerical modeling of static equilibria and bifurcations in bigons and bigon rings. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 152, 104459.

Melt Electrowriting(MEW)技術を用いた大容量チューブ状スキャフォールドの高積層造形と形状制御

High-Stacked Fabrication and Morphological Control of Large-Volume Tubular Scaffolds via Melt Electrowriting (MEW) Technology

張 嘯宇, 徐 淮中

ZHANG XIAOYU, XU HUAIZHONG

京都工芸繊維大学

Kyoto Institute of Technology

【要約】

本研究では、Melt Electrowriting (MEW) 3D プリンティング技術に基づく新たな制御手法を提案し、大容量かつ高積層のチューブ状スキャフォールド造形における課題解決を試みた。計算機シミュレーションと実験を組み合わせることで、印加電圧と集積距離の間に成り立つ拘束関係を構築し、コレクター速度の調整によって繊維径を精密に制御できることを明らかにした。実験の結果、1000 層を超える大容量チューブ状スキャフォールドの造形に成功し、繊維径の均一性も良好に維持された。さらに、コレクター速度の追加的な調整により、造形物の形態制御が可能となり、層高の差異を有する造形の実現も達成した。これらの成果は、高積層チューブ状スキャフォールドの造形プロセスにおける重要な突破口となり、MEW 技術の実用的応用範囲を大きく拡張する可能性を示している。

キーワード: 3D, Melt Electrowriting (MEW), チューブ状スキャフォールド, 高積層造形, 形態制御

【Abstract】

This study presents a novel regulation strategy based on Melt Electrowriting (MEW) 3D printing technology to address the challenges of fabricating large-volume, high-layered tubular scaffolds. By combining computer simulations with experimental validation, we established a constraint relationship between the applied voltage and the collector distance, enabling precise control of fiber diameter through adjustment of the collector speed. The experimental results successfully demonstrated the fabrication of large-volume tubular scaffolds with more than one thousand layers, while maintaining excellent fiber diameter uniformity. Furthermore, additional regulation of the collection speed allowed for morphological control of the scaffold, enabling differentiated layer heights during fabrication. This breakthrough in high-layered tubular scaffold printing significantly broadens the potential applications of MEW technology in practical production settings.

Keywords: 3D, Melt Electrowriting (MEW), High-layer fabrication, Morphological control

1. 序論

近年、Melt Electrowriting (MEW) 技術は、サブミクロンレベルの精密繊維を積層できる高精度造形法として注目されている。しかし、大容量・多層の管状スキャフォールド造形では、繊維径の制御や層間安定性の維持が課題となっていた。本研究では、印加電圧と受け取り距離の制約関係をシミュレーションと実験により明らかにし、さらに受け取り速度を調整することで繊維径を精密に制御した。その結果、1000 層を超える大容量管状スキャフォールドの安定造形に成功し、積層高さや形態の差異化も実現した。本成果は、MEW 技術の実用応用範囲を拡大し、組織工学や再生医療分野での大規模支架製造に貢献するものである。

2. 実験方法

本研究で使用した高分子は PURASORB® PC 12 (Corbion 社製、GMP グレードの PCL) である。本材料は ϵ -カプロラク톤のホモポリマーであり、固有粘度は約 1.2 dL/g と規定されている。PCL は融点比較

的低く(約 55~60 °C)、さらに迅速な固化特性を示すため、Melt Electrowriting (MEW) におけるサブミクロン繊維の安定的かつ連続的な堆積に適している。

プリンティング装置は研究室において設計・構築した自作の MEW システムを用いた。この装置は、温度制御モジュール、気圧調整モジュール、電圧制御モジュール、さらに三軸制御器で構成され、安定した繊維の堆積を可能にしている。

数値シミュレーションには COMSOL Multiphysics (バージョン 6.1, COMSOL 社、米国)を用いた。MEW 装置は 2 次元モデルとして構築され、電気伝導率、密度、動粘度、誘電率などの物性値は材料特性に基づいて設定した。全ての計算領域は流体力学および汎用物理学に基づくメッシュ分割技術を適用し、計算の精度と信頼性を確保した。電圧刺激には端子境界条件を適用し、入口圧力は 0.15 MPa に固定した。計算の収束精度は 1×10^{-13} に設定し、数値結果の精密性を保証した。

プリント条件においては、ヒーター温度を常時 98°C に維持し、窒素ガス圧力を 0.15 MPa に固定した。印

加電圧および受け取り距離はシミュレーション結果に基づいて調整した。受け取り速度は初期値 5 mm/s とし、積層高さの増加に伴って段階的に減少させ、射出ジェットと支架表面との相対速度が常に 5 mm/s となるよう制御した。

得られたチューブ状スカフォールドは走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察し、繊維径を測定することでプリント結果の評価を行った。

3. 結果と考察

本研究では、COMSOL Multiphysics を用いて電場モデルの数値シミュレーションを行った。MEW 装置は断面二次元構造としてモデル化した (Fig.1B)。従来の最適印刷パラメータの経験に基づき、例としてニードルの上昇高さ 0.75 mm、五角星先端から軸までの距離 0.75 mm、ニードルと先端の間隔 2.5 mm、印加電圧 5900 V の条件下では、ニードル部における平均電場強度は 1.1×10^6 V/m であった。次に、同一の電場強度 1.1×10^6 V/m を維持したまま、ニードルが 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm の位置にある場合の電場強度分布をシミュレーションした。その際、ニードルと先端との距離はそれぞれ 3 mm、3 mm、4 mm、4 mm、4 mm とし、必要な印加電圧は 9,000 V、12,000 V、14,000 V、16,000 V、19,000 V であった。さらに、印加電圧とニードル先端の上昇高さとの関係をプロットした (Fig.1C、Fig.1D)。

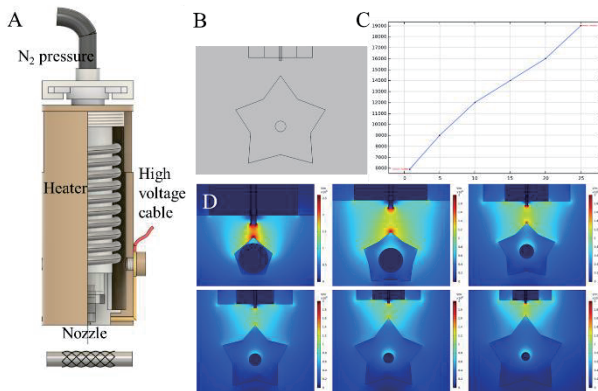


Fig. 1. (A) Schematic image of a customized MEW device. (B) Electric field simulation structure diagram (taking the needle lift height of 20mm as an example). (C) Relationship between applied voltage and receiving height change. (D) Electric field intensity distribution of simulated needle at 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, and 25 mm.

シミュレーション結果に基づき、ニードル先端の上昇高さに対する印加電圧の変化関係を参照して、印加電圧および受け取り距離を調整することで、1000 層に及ぶチューブ状スカフォールドのプリントに成功した (Fig.2A)。得られたスカフォールドを切開し、その一部を SEM により観察した結果、繊維の形態は全体として均一に分布し、安定して堆積していることが確認された (Fig.2B)。さらに Fig.2C1~C9 は異なる部位にお

ける繊維の状態を示しており、番号が大きくなるにつれて実物図中の矢印方向に沿って外側へと観察位置が移動している。繊維径はいずれの部位でも約 15 μm であり、プリントサイズの増加に伴って勾配的な変化が生じることはなかった (Fig.2C)。

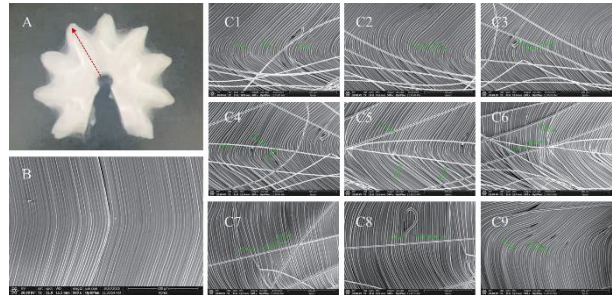


Fig.2 (A) Printing a thousand-layer tubular scaffold sample. (B) Fiber morphology under scanning electron microscopy. (C1)–(C9) They are the intuitive states of fiber filaments in different parts. The serial numbers increase in sequence, representing that the observation position gradually moves outward in the direction of the arrow in the actual picture.

実験結果から、ニードルに作用する電場を均一な強度に制御することで、プリント全体の過程において流量を安定的に維持できることが示された。これにより繊維の安定堆積が促進される。また、ジェットとスカフォールド外径表面との相対速度を調整することで、繊維の太さを制御し、チューブ状スカフォールドの形態を変化させることが可能となった。

4. 結論

本研究により、電圧とニードル高さの関係をシミュレーションにより明確化し、それに基づいたプロセス制御によって 1000 層規模のチューブ状スカフォールド造形が実現された。SEM 観察の結果、繊維は均一で安定した堆積を示し、サイズ拡大に伴う繊維径の勾配変化は認められなかった。これらの成果は、MEW 技術における高積層構造体の製造を可能とし、将来的に再生医療、組織工学、医療機器開発などへの応用展開が期待される。

参考文献

1. K. Cao, F. Zhang, “A holistic model for melt electrowritten three-dimensional structured materials based on residual charge”, *Int. J. Bioprinting*, 9 (2022), 2.
2. U. Saha, R. Nairn, “A Deeper Insight into the Influence of the Electric Field Strength When Melt-Electrowriting on Non-Planar Surfaces”, *Macromol. Mater. Eng.*, 306 (2021), 2100496.

放射状スリット型スライスフォームの展開機構

Deployment Mechanism of Radial Slit Sliceform Structure

林 清人, 舘 知宏

Kiyoto HAYASHI, Tomohiro TACHI

東京大学

University of Tokyo

【要約】

本研究では、従来の平行スリット型スライスフォームを拡張し、放射状にスリットを配置した新たなスライスフォームを提案した。本構造は平面から球面へと展開し、再び折りたたまれるという動きを示し、展開過程でスナップスルー現象が発生する。円弧モデルおよび扇形モデルを用いて幾何学的特性を解析し、ねじれない変形ではチェビシェフネットに対応する球面リンク挙動を示すことを確認した。さらに、曲げによるひずみエネルギーを曲げ角度の二乗に基づき評価し、シミュレーションを実施した結果、最大展開状態でポテンシャルエネルギーが最大となり、両端の折りたたみ状態が安定平衡点、最大展開状態が不安定平衡点となることを示した。

キーワード: スライスフォーム, 放射状スリット, スナップスルー, ひずみエネルギー, 曲げ

【Abstract】

In this study, we propose a new sliceform structure in which slits are arranged radially, extending the conventional parallel-slit sliceform. This structure deploys from a plane into a spherical shape and then refolds. During deployment, a snap-through phenomenon occurs. Using arc model and sector one, we analyzed its geometric characteristics. Under non-twist deformation, the linkage behavior corresponds to a Chebyshev net on a sphere. Furthermore, the bending strain energy was proportional to the square of the bending angle, and simulations revealed that the potential energy becomes maximum at the fully deployed state, with the two folded states being stable equilibria and the fully deployed state being an unstable equilibrium.

Keywords: sliceform, snap-through, radial slit, strain energy, bending

1. はじめに

スライスフォームは、紙や樹脂板などに等間隔のスリットを設け、格子状に組み合わせることで立体構造を形成する手法である(図1)。立体に展開したスライスフォームは、展開方向にせん断起こしにくい特性を持つ。

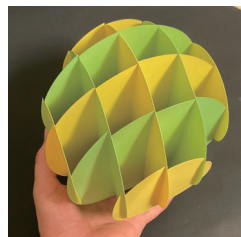


Fig. 1. Example of parallel-slit sliceform

つ。さらに、軽量で立体構造を形成しやすい性質上、建築分野で用いられることもあり、計算機を用いた設計支援なども行われている。[1, 2]

従来のスライスフォームはスリットが平行に配置されており、折りたたみや展開が一方向に限定され、得られる形状も制約されていた。このため、曲面や球状などより自由度の高い展開構造の実現には限界があった。

本研究では、スリットを放射状に等角度間隔で配置した新たなスライスフォーム構造を提案する。本構造では、平面から球面に展開し、再び平面に折りたたまれるという動きを持つ(図2)。従来の平行スリット型では困難であった球状への展開や、複数の折りたたみモードを持つ機構が実現可能である。また、本構造では、スリット配置と曲げ挙動が密接に関係し、展開過程においてスナップスルー現象が現れる。



Fig. 2. Deployment behavior of a radial-slit sliceform with arc-shaped elements

平行スリット型以外を扱った先行研究では、スライスフォームをセル配列として再定式化し、対称構成と非対称構成の違いや、剛体運動の限界を明らかにすることでその幾何学的特性を整理している[3]. 本研究では、放射状スリット型スライスフォーム全体の展開挙動を幾何的に解析するとともに、展開過程におけるスナップスルー現象の発生を幾何学モデルと力学解析の両面から示した.

2. 幾何的性質

従来のスライスフォームはすべての回転ジョイントが平行であり、ヒンジに対して垂直な方向から見ると、平面リンクのパンタグラフ機構である(図 3a).

スリットを放射状に配置すると、回転ジョイントが一点を通る(この点を中心とする)ので、部材を球面上の測地線で表した球面リンク機構として理解できる(図 3b).

すべての部材が剛体だとすると球の測地線同士が距離を保たなくてはならないが、実際には球の測地線は 2 点で交わるので、展開することはできない. 実際にモデルを観察すると、展開時に部材が曲がっていることがわかる. このとき、隣接する回転軸が中心を維持し続ける場合、材が曲がっていても部材が球面を維持する(図 4a). 一方で、材料が「ねじれ」変形をする場合、隣接する回転軸がねじれの位置に来るため、中心を維持しない. この時は機構全体が球面を維持するとは限らない. 実際図のように円筒形の変形を起こしているとき部材はねじれ変形しているものと考えられる.(図 4b)

本研究では、「ねじれ」のない展開に限定して、展開機構を幾何的観点から理解する.

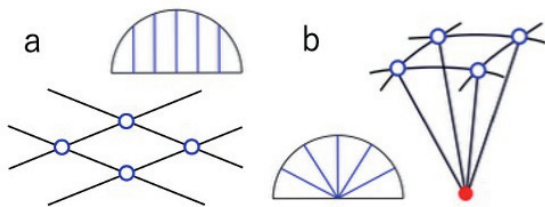


Fig. 3. Slit arrangement and the corresponding

2.1. 円弧モデルの球状展開

パーツが全て円弧を描くとき、ねじれのない変形では曲げ線が円の中心で交わる. このモデルを円弧モデルと呼ぶ. 回転ジョイント周りの変形を円形折り紙に置き

換えて考えると、中心を通る線で折りたたむ動きに対応する. そのような折りたたみでは、直径線を軸にして半円を回転させる動きが起こるため、紙のフチが常に一定の円周上を維持して動く. 各パーツが一定の球面上を維持するため、リンケージ全体でも球面上にそって展開する.

a.ねじれのない展開 b.ねじれのある展開

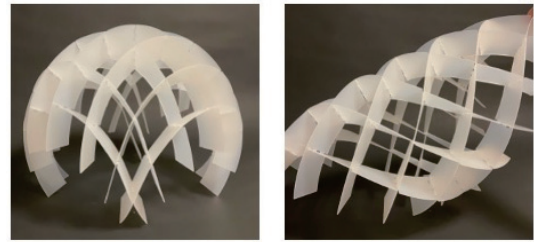


Fig. 4. Twisted deployment and non-twisted deployment

円弧モデルの挙動は球面リンクとして考えることができる. この時、リンクの長さは、球の中心からの角度であらわされており、一つの球面四角形が二方向に平坦に折りたたまれる条件から、向かい合う辺の長さ(角度)が等しいことが求められる.

このような制約を持つ格子の配置は球面におけるチェビシェフネットとして解釈できる[4]. 実際に、チェビシェフネットの中心を通るエッジの交差角を 0 から π まで連続的に変化させると、それに応じて円弧モデルと同様の展開動作が得られる(図 5). 球上のチェビシェフネットでは、端にある格子ほど大きく歪んでいるが、円弧モデルでも端の部材ほど大きく曲がり格子を歪めていることがわかる. これが、平面リンクとは異なりスナップスルー現象を起こす原因となっている(3 節で解説をする).

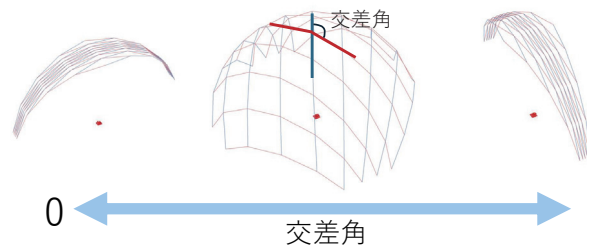


Fig. 5. Spherical Chebyshev net

2.2. 扇形モデルの導入

円弧モデルにおいて、ねじれない変形を仮定するとき、円弧からその中心まで面を伸ばして、半円状のパーツを組み合わせた扇形モデルを考えても、同様の挙動を見せる(図 6)。

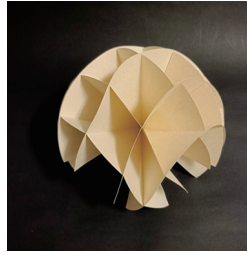


Fig. 6. Deployment of the sector model

扇形モデルを基本形として考え、その面の一部を切り出した任意の図形で同様のリンケージを考えることができる。その形状は円形に限定されない。一例として楕円モデルを作成した(図 7)。スリットは放射状に等角度間隔で配置した。円弧モデルと同様に、平面から立体へと展開し再び折りたたまれる動きを見せる。また本リンケージでは、展開時、それぞれのパーツが隣り合うスリット間の角度分だけ回転する。そのため、楕円のような回転対称性を持たない図形では、二つの折りたたみモードで異なる形を見せる。

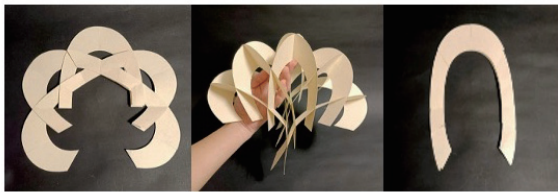


Fig. 7. Deployment behavior of the elliptical model

3. 機械的性質

3.1. スナップスルーと実際の展開挙動

スナップスルー座屈とは、片方の安定点からもう一方の安定点へと状態が飛び移るように遷移する現象のことを言う。円弧モデルでは、最大展開状態を境に勢いよく閉じるようなスラップスルー座屈が確認される。これは展開時の曲げに由来し、部材には曲げが蓄積されひずみエネルギーとして蓄えられた後、放出される形でスナップ挙動が現れると考えられる。本研究ではシミュレーションを用いて、その発生メカニズムについて研究を行った。

3.2. 曲げによるひずみエネルギー

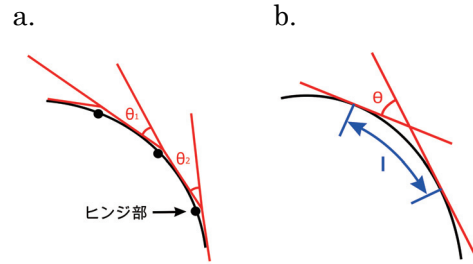


Fig. 8. discrete approximation of bending

計算のため、連続的な曲げを離散的に近似し、そのひずみエネルギーを考える(図 8)。

曲率を κ とし、 θ を離散化された部材同士の角度、 l を長さとする、 l は一定であるから

$$\theta = \int_0^l \kappa dl = \kappa l. \quad (1)$$

その時曲げモーメント M は

$$M = EI\kappa. \quad (2)$$

ここで、 EI は曲げ剛性である。よって曲げエネルギーは $U = \frac{1}{2} \int_0^l M \cdot \kappa dl = \frac{1}{2} EI \kappa^2 l = \frac{1}{2} \frac{EI}{l} \theta^2. \quad (3)$

上記の式より、曲げによるひずみエネルギーは、曲げ角度の二乗に比例することがわかる。そのためポテンシャルエネルギーを曲げ角度の二乗和で評価した。

3.3. シミュレーション

扇形モデルについて、緩和法を用いたシミュレーションを行い、実装は Grasshopper 上の Kangaroo を使用した[4, 5]. 格子の中心に並べた頂点を変数として、中心点からの距離を一定に保つことで扇形を実現した。また、隣り合う面間に角度バネを入れ、曲げによる歪みを再現した(図 9)。シミュレーション上で実際に開閉を行い、その曲げ角度と展開角度、曲げエネルギーを記録した。

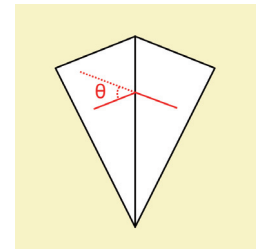


Fig. 9. Angular spring between adjacent faces

3.4. 結果と考察

図 10 は横軸に展開角度(θ)、縦軸に曲げ角度の二乗和(θ^2)をとったグラフである。両端にエネルギーの低い谷を持ち、最大展開状態($\theta=0.5\pi$)でポテンシャルエネルギーが最大になることがわかる。スナップスルーでは

エネルギーの低い谷から、山を飛び越えもう一方の谷へ移るような動きが見られる。

隣接するデータの差分 dU , $d\theta$ からエネルギー勾配 $M=dU/d\theta$ を求めた(図 11). エネルギー勾配 M は中心を通る部材の交差角を変化させるのに必要なモーメントである. $M=0$ のとき平衡状態である. $\theta=0, \pi$ (折りたたみ状態)では傾きが正であり, 安定平衡点であるが, $\theta=0.5\pi$ (最大展開状態)では傾きが負であり, 不安定平衡点になっていることがわかる. 実際の展開では, この不安定平衡点付近に達すると, 構造は連続的に通過するのではなく, エネルギー障壁を飛び越えるようにもう一方の安定平衡点へと一気に状態を切り替える。

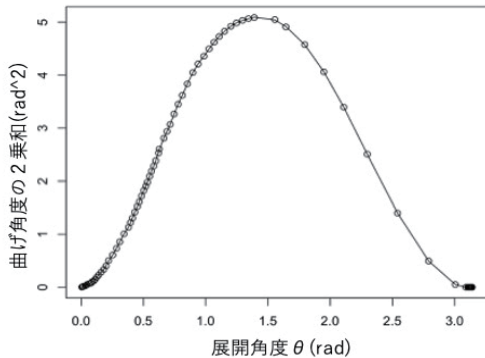


Fig. 10. Graph showing the relationship between deployment magnitude and potential energy

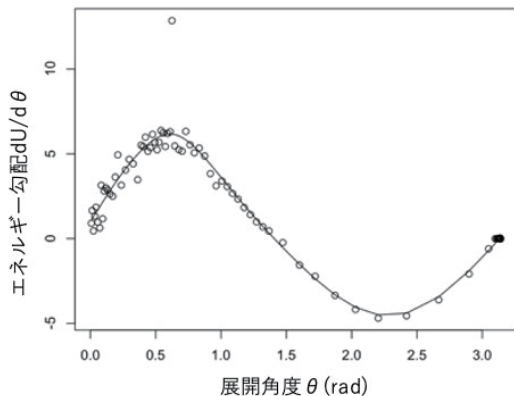


Fig. 11. Graph showing the relationship between deployment magnitude and gradient of potential energy

4. まとめと今後の展望

本研究では, 放射状スリット型スライスフォームを球面リンク機構として捉え, その幾何的特性を解析した。

球面への展開と折りたたみ条件の制約から, 球上のチェビシェフネットに対応することを示すとともに, 展開過程において部材の曲げがスナップスルー現象を引き起こすことを明らかにした。

本研究は円形モデルを中心に解析を行ったが, 今後は円形以外のモデルについても系統的に検討する必要がある. また, 本研究では「ねじれを伴わない変形」に限定したが, 実際の材料におけるねじれ変形の影響を解明することが課題である. さらに, 実験的・数値的な検証を通じて, 材質や寸法の違いがスナップスルーの発生条件に及ぼす影響を明らかにすることで, 展開挙動の制御や応用設計への展開が期待される。

4. 謝辞

本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR232T の支援を受けています. 心より感謝申し上げます。

5. 参考文献

1. J. Mitani and H. Suzuki, Computer aided design for 180-degree flat fold origamic architecture with lattice-type cross sections, *J. Graphic Sci. Jpn.* 37, 3 (2003).
2. Le-Nguyen, T. V., Low, K. L., Ruiz, C., & Le, S. N. (2013). Automatic paper sliceform design from 3d solid models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(11), 1795-1807.
3. Watson, T., & Seffen, K. A. (2021). Deployable motion of rotational sliceforms. *Physical Review E*, 104(4), 045003.
4. R. McNeel, Associates, Rhinoceros8 (2025).
5. D. Rutten, Grasshopper v1.0.0008 (2025).
6. C. Baek, A.O. Sageman-Furnas, M.K. Jawed, & P.M. Reis, Form finding in elastic gridshells, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115 (1) 75-80.

LiDAR スキャナで取得したデータによる地形や建築構造物の 3D 化の検討

Investigation of 3D reconstruction of terrain and architectural structures from LiDAR scanner data

岩田悠希, 熊坂憲広, 武井琉奈, 星野龍彦, 内田孝幸

東京工芸大学

Yuuki Iwata, Norihiro Kumasaka, Runa Takei, Tatsuhiko Hoshino, Takayuki Uchida

Tokyo Polytechnic University

【要約】

本研究では、LiDAR スキャナ FJD Trion S1 と RTK-GNSS を組み合わせ、江の島シーキャンドルを高精度に三次元計測し、3D プリンタで模型化した。Cloud Compare や Revit による前処理と補完を行い、安定したメッシュモデルを生成。RTK 常時接続により累積誤差を抑制し、建物形状を忠実に再現できた。今後は Gaussian Splatting 等の AI 技術で欠損補完や高品質化が期待される。

キーワード : LiDAR, RTK-GNSS, モデリング, 3D プリンタ, アーカイブ

【Abstract】

This study demonstrates a workflow for high-precision 3D modeling of the Enoshima Sea Candle using the LiDAR scanner FJD Trion S1 combined with RTK-GNSS. Continuous RTK connection effectively reduced cumulative errors and provided stable point cloud data. Preprocessing with CloudCompare and reconstruction with Revit enabled the creation of a mesh suitable for fabrication, while additional corrections improved printability. The final 3D-printed model accurately reproduced the lighthouse's geometry, confirming the potential of this approach for cultural heritage preservation. Future prospects include the use of AI methods such as Gaussian Splatting for automated gap filling and higher-quality 3D archiving.

Keywords: LiDAR, RTK-GNSS, modeling, 3D printer, archive

1. はじめに

近年、LiDAR スキャナや RTK-GNSS を活用した測位技術の進展により、地形や建築構造物を高精度に三次元化することが可能となってきた。これらの技術は測量や土木分野をはじめ、文化財の保存や都市計画、さらには観光資源のデジタルアーカイブなど幅広い分野での応用が期待されている。しかし、取得したデータはデジタル空間上での解析や可視化にとどまる場合が多く、物理的な立体モデルとして活用される例はまだ少ない。3D プリンターを用いた出力は、直感的な理解を可能にし、教育的利用や地域の文化財や建築物の魅力を広く伝え、災害時の復元検討などにも寄与する可能性を持つ。本研究では、神奈川県藤沢市江の島にある灯台「シーキャンドル」を対象に、LiDAR スキャナで取得した点群データを用いて三次元モデルを生成し、3D プリンタにより実体化する一連の流れを示し、その有効性について検討する。

2. 実験方法

本研究では、Fig.1の江の島シーキャンドルを対象として、ハンディ型 LiDAR スキャナ FJD Trion S1 を用いてスキャンを行った。



Fig.1 Enoshima Lighthouse "Sea Candle"

同機は SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 方式に基づき自己位置を推定しながら点群を生成するが、累積誤差による歪みが課題となる。

そこで位置精度の補正には RTK-GNSS アンテナ FJD Trion V10i を用い, docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービスに常時接続した場合と未接続の場合とを比較した. 経路は蓄積誤差を抑えるためループ経路とし, 始点と終点を重ねるよう計画した. また, オプションの 360 度カメラ (Insta360) を装着し, 点群に色情報を付与した. スキャンの様子を Fig.2 に, 使用した機器を Fig.3 に示す.



Fig.2 Photograph showing the measurement process of 3D scanning using a handheld LiDAR and RTK-GNSS



Fig.3 The equipment used for 3D scanning and the 3D software

取得データ (fjdslam ファイル) はまず Las 形式に変換し, Cloud Compare にてノイズ除去およびダウンサンプリングを行い, 処理効率の向上と形状保持のバランスを図った. その後, FJD Trion Model により点群からメッシュを生成し, 生データに含まれる欠損やノイズを解析可能な形式に変換した. スキャン時の死角による欠落部分は Autodesk Revit により再現した. さらに, スライサーソフト「Anker Make Studio」を用いて各点を XY 方向に微小に拡張し, 点群の隙間を補正した. 完成したモデルは STL 形式に変換後, スライス処理を経て FDM 方式 3D プリンタ Anker Make M5 により出力した.

3. 実験結果

取得した点群データに対して RTK-GNSS 補正を適用した結果, フィックス率は屋外および屋内を含め約 51% であった. RTK 常時接続時 (Fig.4a) には歪みやねじれがほとんどなく, 安定した点群が得られた. 一方, RTK 未接続時の点群 (Fig.4b) では構造物全体に傾斜や歪みが生じ, 特に内部のらせん階段部分で大きな破綻が確認された.

ヘルムート変換によるコントロールポイント (CP) C の場所を Fig.5 に示す.

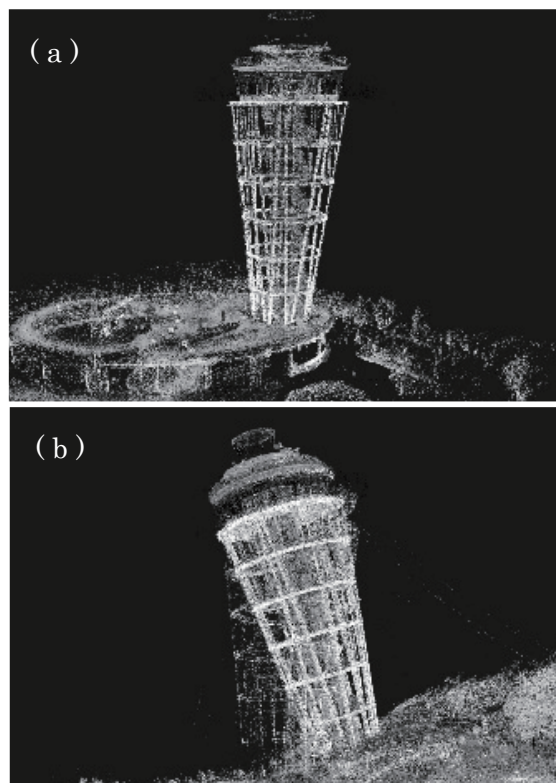


Fig.4 Point cloud data of “Sea Candle” Lighthouse (a) With real-time RTK connection, (b) Without RTK connection

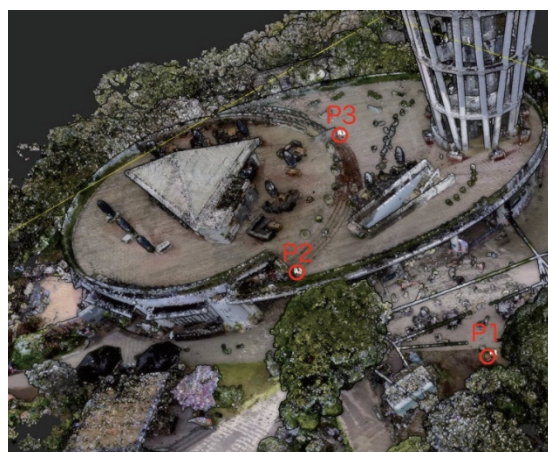


Fig.5 Location of control points on the map

この変換では、Table.1に示すように変換の誤差のRMSは約 0.06 m (6 cm) となった。

Table.1 Comparison with CP using Helmert transformation.

LiDAR				
CP	X (E) [m]	Y (N) [m]	Z (H) [m]	
P01	-32255.400	-77613.672	97.770	
P02	-33250.664	-77631.244	102.527	
P03	-32266.486	-77642.348	102.450	

RTK				
CP	X (E) [m]	Y (N) [m]	Z (H) [m]	偏差 [m]
P01	-32255.397	-77613.754	97.77	0.051
P02	-32250.686	-77631.408	102.527	0.083
P03	-32266.386	-77642.396	102.45	0.050

RMS (Root Mean Square) :		0.06331	m
		6.33086	cm

点群処理においては、CloudCompare でノイズ除去とダウンサンプリングを実施し、処理効率と精度保持のバランスを確保した。さらに、取得データから生成したメッシュは当初隙間が多く、直接の造形には困難であったが、Anker Make Studio による XY 方向の補正処理および印刷パラメータの調整により、安定したメッシュへと改善できた。展望デッキ上部など LiDAR の死角部分については Autodesk Revit により再現した。3D プリントは FDM 方式で印刷し、サポート材を使用せずとも安定した造形が可能であった。最終的にプリントされた模型は、Fig.6に示す。



Fig.6 3D model of Enoshima Sea Candle derived from 3D point cloud data obtained via handheld LiDAR scanning

このように、江の島シーキャンドルの特徴的な外観を忠実に再現しており、LiDAR データを活用した建築物モデル化および物理的アーカイブの有効性が確認された。また、RTK による位置補正が建物や周辺地形の座標精度向上に寄与することも明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、LiDAR スキャナと RTK-GNSS を組み合わせることで江の島シーキャンドルの点群を取得し、3D プリンタによる模型を作製した。RTK 常時接続は累積誤差の抑制に有効であり、安定した三次元データの取得に寄与した。また、Cloud Compare による前処理と Revit による欠損補完を組み合わせることで、造形可能な 3D モデルを得ることができた。今後は、近年注目される Gaussian Splatting をはじめとする AI 技術の導入により、より高品質な 3D アーカイブや自動的な欠損復元が可能になると期待される。これにより、文化財や建築物の忠実な保存・復元、さらには地域資源の教育・観光への応用が一層促進されることが考えられる。

参考文献

1. 谷藤 尚斗、長谷川 忠大、井筒 駿介、油田 信一「Project PLATEAUの3D都市モデルを活用したLiDARスキャンマッチングとRTK-GNSSを用いたシームレス切替自己位置推定システム」日本ロボット学会誌 (2025年5月14日)
2. 中川 雅史、阿部 慎二郎、佐怒賀 翔、齋藤 一男、三代 雅博「RTK-GNSS測位と幾何制約によるLiDARスキャンマッチング」応用測量論文集 第31巻 89-98頁 (2020年)
3. 岩田悠希 熊坂憲広、武井琉奈、星野龍彦、蔵部 光一郎、内田孝幸「LiDARを用いた歴史的建築物、自然遺構の3Dアーカイブスの作製」日本写真学会 2025 年度 年次大会 講演要旨集
4. 熊坂憲広、阿部千奈乃、小林祐貴、岩田悠希、内田孝幸「IoT 高精度 GNSS 位置情報とLiDAR を用いた色付き点群・3D モデルの検討」日本写真学会 2024 年度 年次大会 講演要旨集

布と3D プリントによる有機形状型枠の開発

Development of Organic Formwork using Fabric and 3D Printing

汪 明靖¹, 河合 慈英², 鳥居 巧¹, 矢田 美涼¹, 谷口 朝洋¹, 松岡 康友³, 田中 浩也²

Minchin WANG¹, Jiei KAWAI², Takumi TORII¹, Misuzu YADA¹, Tomohiro TANIGUCHI¹,

Yasutomo MATSUOKA³, Hiroya TANAKA²

¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学, ³株式会社 DigitalArchi

¹Graduate school of Keio University, ² Keio University, ³ DigitalArchi Co., Ltd.

【要約】

布への3Dプリンティング技術は、単なる視覚的な装飾を超え、布の動的な特性と3Dプリントの精密さを組み合わせることで、4Dプリンティングの一種として、新しい形態変化を創出する研究が注目されている。本研究では、立体的な曲面テキスタイルを生み出す手法で布型枠を制作し、コンクリートを用いて制作した布纏材を提案する。有機的な形態を持った立体的な構造を fabric casting の手法に応用し、布の緩やかな形状を転写したコンクリート表面の形成が可能となった。造形的に新たな表現手法としての展開が期待される。現段階では、コンクリート表面の凹凸が雨水を垂直方向に保持する機能を持つ応用事例も紹介する。

キーワード: ストレッチ素材, 3D プリント, 布, ファブリックキャスティング, 型枠

【Abstract】

Research on 3D printing technology for fabrics is gaining attention as a form of 4D printing. It goes beyond mere visual decoration, combining the dynamic properties of fabric with the precision of 3D printing to create new forms of shape transformation. This study focused on the practicality of this technology as a formwork and produced prototypes. Applying the fabric casting technique to create three-dimensional structures with organic forms enables the formation of concrete surfaces that transfer the gentle shapes of the fabric. These holds promise for developing new sculptural expression methods. At the prototype stage, we explored the potential for utilizing the unevenness of the concrete surface to retain rainwater vertically.

Keywords: stretch fabric, 3D print, textile, fabric casting, formwork

1. 序論

近年、デジタルファブリケーション技術の発展に伴い、布と3Dプリントを組み合わせた立体造形技術が注目されている。特に、従来の平面的なテキスタイル表現に対して、布の物性を活かした立体的な造形が可能であり、ファッション、インテリア、プロダクトデザインなど多様な領域で応用が検討されている。

布に3Dプリントする技術とは、ストレッチの素材をあらかじめ引き伸ばして固定した状態で、その上に直接、ロッドを3Dプリントする。印刷後、固定を解除すると、布の元の状態に戻ろうとする収縮力と、ロッドがその収縮に抵抗する力が均衡し、独自の有機的な形態を持った立体的な型枠が自然に形成される。この手法では、4Dプリンティングの一種として、新しい「動き」を実現するための研究が主流となっている。

本研究は、布に3Dプリントする技術をさらに一歩進め、布を単なる「面」としてではなく、「型枠」としての実用性に注目した。具体的には、fabric casting の手法に応用し、布が持つ有機的な形状をコンクリートの剛性と組み合わせる。このアプローチにより、従来の技術では難しかった独自の有機的な形態を保ったまま、布の繊細なテクスチャをコンクリート表面に転写することに成功し

た。これにより、視覚的な美しさと構造的な強度を両立させた、新たな質感の表現を可能にした。

2. 関連研究

2-1. 布と3Dプリンティング

Diana らは、布と3Dプリントポリマーの組み合わせが、プロトタイプから手の装具へと移行する際に、耐久性といった課題に直面すると述べていた[1]。3Dプリントポリマーがテキスタイル上の耐久性を向上させるには、両者の組み合わせを最適化する必要がある。また、3Dプリントポリマーを繊維製品にアイロンをかけることで、接着強度が向上するといった点も言及されていた。

2-2. 布型枠(Fabric casting)

Fabric casting は Fabric formwork[2]としても知られる、流動性がある素材(石膏、コンクリート、土など)を流し込む型枠に柔軟な布を使用する造形技術の一種である。この技術は、伝統的な木材や金属の硬い型枠とは異なり、素材の流動性と、布の柔軟性や引張力を利用して、従来の工法では困難だった有機的で曲面的な形状を創り出すことができる。

2-3. コンクリート

建築家ポール・ルドルフ[3]はコンクリートに対する表

現仕方を研究してきた。そのうちの一つの作品はイエール大学の芸術・建築学科棟の壁がある。この壁は、コンクリート表面の隆起した畝をハンマーで削ることで、コーデュロイ効果(corduroy effect)[4]と呼ばれる独特な質感が生まれる。この手法は、コンクリートの表面を面白く見せるだけでなく、汚れを目立たなくし、特有の変色を最小限に抑える効果もあると言われていた。

また、建築家ジョン・パートリジらは、当時、窓台から雨水が落ちることで汚れが避けられない要因となると考えた。これを防ぐため、従来のものとは全く異なる形の「フード付き」窓を考案した。この方法は、表面を流れる雨水を斜めに誘導し、外観が汚れるのを防ぐためのものであった。

3. 目的

本研究では、前章の領域を横断し、布と 3D プリントポリマーを組み合わせた布型枠を用いてタイルを製作することを提案する。このタイルは、コンクリートに転写されることで生まれる細かな凹凸によって、新たな質感を表現する。本研究の目的は、布型枠からコンクリートへ転写される独自のテクスチャに着目し、この表面のテクスチャが水を垂直方向に保持し、水の流れを作る機能を持つ可能性があるという仮説を立て、これを検証する。

4. 布型枠製作

独自のテクスチャを表現できる型枠を制作するため、制作プロセスは Fig1 に示すように一連のプロセスを実行した。

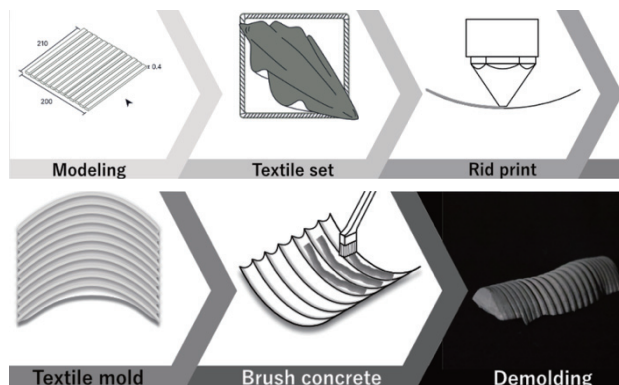


Fig1. Fabric formwork and concrete pouring process

4-1. モデリング

3D プリンタの精密な制御性を活かしつつ、平面なロッドをデザインすることに重点を置く(Fig2)。従来の 3D プリンティングのように立体的な造形物を作るのではなく、布の表面に描かれた 2D パターンが、後工程で立体的な形状を生成するための「設計図」となる。

様々なパターンや密度のロッドを配置することで、プリント後の布の収縮力とロッドの抵抗力の間に、多様な力で均衡を生み出す。これにより、布とロッドの相互作用から生まれる有機的な曲面を創出することが可能となる。このように、本プロセスにおけるモデリングは、最終

的な立体物を直接造形するのではなく、2D パターンが持つ潜在的な形態生成能力をデザインすることにある。

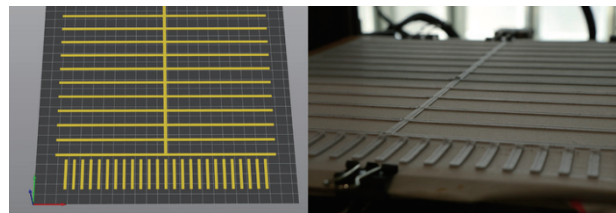


Fig2. Flat rod design

4-2. 3D プリントの改造と布の設置

市販の卓上 3D プリンタ (Creality Ender 3) を改造し、材料を布に物理的に接着させる方法を採用した。この手法は、低速での押し出しやノズルの低い位置での調整が必要だが、布の伸縮性を維持し、最終的な形状の変化に反映させることができる。この手法の実現にあたり、以下の 2 点の改良を行った。

4-2-1. プリンタベッドの変更

布への直接接着にはベッドの加熱が不要なため、従来のヒートベッドを撤去し、より薄い木材のベッドに交換した。これにより、ノズルの位置を下げることで、布の表面に正確に押し出すことが可能になった。

4-2-2. 布固定器具道具の製作

布をあらかじめ伸縮させた状態で固定するため、専用の固定道具を製作した。この道具は、直径 10mm の螺旋状の金属棒を曲げて枠状にしたもので (Fig3)、布を引っ掛けやすくした。さらに、印刷中に布が外れるのを防ぐため、ダブルクリップで補強する工夫を施した。布は「すっきりポンチニット」を使用した。

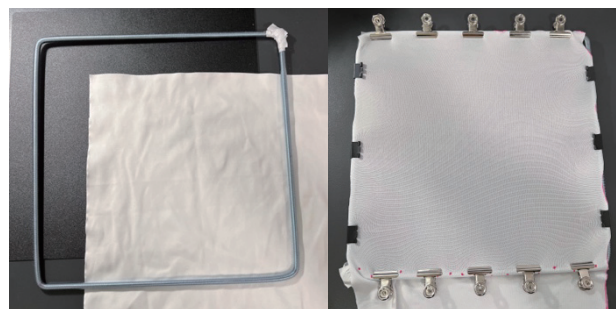


Fig3. Metal fabric retainer

4-3. 3D プリント

3D プリントのデータ準備には、スライサーソフトウェアの「PrusaSlicer」を使用し、主に PLA と TPU を材料として使用した。本研究の手法は、布に材料を直接押し付け、接着させるため、印刷の成否は以下のパラメータに大きく左右される。

4-3-1. 押し出し率 (Extrusion Multiplier)

布地にフィラメントをしっかりと定着させるため、通常よりも高い押し出し率 (1.2-1.5) を設定した。これにより、ノズルから出る材料が布の繊維に深く食い込み、強固な接着が可能となる。

4-3-2. 最初の積層速度 (Initial Layer Speed)

印刷開始時の速度を低速に設定した (5-10mm/s)。これは、ノズルが布に触れる際の衝撃を抑え、材料が滑

ることなく、確実に第一層を形成させるためである。

これらの設定を検証・調整することで、布の伸縮を妨げない、柔軟でかつ強固なロッドを形成することができた。印刷が完了したら、造形物がわずかに冷えるのを待ってから、固定していたダブルクリップを外す。すると、引き伸ばされた布が収縮し始め、ロッドと布の自己均衡によって、目的とする立体的な型枠が自然に完成する。

4-4. 布型枠の試作とコンクリートの打設

布型枠にコンクリートを流し込む際、一度に大量の流動性の高い混合物を入れると、コンクリートの重みで型枠が変形し、意図したテクスチャが損なわれる。この問題を解決するため、本研究ではブラシを用いて、コンクリートを一層ずつ塗り重ねる手法を採用した。(Fig4)



Fig4. Apply a thin layer of paint to the surface of the fabric form with a brush.

4-5. 離型

最終工程では、固化したコンクリートから布型枠を慎重に剥がす。この時、布型枠に施された繊細なテクスチャがコンクリートの表面に忠実に転写されていることを確認する。

本研究で用いる布型枠は、一度の使用で廃棄される従来の型枠とは異なり、剥がした後に再利用できるという特徴を持つ。これにより、多様なテクスチャのプロトタイプを効率的に制作することが可能となり、材料の無駄を削減できる。この工程を経て、布の有機的な表情とコンクリートの剛性を併せ持つ、独自のデザインを持つ構造体が完成する。

5. 成果物

本研究の制作手法は、布型枠がコンクリートを柔らかく「纏う」ことで、布の持つ繊細なテクスチャをコンクリートに転写する新しいアプローチを可能にした。この特性から、私はこの技術で制作された布型枠を布纏材(ふてんざい)」と命名した。

この方法を用いたコンクリート成果物は、2024 年 11 月に慶應義塾大学湘南キャンパスにて開催された展示会で初めて公開し、8 種類の異なるテクスチャを持つ作品を制作した(Fig5)。中でも波のような形状を持つテクスチャは、見る人に豊かな質感を伝えることができた。このテクスチャは、水との組み合わせることで、また別の表情を見せることができた。

5-1. 水との可能性

布纏材で制作したコンクリートの表面テクスチャは、水に触れると独自の微細な表現を見せる。多くの水は

テクスチャの谷に沿って流れ、余分な水は Fig7 のように、テクスチャの隙間に垂直方向に滞留する現象が観察された。乾燥時とは異なり、このコンクリートが水に付着する際に隙間に溜まる水たまり(Fig8)がテクスチャに変化して、意図せぬ表情を生み出すことができる。

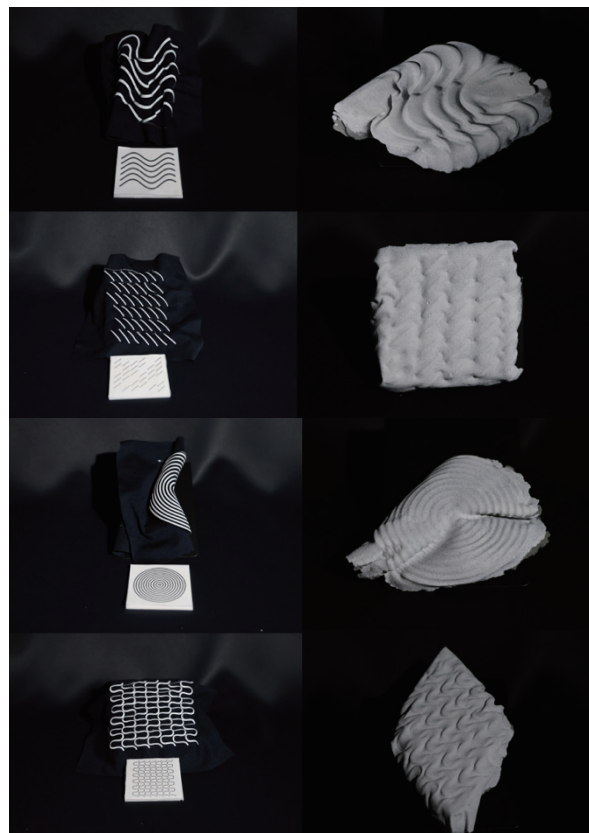


Fig5. Part of the concrete prototypes on display

5-1-1. 水の流れ

打ちっばなしコンクリート(Fig6)は、雨の日には濡れた部分が比較的濃い色になり、汚れて見えることがある。しかし、布纏材で制作したコンクリートは、テクスチャの効果で汚れが目立ちにくくなる。凹凸のあるテクスチャの中を流れる水は、コンクリートに動きのある質感をもたらす。



Fig6. Water flow on the surface of exposed concrete

5-2. 光との可能性

波状のテクスチャは、表面に水が付着することで、光の当たり方によって多様な表情を見せる。布の細かいテクスチャまで転写されているため、水が付着しやすくなる。水が染み込んでいる部分と乾いた部分の間で、テク

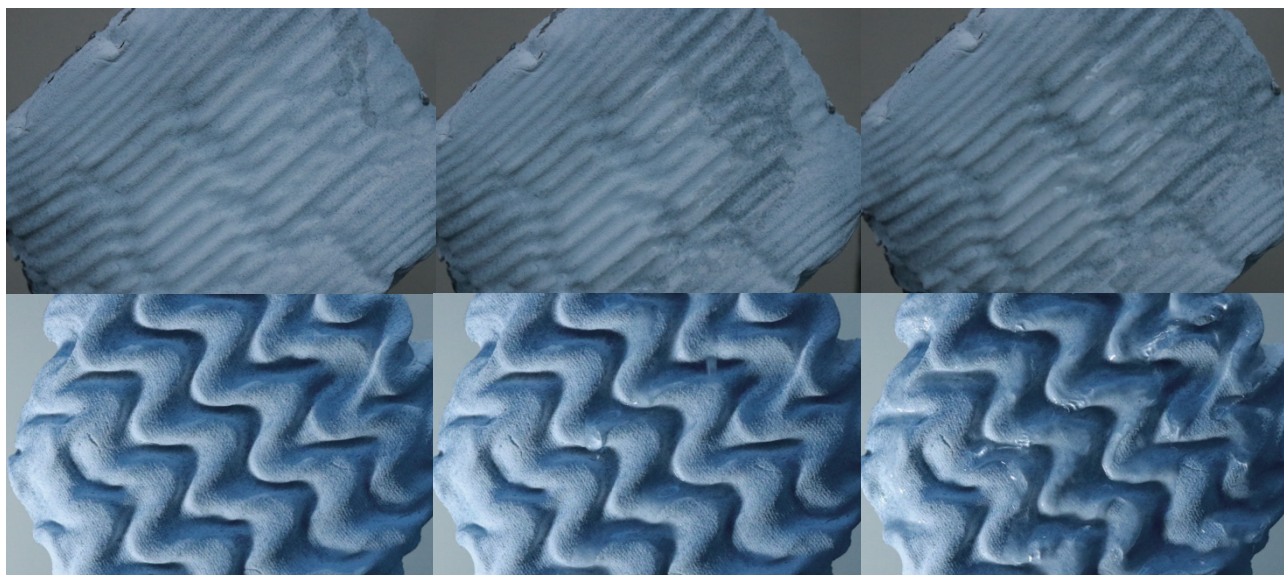


Fig7. Texture splits and divides the water flow into multiple streams

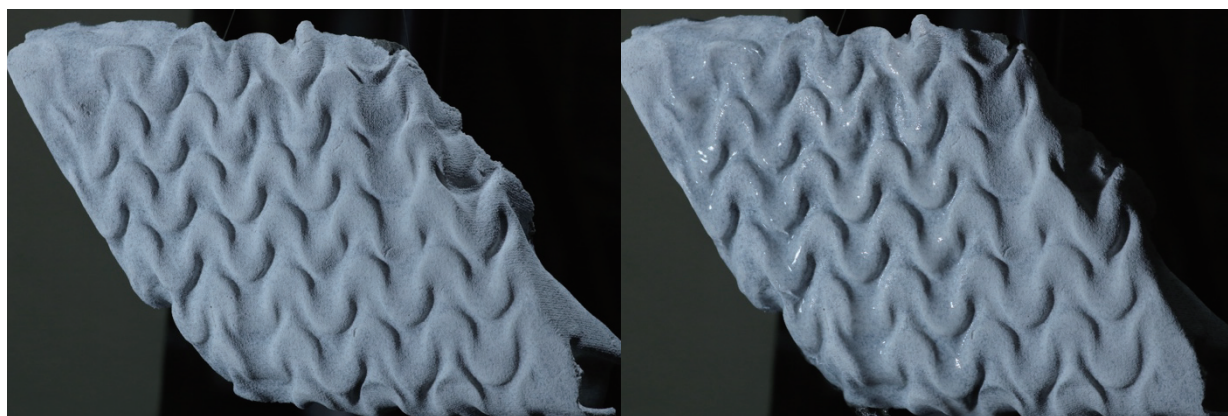


Fig8. Dry and wet fabric-wrapped concrete

スチャが持つ立体感や奥行きがより強調され、色の濃淡が際立つ。光や水といった自然要素と協調することで、コンクリートの質感を豊かにし、新たな表現の可能性を示している。

6. 結論

本研究は、布に3Dプリントする技術をFabric castingに応用することで、布の柔軟性と3Dプリントの精密な制御性を組み合わせた新しい布型枠を制作した。これにより、従来の型枠では実現が困難だった、微細かつ有機的なテクスチャを持つコンクリートの造形に成功した。

成果物の中でも、特に波状のテクスチャは、その複雑な凹凸が豊かな質感を与え、注目を集めた。この特性に着目し、今後はコンクリートと水との相互作用に焦点を当てた研究を進めている。布型枠で制作されたテクスチャが、水を有効に保持したり、意図した通りに流れを制御したりする機能性の開発が今後の課題である。

タイルのような一面的な造形は可能である一方、多面体において複数のテクスチャを同時に造形することを、将来的な目標の一つとしている。

謝辞

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

参考文献

1. Diana Popescu, Cătălin Gheorghe Amza. “3D Printing onto Textiles: A Systematic Analysis of the Adhesion Studies”. 3D Print Addit Manuf. 2024. (参照:2025.9.3).
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11057686/>.
2. Alan Chandler, Remo Pedreschi. “Fabric Formwork”. RIBA Publishing. 2007. (参照: 2025.9.3).
[https://repository.uel.ac.uk/download/0e6d3a56953f51ca476b3cf09aac35647c4a933b154ce382de80d616e72295ba/4774282/Chandler%2C A \(2007\) Fabric Formwork.pdf](https://repository.uel.ac.uk/download/0e6d3a56953f51ca476b3cf09aac35647c4a933b154ce382de80d616e72295ba/4774282/Chandler%2C%20A%20(2007)%20Fabric%20Formwork.pdf).
3. Tony Monk. “Paul Rudolph Philosophy”, Paul Rudolph Institute for Modern Architecture. (参照: 2025.9.3).
<https://www.paulrudolph.institute/paul-rudolph-philosophy>
4. Kouichi Yasuda. “On the Material in Modern Architecture: Tradition and Innovation”. 『10+1』 No.43 .2006. (参照:2025.9.3).
<https://db.10plus1.jp/backnumber/article/articleid/1297/>

教室を越境する学び ―ファブリケーションで拓く生徒の未来―

Learning Beyond the Classroom: Empowering Students' Future through Fabrication

山本 周

Shu Yamamoto

¹聖学院中学校・高等学校, ²学校法人聖学院教育デザインセンター

¹Seigakuin Junior & Senior High School, ²Seigakuin Education Design Development Center

【要約】

本校では、6 年間を通じて「デジタル×アナログなものづくり」を軸に据えた教育を展開している。デジタルファブリケーションエリアを拠点に、情報プログラミングや STEAM 探究での制作、中高混合チームによる GIL・GIT 活動、さらに地域や大学・企業との協働を通じ、学年や教科、学校の枠を越える実践を積み重ねてきた。特に 3D CAD を用いた 3D モデリング教材開発、空間デザイン (CO-SHA プロジェクト)、3D スーパーサイエンスプロジェクト採択などは、生徒の創造的自己効力感を高め、主体性・キャリア観の変容を促した。本研究では、これらの実践を「教室を越境する学び」と位置づけ、その教育的効果と社会的意義を論じる。

キーワード: デジタルファブリケーション, STEAM 教育, キャリア教育, 探究学習, 社会連携

【Abstract】

This study reports on a six-year educational program at Seigakuin Junior and Senior High School that integrates digital and analog fabrication. Anchored in a digital fabrication space, students engaged in programming, STEAM-based projects, and mixed-grade collaborations through the Global Innovation Lab (GIL) and Global Innovation Technology (GIT). External partnerships with universities, industries, and local communities enabled practices that transcended classroom and school boundaries. Notable initiatives included the development of 3D CAD teaching materials, the CO-SHA spatial design project, and participation in the 3D Super Science Program. These experiences enhanced students' creative confidence and reshaped autonomy and career perspectives.

Keywords: Digital Fabrication, STEAM Education, Career Education, Inquiry-Based Learning, Community Engagement

1. 序論

近年、DX 時代の教育において「つくる力」の重要性が一層高まっている。高等学校 DX 加速化推進事業(通称:DX ハイスクール)や、メイカームーブメントの広がり、Papert による構築主義の理論は、学習者が自ら試行錯誤を重ねるプロセスを通して知を構築することの意義を強調してきた。特にデジタルファブリケーションは、創造と表現を伴う実践を支える環境として注目されている。さらに、食用 3D プリンタによる食品加工や建築用 3D プリンタによる住宅建設といった応用も進み、ものづくりの産業構造そのものが変容しつつある。文部科学省「教育課程企画特別部会 論点整理(素案)」では、デジタル基盤を活用した学びや質の高い探究の実現が次期学習指導要領の重要な柱として示されている(文部科学省, 2025)。このような社会および技術の変化を背景に、次世代のイノベーションを担う人材育成が急務とされており、教育現場でもその対応が求められている。しかし、日本の中等教育においては、3D プリンタやレーザーカッターなどのデジタル工作機器を授業に体系的に導入した事例は依然として少なく、教育実践の積み重ねが求められている。加えて、学年や教科、授業と課外といった枠を越え、学びを横断的に設計する視点が十分に確立されていないことも課題である。

そこで本稿では、聖学院中学校・高等学校において

2019 年度以降展開してきた 6 年間の実践を「教室を越境する学び」と位置づけ、その教育的効果と社会的意義を明らかにすることを目的とする。

2. 実践の背景と環境整備

学校の理念と教育方針

聖学院中高は「生徒主体の学び」を基盤に、STEAM 教育や探究学習の充実を重視してきた。ICT 活用を含む学習環境の整備により、個々の生徒が主体的に課題に向き合い、協働的に解決を試みる学びを推進している。

ファブラボの整備

2021 年度には、校内にデジタルファブリケーションエリア(以下、ファブラボ)を開設した。ここには、3D プリンタ、レーザーカッター、各種 PC 環境が整備され、授業・課外活動を問わず、生徒が自由に利用できる基盤を構築した。ファブラボは単なる設備ではなく、アイデアを具現化し、試行錯誤を繰り返す実験的な学び、さらに異学年が交流する場として機能している。

授業と接続した取り組み

中学校段階では中学 1 年生の「情報プログラミング」の授業において TinkerCAD などのツールを用いた基礎

的な3Dモデリングを実施し、オリジナルのキーホルダーやクリスマスオーナメント、ピクトグラム制作に挑戦している。高校段階では「STEAM」「探究」を中心にレーザーカッターを活用した空間デザインや感覚表現に取り組み、表現活動を探究型の学習へと発展させている。

探究科目・課外活動との連動

加えて、学年を越えて取り組む探究活動として Global Innovation Lab (以下, GIL) や、課外有志活動 Global Innovation Technology (以下, GIT) が設置されている。これらは短期集中プロジェクト型の制作や、外部イベントへの出展・小学生向けワークショップ運営など、学びを社会へ接続する実践の場となっている。

3. 実践内容

本校では、6年間を通じて「デジタル×アナログなもののづくり」を軸に据え、授業・課外・外部連携を組み合わせた教育を展開している。中学段階では「情報プログラミング」において TinkerCAD 等を用いた基礎的な3Dモデリングを学び、クリスマスオーナメントやキーホルダー、ピクトグラム制作に取り組む。さらに GIL では、異学年混合チームによる短期集中プロジェクトを通じて、ロボットや未来型道具などを発想・試作し、協働的な制作体験を積む。高校段階では、STEAM や Project Week においてレーザーカッターを活用した空間デザインや感覚表現に挑戦し、発表会で成果を社会に発信する。また課外活動 GIT では、小学生向けワークショップの運営や外部イベントへの出展を通じて、学内で培ったスキルを地域へ還元している。

さらに2024年度からは GIC の独自科目 Project 内に新たな「新ゼミ」を立ち上げた。このゼミは「自由闊達にして愉快なる価値創造」を理念に掲げ、失敗や挑戦を価値ある学びと捉える実践を重視する。武蔵野美術大学やガイアックス、日立産総研との協働プロジェクト、FAB QUEST 体験講座、SusHi Tech Tokyo 2025 参加

年度	学年	実践内容	活動形態	外部連携・成果	その他
2021~	中1	情報プログラミング：3Dモデリング入門 (TinkerCAD)、オーナメント制作	授業	校内導入期	週1コマ (年間35回程度)
2021~	中1	GIL: ものづくりの入り口 (ロボット・未来の道具制作)	探究 (短期PBL)	学内発表会	学年の約3割参加、情報プログラミングと接続
2021~	中2~3	GIL (年間15回、学年の約2割参加)	探究 (短期PBL)	学内発表会	年間15回実施
2021~	中学	3Dスーパーサイエンスプロジェクトに3名採択	課外研究	大学研究者との共同研究	選抜制
2021~	高1	STEAM探究：レーザーカッターによる空間デザイン	授業	ファブラボ開設	週3 (6コマ) 実施
2021~	中1~高3	GIT活動開始：校内勉強会、小学生向けワークショップ運営、外部発表	校内、課外	地域イベント出展	週1任意参加、非同期活動、不定期イベント企画・参加
2021~	高校	Project Weekでの社会課題解決型作品制作	探究	外部発表 (Science Agora 等)	週1 (2コマ) 実施 選択制ゼミ
2023	高校	CO-SHAプロジェクト (校内ラウンジ空間デザイン)	STEAM探究	校内波及、企業 (コクヨ)・地域連携	チーム制作中心
2024	高1	Fusion360によるUSBコードリール設計 → 図学会受賞	個人探究	日本図学会コンテスト	生徒主体の個人探究
2024~	高校	新ゼミ立ち上げ：「自由闊達にして愉快なる価値創造」を理念に活動	探究	武蔵美・ガイアックス・日立産総研等と協働、SusHi Tech Tokyo 2025参加	週1 (2コマ) 実施 選択制ゼミ
2025	中1~高3	大正大学 新設情報科学部 3Dスキャナワークショップ	高大接続	大正大学と連携	3Dスキャン×3Dプリンタ
2025	中1~高3	3Dプリンターの最先端を知る！ (外部講師による講演会)	講演・実習	未踏IT人材発掘・育成事業にも採択された研究者との連携	数学×プログラミング×モデリング

表 1.6 年間での主な取り組み

など、多様な外部連携を取り込んだ活動を展開しており、従来の授業や課外活動を超えた新たな学びの場を形成している。

4. 代表的な取り組み

これまでの実践の中でも、以下の取り組みは特に「教室を越境する学び」を体現する事例である。

(1) Fusion360 による教材開発と受賞

高1生徒が主体となってUSBコードリールを設計し、日本図学会「高校生デジタルモデリングコンテスト」で審査委員長賞を受賞した。単なる作品制作に留まらず、初心者でも高度な設計を楽しめる教材化を意識した点が評価され、学内外の学習資源として波及した。



図 1. 高1生徒が制作したUSBコードリール

(2) CO-SHA プロジェクト (空間デザイン)

校内ラウンジを対象に、図書館とファブラボを接続する新たな学習空間を生徒自身が設計した。家具配置やレイアウトを提案する過程で外部企業 (コクヨ) と連携し、利用者視点のプレワークショップも実施。ものづくりそのものと学習空間そのものを「つくる」越境の実践であった。参加した生徒の中にはものづくりには空間づくりも重要ということに気がつき、建築系にも興味を持つなどキャリアの一助にもなった。



図 2. 校内に生徒がデザインした空間内でのワークショップの様子

(3) 3D スーパーサイエンスプロジェクト

高校生3名が外部団体に採択され、大学研究者とともに3D技術を用いた海洋研究に従事した。高度な専門知と出会うことで、科学技術による社会課題解決への意欲が醸成され、キャリア観の変容が見られた。

(4) 新ゼミの立ち上げ

従来の授業・課外をさらに拡張する形で誕生した新ゼミは、異分野・異領域との接続を前提とした越境型の学びを実現している。特に、美術大学や企業・研究所との協働は、生徒に「ものをつくる」だけでなく「社会に価値を創出する」という視点をもたらした。

(5) 3D プリンターの最先端を知る

未踏 IT 人材発掘・育成事業にも 3D プリントブリプロセッサの開発で採択されている研究者を講師として招いた講演・実習会。経験者向けと一般向けの二部構成で、数式・プログラミングを用いた G-code 生成 (G-coordinator ソフトウェア) の紹介と、実際に生徒が 3D プリンターを使ってプログラム-造形を体験。数学 (sin, cos, ラジアンなど) とコード制御がどのように造形美や構造に影響するかを学び、興味を喚起するとともに「数学が教室の外でも役立つ」と参加生徒から実感を得た。

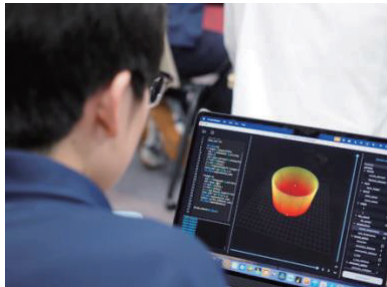


図 1. プログラミングで図形をモデリング

これらの事例はいずれも、生徒の創造的自己効力感を高めると同時に、社会的実装やキャリア形成に直結する経験となっており、ファブリケーション教育の教育的効果を具体的に示すものである。これらの事例と教育的効果を整理し、体系的なスキルマップとして筆者は次のようにまとめた。

レベル	モデリングスキル	3Dプリンタ活用	レーザーカッター活用	探究・評価スキル	聖学院での実践
入門	・Tinkercadで立方体・円柱を配置・編集 ・基本型を組み合わせて簡単な立体を作成	・STL出力とプリンタ読み込み ・教員補助で基本的造形	・サンプルデータによる単純カット体験	・安全ルールを理解 ・作品を説明できる	中1「情報プログラミング」選1オーナメント・キーホルダー制作
初級	・Fusion360で2Dスケッチ・押し出し・回転など基本操作 ・単純なパーツ設計	・造形条件 (積層ピッチ・サポート材) を理解 ・スライサーで基本設定	・Illustratorで線画編集 ・木材やアクリルの単純カット	・改良点を言語化 ・ポートフォリオ記録	GIL (中1〜中3: 学年2〜3期参加) ロボット・未来道具制作
中級	・パラメトリックモデリング ・複数部品の組み合わせ	・プリント失敗要因を分析・対応 ・材料特性の理解 (PLA, ABSなど)	・カット+彫刻の組み合わせ ・材料厚さ・強度を考慮した設計	・自己評価・相互評価 ・試作→改善→再出力	高1「STEAM探究」選3 (6コマ) CO-SHAプロジェクト (空間デザイン)
上級	・有機的形狀や複雑なセンブリ設計 ・シミュレーション・最適化設計	・複数素材・複数部品の一体造形 ・設計意図に応じた条件調整	・複数素材の加工・組み立て ・自作データで応用	・デザイン思考に基づく課題解決 ・成果発表・外部フィードバック活用	探究科目 (選1+2コマ) GIL (課外活動) 留学会受賞 (Fusion教材開発)
発展	・教材開発・後輩指導 ・社会実装に耐える設計	・新素材・新条件を研究的に活用	・共同制作プロジェクト進行	・社会的意義の評価 ・キャリア接続	新ゼミ (大学・企業連携) 3DスーパーサイエンスPJ採択ファブラボ講座・大学連携

図 2. 聖学院オリジナル体系的スキルマップ

本研究で示したスキルマップと実践事例は、次期学習指導要領で示された「教科や学年の枠を越える学び」や「情報活用能力の向上」の方向性とも合致しており、今後の制度的支援と接続して拡張可能である。

5. 教育的効果

本校におけるデジタルファブリケーション実践は、生徒の学びに多様な教育的効果をもたらしてきた。

5.1 創造的自己効力感の向上

Bandura の自己効力感理論に基づけば、成功体験の積み重ねは学習者の自己効力感を高める要因となる。本校の実践においても、3D プリンタやレーザーカッターを用いて「自分の手でアイデアを形にする」経験は、生徒に大きな達成感をもたらした。特に Tinkercad, Fusion360 教材開発やコンテスト受賞は、生徒に「やればできる」という確信を与え、創造的自己効力感 (Creative Confidence) の醸成につながった。

5.2 キャリア観の変容

実社会と接続したプロジェクトを通じて、生徒のキャリア観にも変化が見られた。3D スーパーサイエンスプロジェクトへの参加や企業・大学との連携活動では、専門家と協働しながら研究・制作を進める過程を経験した。これにより理工系進学への関心が高まっただけでなく、「ものづくりを通じて社会課題を解決する」という志向を持つ生徒が増えた。キャリア形成における学びの意義が、従来の教科学習を超えて拡張したことが確認できる。

5.3 協働とリーダーシップの育成

GIL や GIT, 新ゼミなどの場では、中高混合のチーム活動や小学生向けワークショップの運営を通じて、生徒が自然に協働とリーダーシップを学ぶ機会を得た。特に高校生が中学生や小学生を指導する場面では、ファシリテーション力や説明力が磨かれ、自己成長の契機となった。活動を本格的に始めた 2021 年度は 2 名の生徒とスタートしたが、2025 年度現在では 250 名 (全校の 1/4) の生徒が本活動のオンラインコミュニティに在籍し、アクティブに活動 (日々の活動や内外のワークショップ、学校説明会で受験生に説明) する生徒が 20 名ほどにもなった。また同法人の女子聖学院中高への波及は、DX ハイスクールの新規採択、学校横断的な学びの拡張を生み出し、協働の範囲をさらに広げた。

5.4 心理的安全性と挑戦意欲

新ゼミの立ち上げは、失敗を学びの資源と捉える姿勢を生徒に定着させた。挑戦的な試みが歓迎される心理的安全性の高い場が整備されたことで、生徒はリスクを恐れずにアイデアを実装し、社会的文脈に接続する経験を重ねている。

6. 考察

6.1 「越境」の意義

本研究で取り上げた実践は、いずれも「教室の枠を越える」学びを特徴としている。まず、学年を越える事例としては、中高混合チームでの GIL や新ゼミの活動が挙げられる。年齢や学年の差を超えた協働は、上級生による指導と下級生による新鮮な発想が相互作用し、学びの質を高めている。次に、授業と課外を越える事例として、STEAM や探究、情報プログラミングで得た知識を GIT や外部イベントで社会に還元する実践がある。さらに、学校の枠を越える事例として、女子聖学院中高や地域団体、大学・企業との協働を通じた活動が挙げられ、教育効果が校外にまで波及している。

6.2 学習科学的視点からの分析

これらの「越境」は、学習科学の理論とも整合している。Papert の構築主義は「自らつくることを通じた学び」を重視しており、ファブラボにおける制作活動はその典型例である。また、Edmondson らが提唱する心理的安全性の概念は、新ゼミにおける「失敗を恐れない挑戦」が成立

する背景として重要である。さらに, Johnson ら(2020)が指摘する即時フィードバックの有効性は, デジタル工作機器の試作・改善のサイクルに体现されている。

6.3 学校文化への影響

これらの実践は, 生徒個人の成長にとどまらず, 学校全体の文化形成にも寄与している。特にファブラボは「実験の場」として機能し, 生徒・教員・外部の多様なステークホルダーが集い, 学びを共創する場となった。例えば, 鉄道模型作成の部活に所属する生徒たちが模型の一部を 3D プリンタで作成した, また化学部の生徒が隣の生物部の生き物の住処が欲しいという要望を 3D プリンタで叶えた。従来の一方的な授業観から, 生徒主体の価値創造を尊重する文化への変容が進みつつある。

7. 今後の展望

本校におけるデジタルファブリケーション実践は, 生徒主体の学びやキャリア形成に一定の成果を挙げてきた。しかし, 今後はさらに以下の方向性を見据える必要がある。

第一に, 全国への普及と共有である。DX ハイスクール指定校としての役割を果たし, カリキュラムモデルや教材を公開することで, 他校におけるファブリケーション教育の導入を促進する。

第二に, 地域との接続深化である。北区を中心に展開している地域団体や企業と連携し, ファブラボを拠点とした「共創型プロジェクト」を推進する。特に J&L での取り組みを起点に, 地域課題解決に資する教育活動を展開することが期待される。

第三に, 産学連携の高度化である。これまでの大学・企業との連携をさらに発展させ, 社会課題を解決するための共同研究・共同開発に生徒が参画する仕組みを整える。実社会の文脈で価値を生み出す経験を通じて, 生徒は創造性だけでなく責任感や社会的視野を育むことができる。

8. 結論

本研究では, 聖学院中学校・高等学校における 6 年間のデジタルファブリケーション教育実践を「教室を越境する学び」として整理した。中高の授業や課外活動, 外部連携を通じた一連の取り組みは, 生徒の創造的自己効力感を高め, キャリア観や学習文化の変容を促す教育的効果を示した。特に, 学年・教科・学校の枠を越えて展開された事例(Fusion360 教材開発, CO-SHA プロジェクト, 3D スーパーサイエンスプロジェクト, 新ゼミなど)は, 従来の教室内学習を超えて社会と接続する可能性を拓いたといえる。今後は, 全国への普及, 地域との接続深化, 産学連携の高度化を通じて, ファブリケーション教育の社会的意義をさらに広げていくことが求められる。本研究は, デジタル×アナログを往還する学びのデザインが, 次世代の教育のあり方に示唆を与えるも

のである。

謝辞

本研究・実践は, 第 62 回(令和 5 年度)下中科学研究助成金の支援を受けて実施された「生徒と教員が織り成す共創の学びの場～デジタルファブリケーションで結ぶ未来への探究～」の一環である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1. S. Papert, Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas, Basic Books, 1980.
2. A. Bandura, Self-Efficacy: The Exercise of Control, W. H. Freeman, 1997.
3. A. Edmondson, “Psychological safety and learning behavior in work teams,” Administrative Science Quarterly, Vol.44, No.2 (1999), pp.350-383.
4. D. W. Johnson, R. T. Johnson, and K. A. Smith, Active Learning: Cooperation in the College Classroom, Interaction Book Company, 2020.
5. K. Masumori, H. Tanaka, “Voxel-based 3D Processing for 3D Printing,” NIP31 (2015), pp.285-288.
6. 文部科学省, 『高等学校学習指導要領解説 総合的な探究の時間編』, 2022.
7. 文部科学省, 『高等学校 DX 加速化推進事業(DX ハイスクール)』, 文部科学省公式 Web サイト, 2023.
8. 文部科学省, 教育課程企画特別部会『論点整理(素案)令和 7 年 9 月 5 日 資料 1 教育課程企画特別部会』, 文部科学省, 2025.

モジュール型空気圧供給システムとキンクバルブによる無電力ウェアラブルソフトアクチュエータ

Non-electric Wearable Soft Actuator with a Modular Pneumatic Supply System and Kink Valve

徳田 雄嵩¹, 楊 屹洲², 朱 佳昕², 山岡 潤一²

Yutaka TOKUDA¹, Yang YIZHOU², Jiaxin ZHU², Junichi YAMAOKA²

¹株式会社 KDDI 総合研究所, ²慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

¹KDDI Research, Inc., ²Keio University Graduate School of Media Design

【要約】

空気圧ソフトアクチュエータは、軽量性・柔軟性に優れ、身体を快適に補助するウェアラブルロボットの駆動技術として注目されている。しかし従来は、重く嵩張る空気供給装置や消費電力の大きい電動バルブを要し、省エネ性と携帯性が求められるウェアラブルデバイスとしての実用化に課題があった。本研究では、歩行動作から効率的に圧縮空気を供給するフットポンプモジュールと指先の微小操作で圧力を制御可能なキンクバルブモジュールを用いた無電力駆動のソフトアクチュエータを提案する。デジタルファブリケーション技術を用いた各要素技術の試作方法を紹介し、手指拡張アクチュエータおよびアームサポートアクチュエータを例に、身体補助デバイスの無電力駆動における有効性を示す。

キーワード: ソフトアクチュエータ, ウェアラブルデバイス, 無電力, キンクバルブ, フットポンプ

【Abstract】

Pneumatic soft actuators have gained attention as lightweight and flexible wearable robots that can comfortably support human body functions and enhance physical abilities. However, their practical application has been limited by bulky pneumatic supplies and energy-intensive electromechanical valves, which conflict with the requirements of portability and energy efficiency in wearable systems. To address this issue, we propose a non-electric wearable soft actuator that integrates a foot-pump module, which efficiently supplies air using walking motion, and a kink-valve module, which enables flow control with small finger movements. We present rapid-prototyping methods for these components and soft actuators using digital fabrication techniques and demonstrated their feasibility for non-electric body support devices through augmented finger actuators and arm-support actuators.

Keywords: soft actuator, wearable device, non-electric, kink valve, foot pump

1. 序章

空気圧ソフトアクチュエータは、近年ウェアラブルロボティクスの分野において、軽量性・柔軟性・安全性を兼ね備えた駆動源として注目されている。これまで主流であったモータや剛直なリンク機構を用いた外骨格型パワーアシストスーツは高い出力を発揮しながら精密な操作ができる一方、装着者への負担や動作の制約が課題となっていた。これに対して、ソフトアクチュエータはエラストマーやテキスタイルなどの軽量で軟らかい素材の伸縮性や曲げ性を活かし、柔軟に形状を変化させながら大きな駆動力を発揮できる。そのため、体に負担をかけることなく自然で快適な身体補強や運動支援が可能であり、リハビリテーションや日常生活支援など、幅広い応用が期待されている[1, 2]。しかし一方で、ソフトアクチュエータの駆動には、圧力源として重く嵩張るコンプレッサや電動ポンプなどの空気供給装置に加え、圧力制御に高エネルギーを要する電磁弁や電動弁、そしてバッテリーなどが必要であるため、省エネルギー性と携帯性が求められるウェアラブルデバイスとしての

実用化に課題が残っている。

ウェアラブルデバイスにおける持続可能なエネルギー供給を目指す研究として、身体運動を補助的なエネルギー源として活用する試みが進められている。人間の歩行に代表されるように、重力により繰り返し発生する力学的エネルギーは、電力や空気圧へと変換できる持続可能なエネルギー源として注目されている。例えば、摩擦帯電効果と静電誘導の原理を利用して歩行中に電力を生成する靴が開発され、補助機器の駆動への応用可能性が示されている[3]。また、靴に内蔵したエアポンプを踏むことで空気圧を蓄え、テニスラケットの素振り動作を支援する人工筋肉を駆動する手法が提案され、外部電源を必要としないパワーアシストデバイスの可能性も示されている[4]。さらに、テキスタイルを基盤としたエネルギーハーベスティング手法も提案されており、歩行によって蓄えた空気圧を利用して衣服に組み込まれたソフトアクチュエータを駆動する事で身体補助や身体拡張が可能である事が報告されている[5]。

従来の無電力ソフトアクチュエータは、低空気圧で駆

動する特殊な人工筋肉や、テキスタイルの複雑な加工を要し、試作する事が困難であった。また、空気圧制御に市販のメカニカルバルブが使われており、可搬性と装着性に課題が残っていた。本研究では、無電力ソフトアクチュエータをエアポンプ、エアバルブ、ソフトアクチュエータの3つのモジュールに分け、デジタルファブリケーション技術による各モジュールのラピッドプロトタイプリング方法とその特性を検証した。以降では、まず3Dプリンターとシリコンを用いた100 kPa以上の圧力を蓄積可能なフットポンプモジュールとその圧力供給能力を紹介する。次に、指の微小な動作によってチューブの屈曲を制御し、流路の開閉を可能にするウェアラブルエアバルブとして、キンクバルブモジュールを紹介する。最後に3Dプリンターと熱圧着伸縮生地を用いたソフトアクチュエータの試作方法を示し、各モジュールを統合して構成した手指拡張アクチュエータおよびアームリフトアクチュエータを例に、身体補助デバイスへの応用可能性を実証する。

2. フットポンプモジュール

2.1 エアポンプ

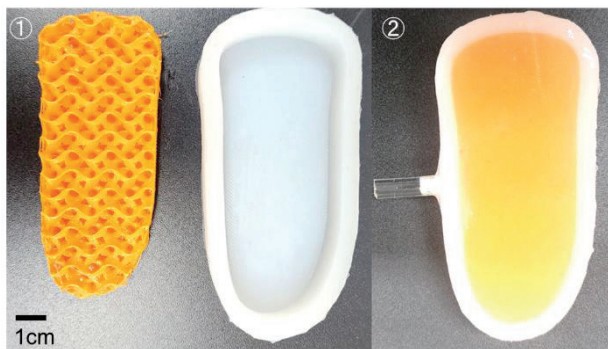


Fig. 1. Hybrid air pump integrating a 3D-printed elastic gyroid structure with an air-sealing silicone layer

フットポンプに内蔵するエアポンプを Fig.1-①に示すように、歩行時の衝撃荷重が集中しやすく、接地時間および接地面積が大きい踵から土踏まずにかけての後足部の形状を見立てて作製した。歩行動作から安定的に空気を供給するためには、歩行時に生じる不規則な荷重変動を吸収しつつ空気を圧縮し、さらに圧縮後には元の形状に還元しながら空気を取り込む柔軟性と弾性回復性を兼ね備えたエアポンプが求められる。そこで本研究では、Fig.1-②に示すように、応力分散特性と弾性還元特性に優れ、3Dプリントによる形成が容易なジャイロイド弾性構造をシリコンで密封したエアポンプを試作した。ジャイロイド構造はエアポンプ内部の空気充填スペースを考慮し、ショア A 硬度 95A の熱可塑性ポリウレタンエラストマー (Polymaker Polyflex TPU95) を充填密度 9% で 3D プリントし作製した (Fig.1-①左)。圧縮時の柔軟性を高めるため、外壁および下面のレイヤー数は 0 に設定した。ジャイロイド構造を内包する厚さ 5 mm のシリコン外壁は型を PLA で 3D プリントし、そこへショ

A 硬度 10 のシリコン (Dragon Skin 10 Very Fast) を注入することで作製した (Fig.1-①右)。さらに Fig.1-②に示すように、3D プリントしたジャイロイド構造とチューブコネクタをシリコン内部に固定し、同シリコンで上面およびチューブ差し込み口を密封することで、空気容量 37.8 ml のエアポンプを完成させた。

2.2 フットポンプ機構



Fig. 2. Foot pump module

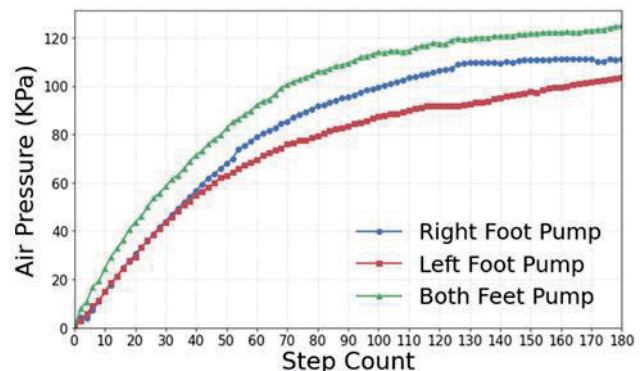


Fig. 3. Relationship between step count and air pressure generated by foot pump modules

作製したエアポンプを後足部に内蔵し、任意の靴と組み合わせて圧縮空気を供給可能なフットポンプモジュールを Fig.2 に示す。歩行動作における不規則な足圧を均一にエアポンプへ伝達するため、エアポンプと同形状のヒールを持つミッドソールを充填密度 100% の Polyflex TPU95A-HF で 3D プリントし作製した (Fig.2-①左図)。フットポンプのアウトソールは軽量性と衝撃吸収性を考慮し、Polyflex TPU95A を充填密度 15% で 3D プリントし、エアポンプの圧縮・還元動作に応じて空気流を一定方向に制御する逆流防止弁を固定した (Fig.2-①左図)。また、アウトソールの凹型上足部とミッドソールの凸型上足部を重ね合わせ、面ファスナーで靴と足に固定することで、エアポンプをミッドソールのヒールで圧縮しながら、安定した歩行を可能にした (Fig.2-①右図)。

歩行時の左右の高さのバランスを保ち、空気供給頻

度を最大化するため、左右一対のフットポンプを作製した (Fig.2-②)。これらのフットポンプをポリウレタンチューブ (外径 4 mm, 内径 2.5 mm) でランニングポーチに固定した 500 ml ペットボトルに接続する事で、歩きながら圧縮空気を充填できるフットポンプモジュールを構築した (Fig.2-③)。

Fig.3 に、歩数とフットポンプモジュールの充填空気圧の関係を示す。フットポンプを左足、右足、両足に取り付けた3つのパターンで体重 65 kg の男性に毎秒 2 ステップの速度で 90 秒間歩行してもらい (180 歩), 500 ml のペットボトルに充填された圧力変化を圧力計 (INFURIDER YF-189B) で測定した。右足フットポンプの平均押し出し量は 12.7 ml, 左足は 10 ml であり, 最大充填圧力は右足 111 kPa, 左足 103.4 kPa といずれも 100 kPa 以上の圧力を供給できることが確認された。40 kPa までは左右で同等の圧力向上が見られたが, 60 kPa 以上から逆流防止弁を開くために大きな足圧が必要となり, 利き足 (右足) と軸足 (左足) で 10 kPa 以上の圧力差が生じた。フットポンプを両足に取り付ける事で片足と比較して約 1.5 倍速く 100 kPa 以上に到達可能であった (右足: 51 秒, 左足: 81 秒, 両足: 35 秒)。一方, 両足で充填した最大圧力は 124.9 kPa と, 利き足と比べ 10 kPa 程度しか向上しなかった。両足でも左右いずれかのエアポンプを交互に圧縮するため, 各ステップの瞬間的圧力自体に差がなかった事が要因として考えられる。

3. キンクバルブモジュール

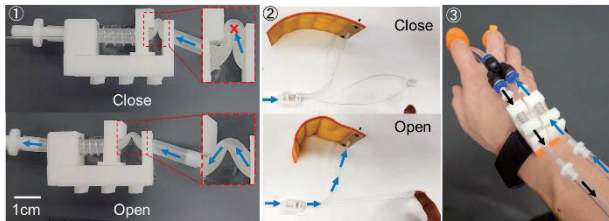


Fig. 4. Kink valve module

次に、ソフトアクチュエータへの圧力供給を無電力で制御するエアバルブとして、柔軟なソフトチューブを屈曲させ流路を遮断する soft kink valve [4] を応用したキンクバルブモジュールを紹介する。従来のメカニカルバルブや電磁弁とは異なり、チューブを外力で押し潰すだけで空気圧を瞬時に ON/OFF 制御できるため、3D プリンターを用いて多様な無電力バルブの制作が可能である。Fig.4-①に示すように、本研究では圧縮ばねの力でチューブを屈曲させるスライダ機構を用いたキンクバルブモジュールを3D プリンターで試作した。スライダに繋がった釣り糸を引くことでばねの圧力が緩和され、ソフトチューブの弾性で流路が開く仕組みとなっている。外径 5 mm・厚さ 0.5 mm のソフトシリコンチューブと、外径 7 mm・長さ 19 mm の小型圧縮ばねを、PLA で 3D プリントしたスライダ機構と組み合わせることで、

2.8 N の張力および 2 mm のスライド動作により, 100 kPa の圧力を瞬時に ON/OFF 可能なキンクバルブモジュールを試作した。

Fig.4-②に示すように、指で釣り糸を引くだけでソフトアクチュエータへ供給する圧縮空気を直感的に制御できる。Fig.4-③にソフトアクチュエータの給気と排気を2本の指の屈曲動作によって制御可能なウェアラブルエアバルブ機構を示す。釣り糸は Polyflex TPU95 で 3D プリントした指サップを介して指に固定されており、給気と排気で分けた 2 つのキンクバルブモジュールの開閉を2本の指で操作することで、ソフトアクチュエータ内部の圧力を制御可能である。

4. ソフトアクチュエータ

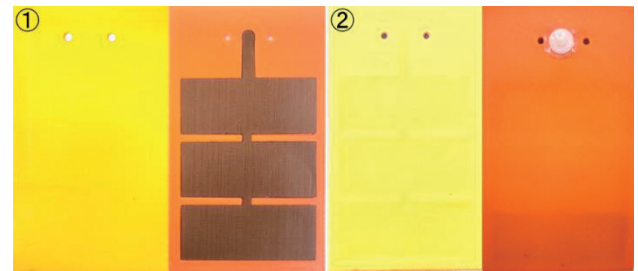


Fig. 5. Heat-sealed soft actuator composed of TPU-coated fabric and 3D-printed substrate with pneumatic cells



Fig. 6. Augmented finger actuator

最後に、ソフトアクチュエータの試作方法と各モジュールを組み合わせた無電力身体補助デバイスの応用事例を紹介する。本研究では、Fig.5 に示すように、気密コーティングされた伸縮生地と、3D プリントした3つの空気室を含む基板を熱圧着することで、空気圧で膨張し曲がるソフトアクチュエータを作製した。基板は圧縮空気に耐える気密性を得るため底面の厚さ 1 mm, 外壁の厚さ 5 mm で設計し, Polyflex TPU95 を充填密度 40% で 3D 印刷し作製した。伸縮生地 (ポリエステル 84%, ポリウレタン 16%) は熱転写ラバーシートと熱圧着することで気密性を確保した。Fig.5-① (右図) に示すように、空気室と流路をテフロンシートで覆い保護した状態で、伸縮生地と基板をヒートプレス機 (FOVNY XD-1390) を用いて 150 °C で 30 秒間圧着した。最後に、UV 接着剤を

用いて基板背面の空気注入口に PLA で 3D 印刷したチューブアダプター(外径 4 mm, 内径 2 mm)を取り付け, ソフトアクチュエータを完成させた(Fig.5-②)。

Fig.6-①に, キンクバルブモジュールと 60 kPa まで充填した 500 mL ペットボトルを用いて, ソフトアクチュエータを駆動する様子を示す。指を曲げ釣り糸をわずかに引く事でソフトアクチュエータの伸縮生地が膨張し, 指を曲げながら屈曲している事がわかる。また, Fig.6-②に示すように, 空気室の数を増やすことで, より大きな曲率とリーチで指の動きを拡張でき, 握力強化や指の屈曲支援など, 身体補助デバイスとしての応用が期待できる。



Fig. 7. Arm support actuator

また, Fig.7 に示すように, 単一の空気室を有するソフトアクチュエータ(140 mm × 50 mm)の端部を胴体と腕に固定しアームサポートアクチュエータを作製した。ペットボトルに 80 kPa まで空気を充填してアクチュエータに接続し, キンクバルブを中指で操作して加圧すると, 脇に畳み込まれていたソフトアクチュエータが直線状に膨張し, 腕を持ち上げられることがわかった(Fig.7-①, ②)。さらに, 人差し指を曲げて排気用キンクバルブを開放すると, アクチュエータが収縮して再び脇に折り畳まれることが確認できた(Fig.7-③)。

5. 結論

本研究では, ラピットプロトタイピングが難しかった無電力で駆動するソフトアクチュエータを, エアポンプ, エアバルブ, ソフトアクチュエータの 3 つの要素技術に分け, デジタルファブリケーション技術を用いた試作方法を検証した。エアポンプは, 歩行時に衝撃荷重が集中しやすい後足部を模した形状とし, 弾性回復性と応力分散特性に秀でたジャイロイド構造を 3D プリンターで印刷しシリコンで密封することで作製した。歩行時に生じる不規則な荷重変動を吸収しながらエアポンプを安定的に圧縮し, 空気を充填できるフットポンプモジュールを作製し, 100 kPa 以上の圧力を供給可能であることを実験的に実証した。

次に, 無電力で圧縮空気を制御するエアバルブとして, ソフトチューブを屈曲させることで流路をインタラクティブに開閉可能なキンクバルブモジュールを紹介した。ソフトチューブをバネの力で屈曲させるスライダー機構を 3D プリンターで作製し, 数 mm の指の微小動作により 100 kPa の圧力を瞬時に開閉できることを実証した。

ただしキンクバルブには, チューブが開き高圧の空気が流れた状態では屈曲が困難になるという問題がある。そこで本研究では, ソフトアクチュエータの空気圧の供給と排気を分けた 2 つのキンクバルブモジュールを指で制御するウェアラブルデバイスを提案した。

最後に, ソフトアクチュエータの試作方法と各モジュールを組み合わせた無電力身体補助デバイスの応用事例を紹介した。空気室を含む基板を 3D プリンターで作製し, 気密加工した伸縮生地を熱圧着させるシンプルなソフトアクチュエータの作り方を, 曲げアクチュエータを例に紹介した。全てのモジュールを結合することで, 握力強化や指の屈曲支援が可能な手指拡張アクチュエータや, 腕を持ち上げるアームリフトアクチュエータなどの身体補助デバイスとして応用できることを実証した。

今後は, 3D プリンターを用いてエアポンプ, エアタンク, エアバルブ, ソフトアクチュエータ, エアチューブなど, 無電力ソフトアクチュエータを構成する全要素部品を衣類上に直接印刷・製造する一貫的なデジタルファブリケーション技術確立し, 誰もが容易に多様な無電力ウェアラブルソフトアクチュエータを設計・製作可能とするデザインツールおよびプラットフォームの開発を目指す。

謝辞

本研究成果は国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (JPJ012368C06801) により得られたものです。

参考文献

1. Bardi, Elena, et al. "Upper limb soft robotic wearable devices: a systematic review." *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 19.1 (2022): 87.
2. Sharma, Bibhu, et al. "Soft Upper-Limb Wearable Robotic Devices: Technology and Applications." *Advanced Intelligent Systems* 6.12 (2024): 2400266.
3. Yun, Yeongcheol, et al. "Exo-shoe triboelectric nanogenerator: Toward high-performance wearable biomechanical energy harvester." *Nano Energy* 80 (2021): 105525.
4. Ogawa, Kazunori, Tomohiro Ikeda, and Yuichi Kurita. "Unplugged powered suit for superhuman tennis." 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics. IEEE, 2018.
5. Shveda, Rachel A., et al. "A wearable textile-based pneumatic energy harvesting system for assistive robotics." *Science advances* 8.34 (2022): eabo2418.
6. Luo, Kai, et al. "Soft kink valves." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 131 (2019): 230-239.

新しい原子模倣メタマテリアルのための電子構造解析

Electronic Structure Analysis for Atom-Mimicking Metamaterials

寺本 雄飛, 奥川将行, 小泉 雄一郎, 尾方 成信

Yuhi TERAMOTO, Masayuki OKUGAWA, Yuichiro KOIZUMI, Shigenobu OGATA

大阪大学

The University of Osaka

【要約】

本研究では結晶性物質の弾性異方性を再現する構造体の設計指針を得るために、電子構造と弾性異方性の関係性に注目する。DFTを用いて得られた弾性定数と空間的な電子局在度と原子対ごとの結合性との2つの指標との相関関係に注目し、影響の強いパラメータを探索した。結果として、電子局在度の平均値と強い負の相関が見られ、Poisson 比と原子対ごとの結合性の間に弱い負の相関が見られた。

キーワード: 第一原理計算, 有限要素法, メタマテリアル, 電子構造, 格子構造体

【Abstract】

To obtain design guidelines for structures that reproduce the elastic anisotropy of crystalline materials, this study focuses on the relationship between electronic structure and elastic anisotropy. We investigated the correlation between elastic constants obtained using DFT and two indicators: spatial electron localization and pairwise atomic bonding properties, to identify parameters with strong influence. As a result, a strong negative correlation was observed with the mean value of electron localization, and a weak negative correlation was found between Poisson's ratio and pairwise atomic bonding properties.

Keywords: Ab initio calculation, finite element. Method, metamaterial, electronic structure, lattice

1. 緒言

力学メタマテリアルは構造設計により力学特性を自在に制御できる新しい材料技術である。従来は特定の元素組成に依存していた機械的特性を、ユビキタスな元素で実現可能にできるため注目されている。特に、資源制約や希少元素への依存からの脱却が求められる中、付加製造を活用した mm スケールでの構造制御により希少元素で発現していた特性を豊富な元素によって実現する試みは、持続可能な材料開発の観点からも重要な意義を有する。

本研究では、その基礎として電子構造と弾性特性の相関に注目し、メタマテリアルの密度分布などの内部構造を制御することで特定の弾性異方性を模倣するための線形モデルの構築を行う。Fig1 に示すようなコンセプトで研究を行う。密度汎関数法 (Density Functional Theory: DFT) による第一原理計算を用いて弾性異方性・電子構造・化学結合性などを計算, そこから得られる特徴量を元に構造を作成し, 有限要素法 (Finite Element Method: FEM) で検証することで関係性を探索する。その前段階として, それぞれの特徴量の相関関係を比較することで有効な特徴量の探索を行った。

2. 方法

独自での弾性定数の計算は行わず Materials Project¹ のデータを用いて, Poisson 比と Zener 比を目的変数として関係性の検討を行った。弾性異方性と構造に関係すると予想されるパラメータを抽出し, それらを 1 次元数値に落とし込むことで相関関係の探索を行った。

電子構造に関するパラメータとして、Electrical Localization Function: ELF(電子局在関数)² と Crystal Orbital Bond Index: COBI³ の 2 つの指標を用いた。

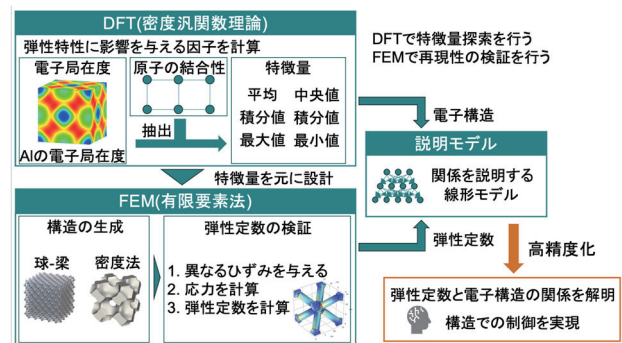


Fig.1 Research framework combining density functional theory (DFT) calculations and finite element method (FEM) validation for predicting elastic properties of materials. The workflow includes DFT-based prediction of elastic constants, FEM verification through structural analysis, and development of high-precision predictive models linking electronic structure to mechanical properties

一つ目のパラメータとして電子の分布に注目した。中でも電子の局在度に注目し, 局在度を定量的に評価できる ELF を説明変数とした。系の自由エネルギーが十分収束する計算条件で ELF を計算した。ELF は式(1)のように与えられる。ここで D は DFT で得られる電

子のエネルギー密度, D_h は一様電子ガスモデルにおける電子のエネルギー密度である. ELF は 1 に近づくとも局在化が強くなり, 0.5 に近づくとも電子が均一に存在していることを示す.

$$\text{ELF} = \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{D_h}\right)^2} \quad (1)$$

もう一つのパラメータとして化学結合性に注目し, 波動関数の係数から結合性を評価する Crystal Orbital Bond Index: COBI に注目した. 化学結合性を計算するソフトウェアとして Local Orbital Basis Suite Towards Electronic-Structure Reconstruction: LOBSTER⁴ を用いて COBI を計算した. COBI は式(2)³ に示すように表される各原子対の結合度を表す関数であり, 0 が結合性を 1 が反結合性を表す. COBI はエネルギーに対する関数となっているため, エネルギーで積分をすることで原子対ごとの結合度を表す数値指標を求めることができる. 計算条件は ELF の計算と同様である.

$$\text{COBI}_{\mu\nu}(E) = \sum_{k,j} w_k \text{Re}[c_{\mu j}^*(k) c_{\nu j}(k)] \delta(E - \varepsilon_j(k)) \quad (2)$$

この 2 つの指標を用いて FCC 純金属の電子構造と弾性異方性についての関係性を探索する.

3. 結果

Materials Project による弾性定数の計算結果を Fig. 2 に示す. 得られた Poisson 比と Zener 比を目的変数として, ELF や COBI を説明変数として線形モデルを構築する.

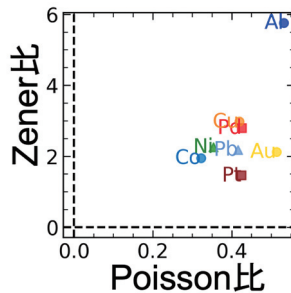


Fig. 2 Zener ratio plotted against Poisson's ratio for FCC pure metals based on Materials Project calculations.

ELF の計算結果として, Al と Cu の計算結果を Fig. 3 に示す. 原子位置において ELF が 0 に近づいている. これは原子位置において非局在度が強くなっていることを表し, 結合性軌道が存在していないことを表している. Al は Cu よりも原子間に局在度の高い領域が多く, この領域が弾性異方性に作用していると考えられる.

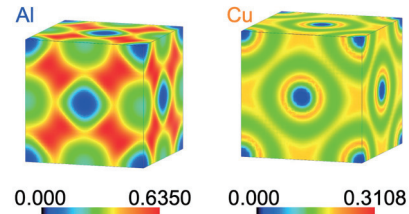


Fig. 3 Cross-sectional visualization of the 3D Electron Localization Function for Al, Cu cubic structure.

Al, Au, Cu, Ni の COBI の計算結果を Fig. 4 に示す. Fermi エネルギー付近で結合性が現れ始めるのは同じものの, 値の散らばりが元素ごとに異なる.

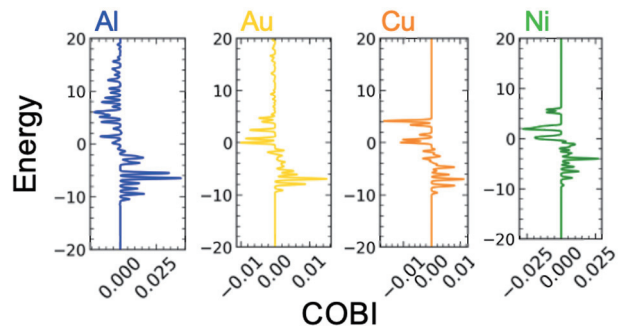


Fig. 4 Crystal Orbital Bond Index (COBI) as a function of energy for Al, Au, Cu, and Ni, calculated using the LOBSTER package. The energy is referenced to the Fermi level ($E_F = 0$ eV).

COBI をエネルギーで積分すると Integrated COBI: ICOBI という原子対ごとの結合性を表す指標となる. 第一近接, 第二近接である原子対で ICOBI の平均を取ったものを Fig. 5 に示す.

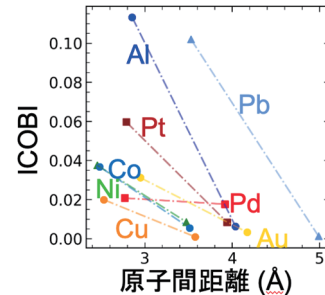


Fig. 5 ICOBI vs Interatomic distance (Å) for Al, Au, Co, Cu, Ni, Pb, Pd, Pt, showing the relationship between bonding strength and atomic spacing.

4. 考察

ELF は空間的な局在度を表す 3 次元テンソルで表されるため, 相関係数を取るためにはテンソルを数値に変換する必要がある. そこで Poisson 比と Zener 比が各方向の弾性定数を用いて表されることに注目し, $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ の 3 方向に沿って値を抽出し, そこから特徴量を作成した. 作成した特徴量と Poisson 比, Zener 比との相関係数を Fig. 6 に示す. ELF の $\langle 111 \rangle$ 方向の平均値は Poisson 比に対してはそれほど強くない相関だったものの, Zener 比に対して強い正の相関がある. ELF の平均値に注目すると 2 つの弾性定数を再現でき

ると示唆される。

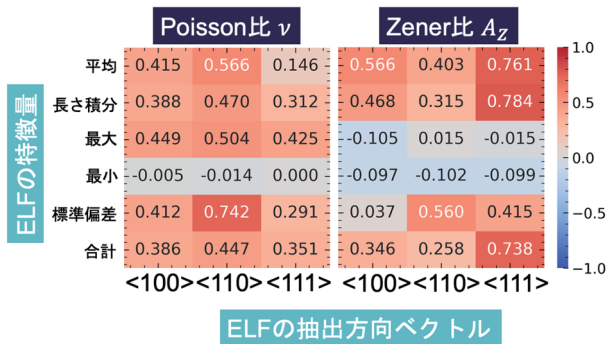


Fig. 6 Correlation matrix showing Poisson's ratio (ν) and Zener ratio (A_z) vs ELF extraction direction vectors for different crystallographic orientations (<100>, <110>, <111>). The heatmap displays correlation coefficients ranging from -1.0 to 1.0, with statistical measures including mean, long-range component, maximum, minimum, standard deviation, and total values.

COBI をエネルギーで積分すると Integrated COBI: ICOBI という原子対ごとの結合性を表す指標となる。各元素での ICOBI と Zener 比, Poisson 比の関係を Fig. 7 に示す。Poisson 比との相関関係は弱く, Zener 比とは弱い正の相関が見られる。Al を除くと強い相関が, Pb を除くとより強い相関が見られるため, ICOBI を模倣すると Zener 比を再現することが示唆される。Al の計算精度について課題があるとも考えられる。

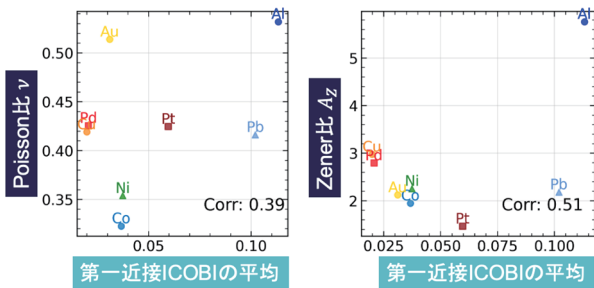


Fig. 7 Correlation between first nearest neighbour COHP (Crystal Orbital Hamilton Population) average and (a) Poisson's ratio and (b) Zener ratio for FCC pure metals (Au, Pt, Ni, Cu, Pb). Correlation coefficients are 0.39 and 0.51, respectively.

5. 結論

VASP を用いて弾性定数と電子構造を, LOBSTER を用いて化学結合性を解析し, 以下の 2 つの結論が得られた。

1. ELF の<111>方向の平均値は Zener 比に対して強い正の相関がある。ELF の平均値に注目すると

Zener 比を再現できると示唆される。

2. Poisson 比との相関関係はほぼ無く, Zener 比とは弱い正の相関が見られる。ICOBI を模倣すると Zener 比を再現することが示唆される。

今後はこれらの示唆から特徴量を抽出し, FEM での検証を行う。ELF をある閾値で切り取り, 構造を生成する方法, 原子位置に球を配置し ICOBI から梁を設計する方法の 2 つのアプローチを用いることで弾性異方性を模倣できると考えている。

参考文献

1. M. De jong, et al. "Charting the complete elastic properties of inorganic crystalline compounds." Sci. Data (2015), pp.150009
2. B. Silvi, A. Savin, "Classification of chemical bonds based on topological analysis of electron localization functions." Nature (1994), pp.683.
3. P.C. Müller, C. Ertural, J. Hempelmann, R. Dronskowski, "Crystal Orbital Bond Index: Covalent Bond Orders in Solids", J.Phys. Chem. C (2021), pp.7959.
4. S. Maintz, V.L. Deringer, A. L. Tchougréeff, R. Dronskowski, "LOBSTER: A tool to extract chemical bonding from plane-wave based DFT.", J. Comput. Chem (2016), pp.1030

折り変形と空間充填が可能なモジュールパズルの提案

Foldable Space-Filling Modular Puzzle

宗 賢太郎, 舘 知宏

Kentaro SO, Tomohiro TACHI

東京大学

The University of Tokyo

【要約】

立方体や菱形十二面体によるテセレーションを表現することができる新たな板状ブロックパズルを提案する。本研究の成果物として得られるパズルは、立方体や、少々空間的に把握することの難しい、菱形十二面体及びそれによる空間充填を、視覚的、また触覚的に、ソリッドな実物として把握することを可能にする。また、その高い組み合わせの自由度によって、創造性や空間把握能力を養うことの手助けとなるであろうと思われる。

キーワード: パズル, 空間充填, テセレーション, 菱形十二面体, ミウラ折り, メタマテリアル

【Abstract】

We propose a new planar block puzzle that can represent tessellations of cubes and rhombic dodecahedrons. The puzzle that will be the outcome of this research will enable cubes and rhombic dodecahedrons, which are somewhat difficult to grasp spatially, and their space-filling properties to be grasped visually and tactilely as solid, real objects. Furthermore, the high degree of freedom in combination is likely to help develop creativity and spatial understanding abilities.

Keywords: puzzle, space-filling, tessellation, rhombic dodecahedron, Miura folding, metamaterial

1. 序論

これまで、多くの多面体を題材としたパズルが考案・研究され、子供から大人まで幅広い層に親しまれてきた。その形状や材質はきわめて多岐にわたり、それらが有する特性や表現し得る形態は多様である。

POLYDRON, GEOFIX のような、板状のパーツによって構成された面的なパズルは、面的なパーツ構成とジョイントの回転的な可動性によって、ソリッドなボディを形成することができることに加えて、面どうしの角度が自由に变化でき、折り変形ができる。実際に、剛体折紙と呼ばれる折紙研究領域では、面モジュールパズルによる検討がよく行われている。

一方、ソリッドなボディによって空間充填を表現することができるタイプのパズルもある。LEGO や BLOXES など、多くの場合直交グリッドを基本としているが、菱形十二面体を用いたものもある[Kijima and Tachi]。様々な形状のソリッドを直接的に表現できるのに加え、空間充填というテーマを体感可能としている。一方で、一つ一つのソリッドは変形しないため、静的な表現にとどまる。

近年変形可能な面構造をもとに空間充填する、機械的メタマテリアルの研究が、科学・工学分野で着目されている[Tachi and Miura] [Schenk and Guest][Overvelde et al.]. このような面的構造とソリッド的構造のハイブリッド構造を探索可能なおもちゃ、パズルに関して万能な方法論は存在しない。本研究では、立方体や菱形十二面体によるテセレーション(空間充填)を表現できる、硬い板状パーツのみによって構成されたパズルの設計及

び制作を目的とする。これによって、変形可能な面的なパズルと、空間充填可能なソリッド型パズルのハイブリッドを目指す。それらを用いて表現することのできるその他の多様な形状についても探索および分析を行う。

2. プロトタイプとその問題

本研究は、POLYDRON や GEOFIX のように硬いパーツによって構成されていながら、多面体等の外殻のみならず、内部までも表現することのできるパズルの設計を目的としており、まずは立方体及び菱形多面体による空間充填というところから着手した。

それを目指すにあたって、はじめは面どうしを何らかの方法によって張り合わせることで空間充填を実現しようと試みた。組み立て方としては、まず面どうしをつなぎ合わせて最小の繰り返し単位を組み立て、最後にそれらの面同士を張り合わせる、というイメージである。

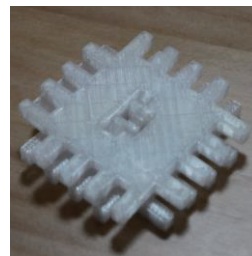


Fig 1. Early prototype

しかしながらそのモデルでは、作ることのできる形状が極めて限定的であるという問題があることが分かった。Fig 2.に、そのような方法を採用した場合の、立体を構成する平面どうしの位置関係を、3つのパターンと、張り合わせるモデル、改善後のモデルに分けて断面図を用いて示す。

Fig 2. Comparison of prototype and improved model

	パターン①	パターン②	パターン③
張り合わせるモデル			
改善後のモデル			

パターン①のように面と面が直交する場合は、張り合わせるモデルでも一切矛盾を生じずに組み立てることができる。一方、パターン②のような組みかたでは、面どうしが干渉してしまい、組み立てられない。また、パターン③のような組みかたの場合、組み立てることはできるが、隣り合う平行な面どうしの中でオフセットが生じる。ある特定の組み方では、オフセットしても機構を作れることが知られている[Tomita et al.]が、ブロックパズルでは、同じ要素を異なる組み合わせで組むこともあり、組み方によっては矛盾して組めなくなる。そこで、Fig 2. 下段のような、軸を理想的な面の上においてオフセットのないモデルを作る必要がある。

3. パズルの概要

既存の面モジュールのパズルは、一つの辺に二枚のみ面が共有できるのに対し、提案構造では、一つの辺により多くの面を共有できるように拡張する。具体的には、一つの面の形(正方形また菱形)につき二種類のパーツで構成されている(Fig 3.)。その二種類のパーツをそれぞれ以下の図のようにパーツ A / パーツ B と呼ぶこととする。またパーツ A / パーツ B は、二組の対辺に、それぞれ二種類ずつ、合計四種類のジョイントを持っており、それらを以下の図のようにジョイント①、ジョイント②、ジョイント③、ジョイント④と呼ぶ。

ジョイント①にはジョイント②～④全てを接続できる。

Fig 3. Parts and Joints Overview

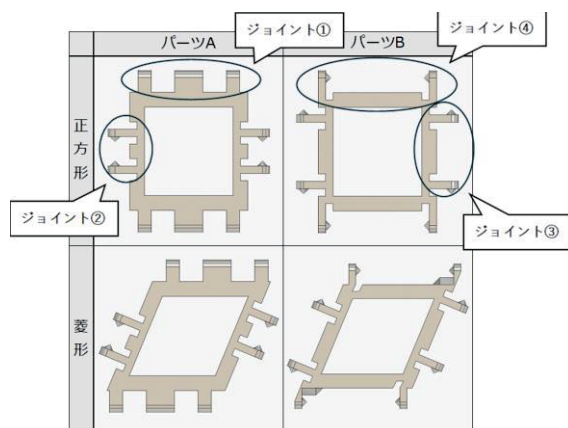
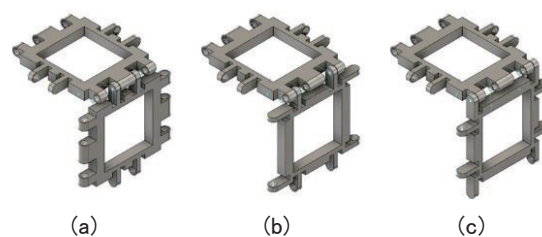


Fig 4. Connection between joints (Connection between

(a)①and② (b)①and③ (c)①and④)



ジョイント②～④は互いに干渉しないため、Fig 5.のように、ジョイント①にジョイント②～④を最大ひとつずつ同時に接続できる。

Fig 5.を見ると、四つの面が一つの軸を共有していることがわかる。これにより、立方体や菱形多面体による空間充填を表現することが可能となる。

制限として、同じジョイントどうしは干渉してしまうため、一つの軸を共有することができない。また、ジョイント①が関係しない軸については、受けの部分がないために固定することができない。

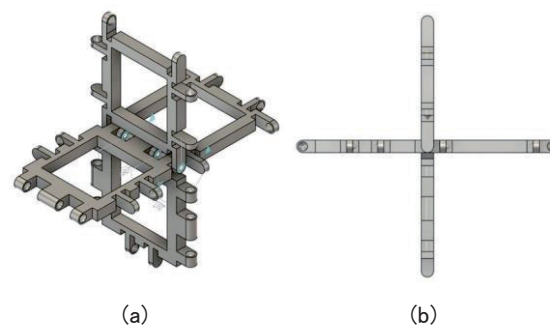


Fig 5. Four joints connected at the same time from (a)isometric view (b)side view

3.1. 立方体による空間充填

Fig 6. How to build a cubic tessellation

	1 [^] 3	2 [^] 3	3 [^] 3
パーツ A			
パーツ B			
完成系			

立方体による空間充填の表現方法の一例を、縦、横、奥行きがそれぞれ 1 マス、2 マス、3 マスの場合にわけてそれぞれ Fig 6.に示す。一段目には用いられているパーツ A のみ、二段目には用いられているパーツ B のみ、三段目には用いられているすべてのパーツをそれぞれ CAD 上で配置した様子が示されている。

1 マスの時が最も単純で、まずパーツ A のみによって単一のループを作り、余っている面をパーツ B によって埋めることで安定した立方体となる。この手順を応用することで 2 マス以上の場合も作成することができる。まずは先述したようなパーツ A によるループで可能な限り空間を充填する。この際に一つのループを出発点として空いている面を次のループに用いる、という手順を繰り返すことで自然と規則的にループが並ぶため、この手順は無限に繰り返すことができる。充填したい範囲の分だけループを配置したら、最後に空いている面をパーツ B で埋めてしまえば空間充填が完成する。

3.2 菱形多面体による空間充填

次に菱形多面体による空間充填の表現方法の一例を示す。

まず、菱形によって構成された平行六面体に関しては、立方体と同様の手順で、菱形のパーツを用いることで空間充填を表現することができる(Fig 7.)。

また、菱形十二面体による空間充填に関しても、このパズルでは表現することが可能である。Fig 8.には、8 個の菱形十二面体で空間を充填したところを、①～⑤の 5 つの手順に分けて、斜めと上の二つの視点それぞれからみた様子が示されている。

手順①、③、⑤で追加されているレイヤーは、ミウラ折りと呼ばれる波のような形状を、パーツ A のみによって表現したものである。①と⑤で追加されたものはそれぞれ同位相であり、①、⑤で追加されたものと③で追加されたものは、縦、横に 1 マスずつずれ、逆位相となっている。そして、②と④ではその間を埋めるようにしてパーツ B が追加されている。

Fig 7. Parallelopiped tessellation

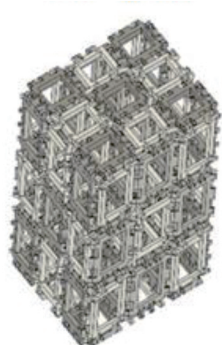
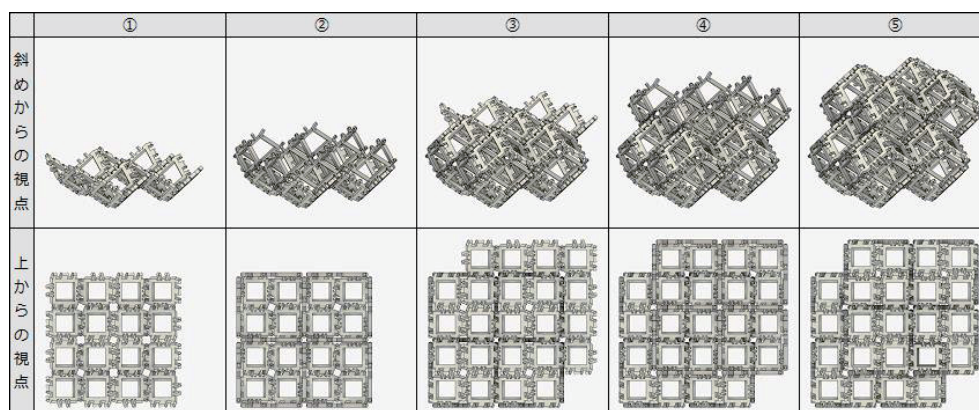


Fig 8. How to build a rhombic dodecahedron tessellation



4. 表現可能な形状

第 4 節では、本パズルによって表現することのできる形状について、実際に 3D プリントによって出力したパズルを組み立てた様子の写真などをまじえながら総括的に紹介する。

4.1. ソリッドな形状

まずはソリッド(非可動)な形状を Fig 9.にいくつか提示する。(a)、(b)は、それぞれ第 3 節で具体的な組み方を紹介した、立方体、および菱形十二面体による空間充填である。また、(c)は、菱形十二面体第二種と呼ばれる、(b)の菱形十二面体のいわば兄弟のような立体による空間充填である。(b)の菱形十二面体とは、構成する菱形の対角線の長さの比が異なっている。

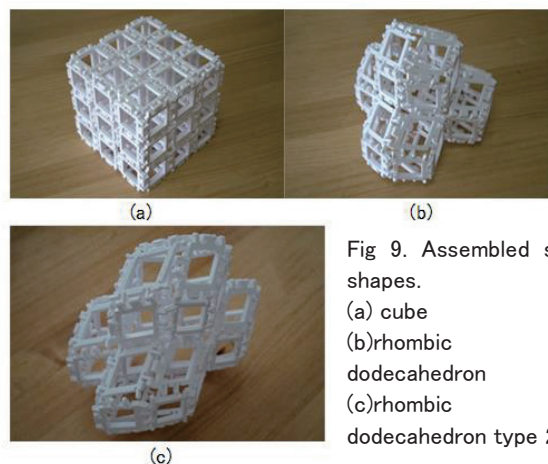


Fig 9. Assembled solid shapes.

(a) cube
(b) rhombic dodecahedron
(c) rhombic dodecahedron type 2

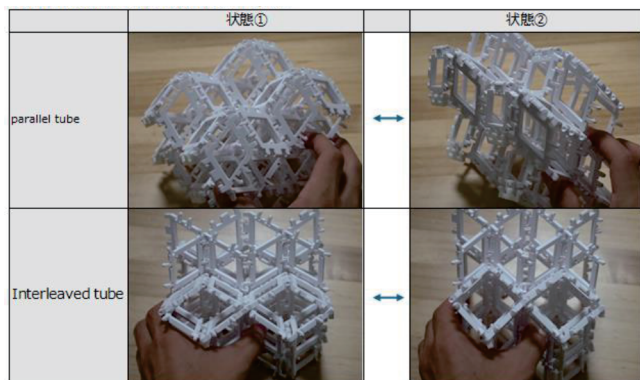
4.2. 可動な形状

次に可動な形状を提示する。Fig 10.には本パズルを用いて作成された二種類の可動な形状を動かした際の、二つの状態が示されている。

これらは、parallel tube cellular structure、interleaved tube cellular structure と呼ばれる、展開可能なセルラー折り紙構造に基づく、新たな機械的セルラーマテリアル形状である[TACHI, and MIURA][Cheung et al.]。

いずれもミウラ折りのシートを層状に重ねたような形状となっており、Fig 11.のような形状を最小単位としてそれを繰り返すことによって構築することができる。

Fig 10. Assembled movable shapes



4.3. 端を留めるパーツ

このパズルでは、繰り返し構造を途中で途切れさせる上で、端の部分が固定されないという問題が生じる。

これを解決するため、Fig 12.において示されているような、端の部分を留めるためのパーツを導入した。



Fig 11. Module for making the tube

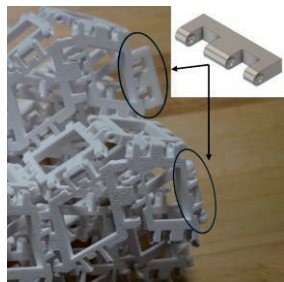


Fig 12. Parts that fasten the ends

5. 最後に

POLYDRON, GEOFIX などの一般的に市販されているパズルと比較すると、本稿で提案されるパズルの持つ特筆すべきメリットは以下のような点である。

- ① 最大で四面が一つの軸を共有することができる。
- ② パーツの表/裏について、正方形に関しては表/裏が存在せず、菱形に関しては表/裏で二種類のパーツとして用いることができる

これらにより、空間充填や、機械的メタマテリアルの表現をはじめとして、表減することのできる形状という点で高い自由性が実現されている。

しかしながら、その自由性と引き換えに、構造の単純性が失われていることも確かである。市販されているパズルは、基本的にパーツもジョイントもそれぞれ一種類ずつであるが、本稿で提案されるパズルは、パーツは二種類、ジョイントは四種類であり、幼い子供を対象とした玩具としては少々難解過ぎる形となっている。

この問題は、自由性の確保という観点からやむを得ないものともいえるが、今後、より多くの人々が手に取りやすいよう、自由性と単純性のより高いレベルでの両立を目指し、デザインの改良や、システムの見直しを進める。

参考文献

1. Nagisa KIJIMA and Tomohiro TACHI (2021). Diamond Lattice Joint System. *Conference on 4D and Functional Fabrication 2021*, 79–82.
2. Tomohiro TACHI and Koryo MIURA (2012). RIGID-FOLDABLE CYLINDERS AND CELLS. *J. IASS*, 217–226.
3. Mark Schenk and Simon D. Guest (2013). Geometry of Miura-folded metamaterials. *PNAS*, vol. 110, no. 9, 3276–3281.
4. Overvelde, J., de Jong, et al. A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom. *Nat Commun* 7, 10929 (2016).
5. Sunao Tomita, Kento Shimanuki, Kazuhiko Umemoto, Atsushi Kawamoto, Tsuyoshi Nomura, and Tomohiro Tachi (2025). Stiff deployable structures via coupling of thick Miura-ori tubes along creases. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 205, 2025, 105851.
6. Kenneth C Cheung et al (2014). Origami interleaved tube cellular materials. *Smart Mater, Struct* 23, 2014, 094012.

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの貴重なご助力、ご助言をいただきました、南宏樹さん、天童智也さんに感謝いたします。本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR232T の支援を受けています。

写真からチョコレートへ：チョコレート 3D プリントによる環境コンテキストを取り入れたハイブリッドギフトの提案

From Photos to Chocolate: Integrating Environmental Context in Personalized Hybrid Gifts via Chocolate 3D Printing

梶 雅琨, 城 一裕

Yakun NIE, Kazuhiro JO

九州大学

Kyushu University

【要約】

本研究では、チョコレートの 3D プリント結果が周囲温度の影響を受けるという観察に基づき、環境情報を取り入れたハイブリッドギフトのデザインを提案する。本デザインでは写真を媒体として用い、チョコレートのプリント温度を「記憶の中の特定の日の気温」に合わせて設定する。また、当日の環境情報をチョコレートの表面装飾にも反映させる。本研究は、ギフトに環境情報を組み込むことが、感情的価値を高めるかどうかを検討し、感情的共鳴を伴うギフトデザインの新たな方向性を示すことを目的とする。

キーワード: チョコレート 3D プリント, 環境情報, ハイブリッドギフト, 感情的価値

【Abstract】

This study proposes a hybrid gift design that incorporates environmental context, based on the observation that the results of chocolate 3D printing are influenced by ambient temperature. The design uses photographs as a medium and sets the chocolate printing temperature according to “the temperature on a specific day in memory.” Environmental context from that day is also integrated into the chocolate’s surface decoration. This study aims to explore whether embedding environmental context in gifts can enhance their sentimental value, offering new directions for emotionally resonant gift design.

Keywords: Chocolate 3D printing, environmental context, hybrid gift, sentimental value

1. Introduction

Food 3D printing technology holds great potential for producing three-dimensional structures with complex geometries, intricate textures, and customized nutritional content [1]. Chocolate is a commonly used material in food 3D printing, primarily due to its melt-extrusion properties and its popularity in the premium food market [2]. In our chocolate 3D printing tests, we observed that, owing to chocolate’s melting property, the printing result is influenced by ambient temperature. Even without modifying the model file or the chocolate material, variations in ambient temperature can lead to different printing results. This demonstrates the context-based uniqueness of the printed objects.

At the same time, chocolate is a popular snack that provides both sensory satisfaction and social value and is often regarded as a classic gift [3]. Research on gifting behavior indicates that recipients tend to value gifts with sentimental value, such as something the giver felt inspired to give based on their relationship [4]. Compared to material gifts (objects for recipients to keep), experiential gifts (events for recipients to live through) are more effective in enhancing interpersonal

relationships, because they are able to evoke more intense emotions [5]. Gifts with sentimental value are often related to shared memories between the giver and the recipient. Research has shown that contextual cues—such as environment, climate, and setting—play a critical role in memory retrieval, and matching the original learning and recall context can enhance memory performance [6]. Based on this, we propose the following idea: could embedding the environmental context of a memory into a gift’s design enhance its sentimental value?

Building on these insights—the sensitivity of chocolate to ambient temperature in 3D printing and its emotional value as a gift—the study proposes a novel gift design: using photographs as a medium, the ambient temperature for chocolate printing is set according to “the temperature on a specific day in memory,” and the environmental context from that day is incorporated into the chocolate’s decoration. Finally, the photograph is paired with the physical chocolate in digital form, creating a hybrid gift that integrates the memory with personalized sentimental value.

2. Chocolate 3D printing at different temperatures

The material used in this study was 55% cocoa dark chocolate. Preliminary tests showed that the optimal temperature for the chocolate paste for 3D printing was approximately 28°C . At this temperature, the chocolate provides sufficient structural support while maintaining an overall soft texture. In this study, we used the Foodini food 3D printer [7]. To control the ambient temperature during printing, the printer was placed inside a temperature-controlled chamber, which allows settings from 5°C to 35°C . A triangular pyramid was selected as the printing model, since its geometry enables clear observation of the chocolate layering from above (Fig. 1).

The printing procedure was as follows. First, the temperature-controlled chamber was set to the target ambient temperature. The chocolate was then melted and cooled to approximately 28°C before being loaded into the printing capsule, with the capsule temperature maintained at 28°C on the Foodini printer to minimize rapid temperature changes due to the environment.

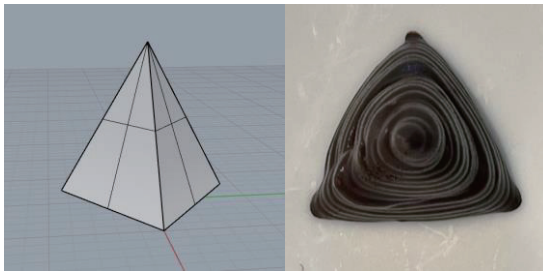


Fig. 1. The triangular-pyramid model used for printing and the top view of the printed result

At approximately 15°C , the chocolate cooled relatively quickly, producing printed lines that were sharp and well-defined (Fig. 2). Within the $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ range, the extruded chocolate was less affected by ambient temperature. However, due to its soft texture, the printed lines showed slight curvature (Fig. 3). At around 35°C , the chocolate tended to melt after extrusion, with insufficient layer-to-layer support, leading to downward collapse and rounded lines (Fig. 4).

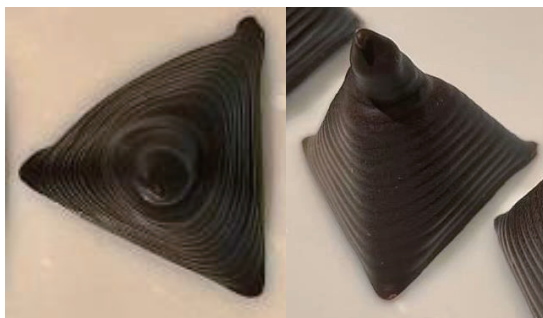


Fig. 2. The printing result at 15°C

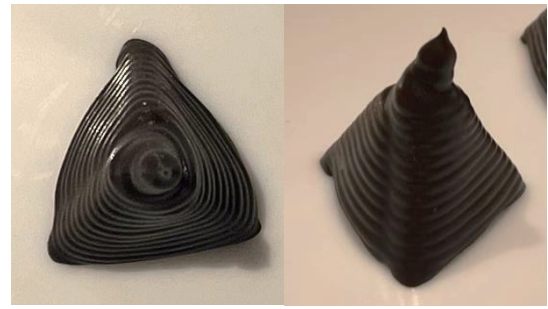


Fig. 3. The printing result at 25°C



Fig. 4. The printing result at 35°C

3. Photographs and memories

There are many media that can trigger memories, but in this study, we focus on photographs. First, photographs are the easiest to share, serving both to record personal memories and to share them with others. [8]. The growing popularity of photo-centered social media platforms further reinforces photographs as social symbols that embody emotional connections and shared experiences [9]. Moreover, research has shown that events accompanied by photographs are remembered more vividly and with greater emotional intensity than those without [10].

4. The Hybrid Gift

The idea of hybrid gifting is to combine elements of both physical and digital gifts to create new kinds of gift experiences [11]. This approach merges the expressive freedom of digital gifts with the ceremonial quality of physical ones. Using a hybrid format, chocolate and photographs can be effectively combined. Previous studies also provide examples of chocolate in hybrid gifts. In the hybrid gift designed by Jocelyn Spence et al. (Fig. 5), the physical component consisted of a mix of three most popular chocolates from a chocolatier. The packaging included a card containing a QR code, which the recipient could scan to access a digital gift. The digital gift could take any form—text, image, audio, or a URL—and the giver could freely create and upload it [4]. In the hybrid gift designed by Rebecca Gibson et al. (Fig. 6), the physical gift included a set of four chocolates, with the giver able to choose dark, milk, or white chocolate. The packaging also included a card containing a QR code that the recipient could scan to access a

digital gift. The digital gift consisted of a photograph uploaded by the giver that could evoke shared memories between the giver and recipient [12].

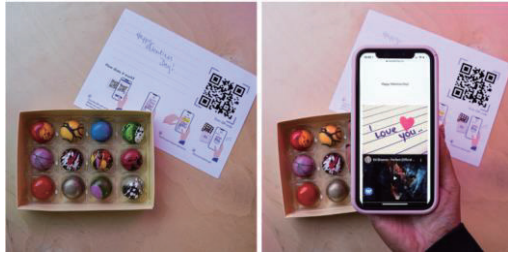


Fig. 5. The hybrid gift designed by Jocelyn Spence et al.

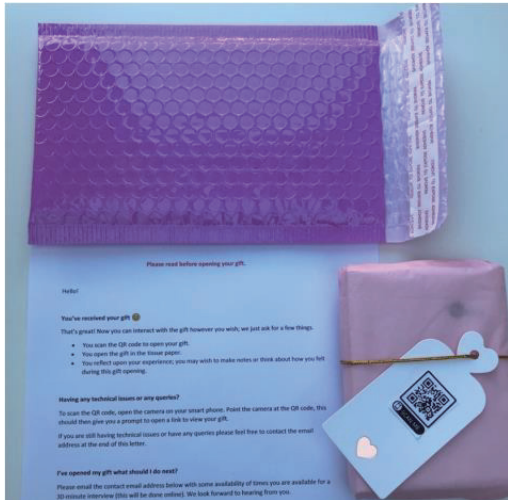


Fig. 6. The hybrid gift designed by Rebecca Gibson et al.

From these two cases, we observed a lack of connection between physical and digital gifts. In existing designs, even if the physical item were replaced, the digital experience would remain largely unaffected. Therefore, our proposal aims to strengthen the link between the digital and physical components of the gift.

5. Our gift design proposal

In this study, the digital gift consisted of a photograph accompanied by a message and contextual details. The physical gift was 3D-printed chocolate, with the printing temperature—low (15°C), medium (25°C), or high (35°C)—set according to the day the photo was taken. Givers could decorate the chocolate to incorporate additional memory details. Each hybrid gift included three chocolate pieces, each corresponding to a photograph. The proposed gift-making process is as follows:

Step 1: The giver uploads photos that hold shared memories with the recipient.

Step 2: Based on the time and location each photo was taken, we estimate the corresponding ambient temperature and set the chocolate printing environment accordingly.

Step 3: Once the chocolate is printed, the giver can decorate its surface with powdered sugar or jam to freely express additional contextual details—such as heavy rain or intense sunlight (Fig. 7).



Fig. 7. The decorated chocolate

Step 4: Each piece of chocolate is then packaged with a QR code linking to the corresponding digital photo and contextual information, forming a hybrid gift (Fig. 8 and Fig. 9).



Fig. 8. A QR code is affixed to the bottom of the chocolate packaging box



Fig. 9. The digital gift interface

Step 5: After delivery, we collect feedback from both the giver and recipient to examine whether the contextual information enhances the emotional value of the gift and effectively evokes shared memories

6. The Next Step

Next, we plan to invite participants to experience the entire gift-making process and collect preliminary feedback to refine and improve the design. We will then conduct a workshop to examine how givers and recipients perceive and experience the proposed gift design. Meanwhile, we will continue experimenting with chocolate 3D printing, adjusting printing parameters to enhance result differentiation across ambient temperatures and improve the consistency and stability of repeated prints.

Acknowledgement

This study was supported in part by JSPS KAKENHI (Grants JP23K25288)

References

1. Fernanda C. Godoi, Sangeeta Prakash, Bhesh R. Bhandari, 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects, *Journal of Food Engineering*, Volume 179, 2016, Pages 44–54, ISSN 0260-8774, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>.
2. Matthew Lanaro, David P. Forrestal, Stefan Scheurer, Damien J. Slinger, Sam Liao, Sean K. Powell, Maria A. Woodruff, 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation, *Journal of Food Engineering*, Volume 215, 2017, Pages 13–22, ISSN 0260-8774, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>.
3. Thaichon, P., Jebarajakirthy, C., Tatu, P., & Gajbhay, R. G. (2017). Are You a Chocolate Lover? An Investigation of the Repurchase Behavior of Chocolate Consumers. *Journal of Food Products Marketing*, 24(2), 163–176. <https://doi.org/10.1080/10454446.2017.1266551>
4. Jocelyn Spence, Boriana Koleva, Steve Benford, Dimitrios Darzentas, Martin Flintham, Kevin Glover, Hanne Wagner, Rebecca Gibson, and Emily-Clare Thorn. 2023. “More than a cliché”: Experiencing Hybrid Gifting in the Wild. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 30, 4, Article 55 (August 2023), 31 pages. <https://doi.org/10.1145/3577015>
5. Cindy Chan, Cassie Mogilner, Experiential Gifts Foster Stronger Social Relationships Than Material Gifts, *Journal of Consumer Research*, Volume 43, Issue 6, April 2017, Pages 913–931, <https://doi.org/10.1093/jcr/ucw067>
6. Smith, S.M., Vela, E. Environmental context-dependent memory: A review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review* 8, 203–220 (2001). <https://doi.org/10.3758/BF03196157>
7. <https://www.naturalmachines.com/foodini>
8. S. Tejaswi Peesapati, Victoria Schwanda, Johnathon Schultz, Matt Lepage, So-yae Jeong, and Dan Cosley. 2010. Pensieve: supporting everyday reminiscence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2027–2036. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753635>
9. Vasquez AN, Dockery SJ, Karanian JM, Wang Q, Stone CB. Sharing photographs on social media enhances recollection of photograph-related details. *Memory, Mind & Media*. 2025;4:e3. doi:10.1017/mem.2025.3
10. King, C. I., Panjwani, A. A., & Jacques, P. L. S. (2023). When having photographs of events influences the visual perspective of autobiographical memories. *Applied Cognitive Psychology*, 38(1). <https://doi.org/10.1002/acp.4150>
11. Boriana Koleva, Jocelyn Spence, Steve Benford, Hyosun Kwon, Holger Schnädelbach, Emily Thorn, William Preston, Adrian Hazzard, Chris Greenhalgh, Matt Adams, Ju Row Farr, Nick Tandavanitj, Alice Angus, and Giles Lane. 2020. Designing Hybrid Gifts. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 27, 5, Article 37 (October 2020), 33 pages. <https://doi.org/10.1145/3398193>
12. Rebecca Gibson, Boriana Koleva, Martin Flintham, and Heidi Winklhofer. 2023. Gifting the Past in the Present: An Exploration of Evoking Nostalgia through Hybrid Gifts. In *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1047–1059. <https://doi.org/10.1145/3563657.3596103>

デジタルファブリケーション技術と泥漿鑄込みによる 周期的セラミックセル構造体の製造

Fabrication of Periodic Ceramic Cellular Structures Using Digital Fabrication and
Slip Casting Techniques

植田 宗一郎, 齊藤 一哉

Soichiro UEDA, Kazuya SAITO

九州大学

Kyushu University

【要約】

本研究では、デジタルファブリケーション技術と陶芸の手法である泥漿鑄込みを利用して、周期的セル構造体をセラミックで製造する。これは気化熱を利用したエコクーラーへの応用が可能であり、最終的には評価実験を実施してプロダクトの提案を行うことを目標としている。これまで四角六片四角孔ねじれ正多面体の制作を行い、鑄込みにより適した形状と方法の点で課題が見つかった。より複雑な構造体を制作するために、石膏型以外での鑄込み方法を模索していく必要がある。

キーワード: デジタルファブリケーション, セラミック, 周期的セル構造体, 陶芸

【Abstract】

In this study, we fabricate periodic cellular structures in ceramic by using digital fabrication technologies and slip casting, a ceramic technique. This is applicable to an eco-cooler that uses the latent heat of vaporization, and our ultimate objective is to conduct evaluation experiments and make a product proposal. To date, we have produced the mucube and have identified issues regarding shapes and methods suitable for slip casting. To create more complex structures, it is necessary to explore slip-casting approaches other than plaster molds.

Keywords: Digital Fabrication, Ceramic, Periodic Cellular Structures, Pottery

1. 序論

近年、温暖化の影響などもあり、「ゼロエネルギー住宅」などが注目を集めている。それによって自然の力を利用した冷却方法の効果が期待されている。その1つが気化式冷房であり、先行事例として素焼きセラミックの壺を用いた非電化クーラー、孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体¹⁾(1996)の開発などがある。

本研究では、より有効な形状として周期的セル構造体(Fig.1)を利用する。周期的セル構造体とは、細胞状の要素が周期的に配置されることで構成される立体のことで、同一の形状を並べることで拡張でき、表面積が大きいことが特徴である。このことから、周期的セル構造体は高効率のエコクーラーへの応用が可能となる。材料には素焼きセラミックを使用し、製造手法には陶芸で使われる泥漿鑄込み法を用いる(Fig.2)。この手法の特徴は、大量生産に向いているという点であり、拡張可能な周期的セル構造体の製造に適していると言える。また、鑄込みに使われる石膏型は職人の手作業が基本であるが、3D プリンタや NC ルータなどのデジタルファブリケーション技術を応用することで、正確で複雑な形状の型を作ることが可能とする。

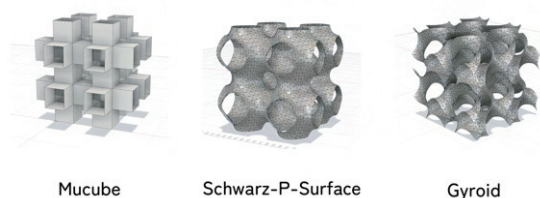


Fig.1. Examples of the periodic cellular structures

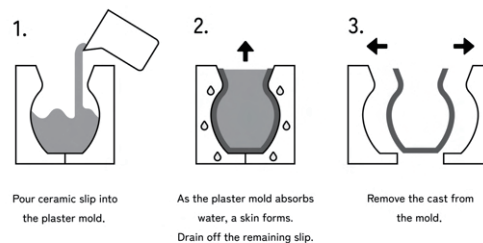


Fig.2. Slip Casting

2. 方法

3DCAD ソフト、3D プリンタ、NC ルータを用いて、セル構造体 1 ユニットの石膏型を制作する。泥漿鑄込み法により量産した際に複数ユニットを接合する方法を開発し、建材、家具スケールの周期的セラミックセル構造体を製造する。その後実験で環境制御機能を明らかにして、結果を元に改良を加え、エコクーラーやブラインド、

ファサードを提案する。

3. 試作:四角六片四角孔ねじれ正多面体の鋳込み

まず初めに, Coxeter²⁾(1938)が発見したねじれ正多面体の一種, 四角六片四角孔ねじれ正多面体の鋳込みを行った。

3DCAD ソフトを用いて, 作成するユニット形状を基に上下2分割の石膏型をモデリングした(Fig.3)。モデリングしたデータをFDM3DプリンタでPLAを使用して出力した後, この石膏型の形状を原型としてシリコンで型取りを行った(Fig.4)。得られたシリコン型に石膏を流し込んで硬化させ, 石膏型を得た(Fig.5)。鋳込み時には, 3Dプリンタで作成したパーツで挟み込み, 1面を除いた面の穴を塞ぐ(Fig.6)。これは吸水性のないPLA素材で蓋をすることで, 作成した多面体の穴が土が塞がないようにするためである。穴から半磁器土を用いた泥漿を流し込み, 5分後に排泥して30分以上乾燥させ, 型から取り外した。

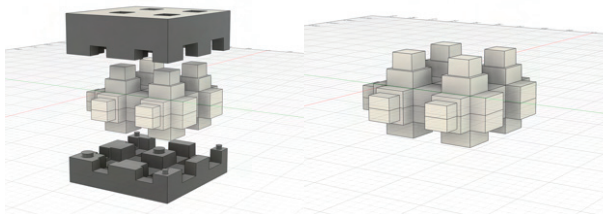


Fig.3. Model of the plaster mold and a single polyhedral

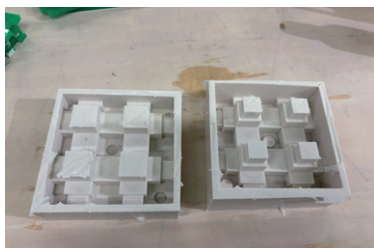


Fig.4. Silicone rubber mold

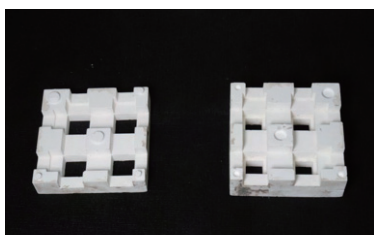


Fig.5. Fabricated plaster mold



Fig.6. Slip casting in progress

4. 結果

作成した多面体は Fig.7 のようになった。作成の際に角部分のひび割れが多く見られた。これは複雑な形状であるため, 乾燥時の収縮が原因であると考えられる。また, 脱型時の応力集中も考えられ, 面取りをする必要がある。

PLA 素材で挟む方法については, ある程度は土が付着してしまうためその効果は感じられず, 逆に鋳込み口が荒れてしまう結果となった。鋳込み口を伸ばして余剰分を切り落とす方法が適切であると考えられる。

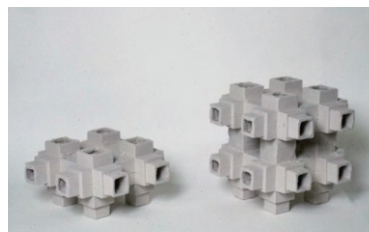


Fig.7. Fabricated mucube

5. 結論

鋳込みを行った結果, 大量に生産するための課題が多く見つかった。今後は機能性なども考慮した形状の再検討が必要であると考えられる。また, 鋳込みへの適性, 吸水性の評価など土の選定も行う。

現在結果を踏まえて, 構造が似ており, より滑らかな形状である Schwarz-P-Surface での検討を行っている。

さらに, その他周期的セル構造体(ジャイロイド構造など)の製造を行っていく。ジャイロイド構造は従来の鋳込み方法での製造が困難であり, 吸水性のある別の素材を用いた新たな鋳込み方法の考案が必要になってくる。また, 作成した多面体複数ユニットによる冷却効果を確かめ, 適切な形状を模索する。その後, プロダクト等のプロトタイプを制作し, 冷却効果の実験や被験者を用いた評価実験も実施する予定である。

参考文献

- 1) 白井一義, 梅干野晃, 堀口剛. 透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体の開発. 日本建築学会計画系論文集, 1996, 61.487: 61-68.
- 2) COXETER, H. S. M. Regular skew polyhedra in three and four dimension, and their topological analogues. Proceedings of the London Mathematical Society, 1938, 2.1: 33-62.

画像生成 AI によるインタラクティブ LED 加飾システムの提案

A Context-Aware Interactive LED Decoration System Driven by Image Generation AI

中島 次郎 , 波多野 亮平

Jiro NAKAJIMA , Ryohei HATANO

TOPPAN デジタル株式会社

TOPPAN Digital Inc.

【要約】

LED による加飾表現は空間演出に広く用いられるが、配線や発光パターン設計には専門知識を要し、その場での創作や編集は難しかった。既存の生成 AI による発光制御は LED 配列の 1 次元方向に依存し、対象物の 2D/3D 配置や形状を考慮できない。本研究では画像生成 AI を活用し、物理的コンテキストを反映させることで、ユーザ意図に応じて即時に発光パターンを生成・適用可能なインタラクティブ LED 加飾システムを提案する。これにより、環境や人に適応した、これまでにない LED 加飾体験を提供できる。

キーワード: LED 加飾, 生成 AI, Context-Aware Design, ControlNet

【Abstract】

LED decoration is widely used in spatial design, yet authoring spatiotemporal light patterns for physical hardware still demands expert skills. While prompt-driven tools can synthesize effects, they typically treat LEDs as a 1D strip, ignoring the host object's 2D/3D layout and geometry. We present an interactive LED decoration system that leverages image-generation AI to reflect this physical context. It instantly generates and maps lighting patterns based on user intent, conforming to the actual LED placement and surface shape. This approach offers a novel experience, enabling dynamic expressions adaptive to the surrounding environment and its users.

Keywords: LED Decoration, Generative AI, Context-Aware Design, ControlNet

1. 序論

照明は、都市空間や建築の外装、イベント演出などにおいて、人々の行動を誘発し、空間を演出する重要なメディアとして定着している。特に LED イルミネーションは、その小型・省電力・高輝度といった特性を生かし、製品や空間に豊かな彩りや情報を与える視覚的表現として広く利用されている。

一方、このような LED を用いた空間演出(LED 加飾)は、LED の配線や制御、発光パターン(配色及び点灯方法)の設計といった高度な専門知識に支えられており、空間ごとの個別設計と試行錯誤を前提としている。そのため、すでに LED 加飾された空間において、センサ等に応答して既存のデザインを切り替えることは可能でも、発光パターンそのものをその場で創作・編集することは困難であった。また、空間が変わるたびに物理的な LED 配置と周辺環境に整合した発光パターンを再設計する必要があった。

これに対し、近年は、AI 技術との統合により、事前に決められた発光パターンだけでなく、その場でユーザの意図により発光パターンを生成することが可能となった。例えば、LightGPM[1]は、感情や抽象的な雰囲気と言語(プロンプト)として入力すると、AI がその意図を解釈し、状況に最適な発光パターンを自動で生成する。

しかし、このような技術は AI が物理的な LED の配置情報を LED 配列の 1 次元方向のみでしか考慮できな

い限界がある。そのため、LED 自身の 2 次元あるいは 3 次元的な配置や、LED が配置される対象物の形状といった物理的コンテキストに合わせて発光パターンを生成することはできない。

本研究では、LED 加飾において、このような問題に対処するために、物理的コンテキストを考慮し、ユーザの意図に応じてその場で LED 発光パターンを自動生成する手法を提案する。これにより、LED による加飾対象物や配線を変更しつつ、かつ、発光パターンのデザインをプロンプト等によりその場で設定可能なインタラクティブ LED 加飾システムを実現する。

2. 関連研究

LED による情報提示技術に関する研究をいくつか紹介する。

MAKE IT BLUE[2]は、子供用ドレスにおいて、カラーセンサで赤/青の光を検出し、LED を駆動することで色が変化するドレスを提案している。ユーザのアクションにより事前に実装された発光パターンを変更することは可能であるが、その場でユーザの意図通りの色に変化させたり、LED 配線を変更したりすることはできない。

ChainFORM[3]は、LED アレイを搭載した小型モジュールを連結することで、形状変形と同期した LED による情報提示機能を搭載している。角度センサで推定した形状に基づいて提示パターンを各 LED に自動マッピ

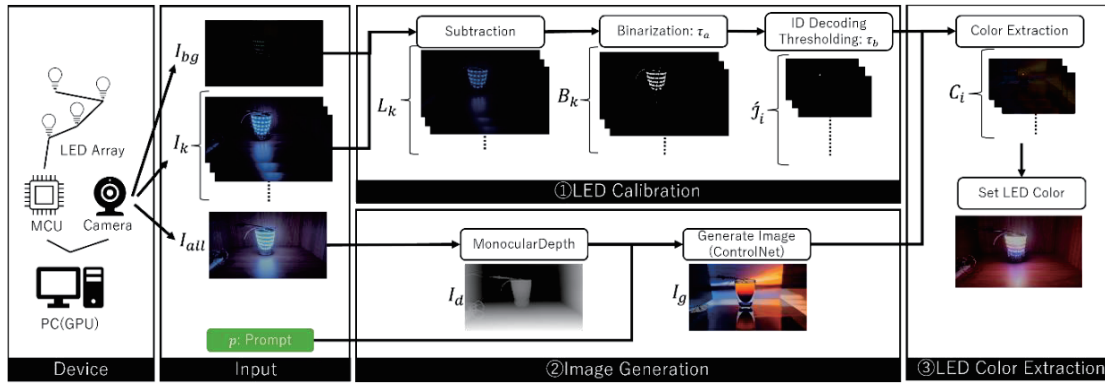


Fig. 1. Overview of the proposed method.

ングする。また, CoiLED Display[4]は, ストライプ上のフレキシブル LED ユニットを対象物に巻き付け, カメラで取得した点灯パターンから各 LED 位置を推定し, 任意形状の物体表面に画像やアイコンをマッピングする。これらの手法では, 表示パターンは主として事前に用意した画像に基づくものであり, 形状から意味的な表示内容を自動生成することはできない。

RoCuModel[5]は, 柔軟な曲線に沿って配置した LED アレイを高速回転させ, 回転対称形状の体積像を空間に描画し, 触覚的造形と 3D プレビューを統合する LED ディスプレイ表現を提案している。LED による 3 次元モデルの即時可視化を可能にする一方で, 表現は均一な単色発光を前提としており, RGB による色表現やテクスチャの提示には言及していない。

これらの研究では, LED による情報提示に関して様々なアプローチが提案されているものの, 物理的コンテキスト, ユーザ意図反映, 即時性, という 3 つの要件を同時に満たすには至っていない。これらの要素を統合することで, 環境や人に適応したインタラクティブな LED 加飾が可能となる。

3. 提案手法

本研究では, LED 加飾において物理的コンテキストに適応しつつ, ユーザの意図に応じてその場で LED 発光パターンを自動生成することを目的とする。提案手法では, カメラを用いて加飾対象を含む空間を撮影(以下, 空間画像と表記)することを前提とし, ①空間画像中の各 LED による光の影響度を推定するキャリブレーション処理, ②ControlNet[6]をベースとした画像生成処理, ③LED 発光色抽出処理により構成される。キャリブレーションにより得られた影響度マップは, 各 LED による光が空間画像中のどの領域に影響を与えているかを表している。また, 画像生成処理では, プロンプト等によりユーザ意図を反映させた画像を, 空間画像の構造を維持したまま生成する。したがって, 生成画像に対し, 影響度マップを用いて各 LED に対応する発光パターンを抽出することで, 物理的コンテキストに適応しつつ, ユーザ意図に応じて LED 加飾が可能となる。

提案手法で必要な機材としては, 個別に RGB の制御が可能な LED が複数連結された LED アレイと, LED

を制御するマイコン(MCU), カメラ及び, 画像生成用のマシン(GPU サーバ)である。カメラは露光設定を固定可能なものを用いる。

提案手法のフロー図を Fig. 1 に示す。以下, 各処理について詳しく説明する。

3-1. LED Calibration (Fig. 1. ①)

本研究におけるキャリブレーション処理の目的は, M 個の個別に制御可能な LED に対し, 各 LED の光が空間画像の画素に与える影響度を定量化した影響度マップを生成することである。本手法は, CoiLED Display[4]などで採用されているバイナリコードを LED の点灯に割り当てる手法をベースに, 各 LED に対する影響度マップを推定する。これにより 1 つずつ LED を点灯することなく, 少ない枚数の撮影で影響度マップを算出できる。

はじめに, M 個の LED に対して, $N = \text{ceil}(\log_2(M))$ 枚のビットパターン画像 I_k と, 1 枚の背景画像 I_{bg} の合計 $N + 1$ 枚の空間画像を取得する。 I_{bg} はすべての LED を消灯させて撮像することで取得する。 I_k は各ビット k ($k = 0 \dots N - 1$) について, LED ID のバイナリ表現における k ビット目が「1」である LED 群のみを点灯させ, 計 N 枚の画像を撮像することで取得する。

次に, 取得した画像を用いて, 各 LED i ($i = 0 \dots M - 1$) の影響度マップ J_i を計算する。まず, 各ビットパターン画像から背景画像を減算 ($L_k = I_k - I_{bg}$) し, 各ビットパターンの純粋な輝度画像 L_k を計算する。次にこの輝度画像を閾値 τ_a で二値化し, 各ビット k が ON である領域を示すバイナリマップ B_k を作成する。そして, 各 LED i の影響度マップ J_i をバイナリマップの乗算によって計算する。ある画素における影響度は, その画素で観測されたビットパターンが, LED i のバイナリ表現と完全に一致する場合に 1, それ以外は 0 となる。これは, i の k 番目のビットを $\text{bit}(i, k)$ とすると, 次式で表される。

$$J_i = \prod_{k=0}^{N-1} \begin{cases} B_k & \text{if } \text{bit}(i, k) = 1 \\ 1 - B_k & \text{if } \text{bit}(i, k) = 0 \end{cases}$$

最後に, 計算された影響度マップに対し, 閾値 τ_b 未満の値を 0 とすることでノイズを抑制し, 最終的な影響度マップ J_i とする。なお, 本実装では $i = 0$ の LED はバイナリ表現で常に全ビットが 0 となるため, $i = 0$ の影響度マップは常に 0 として扱っている。

以上の処理により, 各 LED が空間画像に与える影響

の空間的分布を示した M 枚の影響度マップが生成される。なお、影響度マップは LED アレイの配線が大きく変わることがなければ再計算は不要であり、3-1の処理は省略可能となる。

3-2. Image Generation (Fig. 1. ②)

並行する処理として、物理的コンテキストに適応しつつユーザ意図を反映させるため、空間画像の構造を維持したままプロンプト等による画像生成を行う。提案手法では、ControlNet[6]による画像生成を行う。

はじめに、空間画像として全点灯画像 I_{all} を取得する。 I_{all} はすべてのLEDを点灯させて撮像することで取得する。なお、背景画像 I_{bg} において空間が十分視認できる程度に明るい場合は、以下の処理において I_{all} の代わりに I_{bg} を用いてもよい。次に、 I_{all} に対し MonocularDepth によりデプス推定を行い、デプス画像 I_d を取得する。MonocularDepth は単眼のRGB 画像を入力としてデプス画像を推定することが可能である。提案手法では、DepthPro[7]によるデプス推定を採用する。ここで、ControlNet への入力空間画像の構造を維持できれば良いため、デプス画像以外にもエッジ画像や線画画像を用いてもよい。画像生成は、SDXL[8]などの画像生成モデルにControlNetを適用して行う。プロンプト p とデプス画像 I_d を入力し画像生成を行うことで、生成画像 I_g を生成する。ここで、空間画像の構造が維持可能なら、img2img による画像変換等でもよい。また、画像だけでなくデプス画像を条件動画として入力可能な動画生成モデルを用いることで、時間的に遷移する発光パターンを生成することが可能となる。

3-3. LED Color Extraction (Fig. 1. ③)

影響度マップ $\hat{I}_i$ を用いて、生成画像 I_g から各 LED i を発光させるRGB 値を抽出する。これは、影響度マップを重みとして、生成画像の色情報を各 LED に配分する処理に相当する。LED i を発光させるRGB 値 C_i は、次式で算出される。

$$C_i = S \cdot \sum_{x,y} \hat{I}_i(x,y) \cdot I_g(x,y).$$

ここで、 x,y は画像上の画素位置を表し、 S は全体の明るさを調整するためのスケール係数である。最終的に、算出された C_i は 8 ビット整数に変換され、LED の制御コマンドとして用いられる。この計算により、各 LED は、自身が照らす領域に表示される色の平均的な値を、自身の発光色として取得する。

4. 実験

本手法の有効性を検証する。検証内容としては、提案手法によるキャリブレーション・発光色抽出処理の精度検証と、LED加飾表現の多様性を示すことを目的に 3 種の異なる対象物への加飾結果に対し目視による評価を行った。

実験環境は、カメラとして C1000eRR, MCU として ESP32-DevKitC, カメラ入力・プロンプト入力・MCU 制御用のクライアント PC と画像処理・画像生成用の RTX A6000 による GPU サーバでシステムを構築した。カメラ

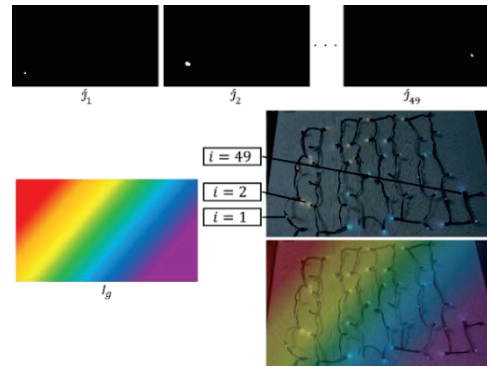


Fig. 2. Calibration and Color Extraction Results.

画像取得は 1280×720 の解像度で行い、各種画像処理は 640×360 の解像度で実行した。画像生成モデルとしては SDXL ベースのモデルで 1280×720 の解像度で画像生成を行った。また、画像生成用プロンプトは、日本語イメージを LLM に入力し、SDXL 用画像生成プロンプトへと拡張した結果を使用した。

4-1. 精度検証

精度検証では、50 個のLED(ALITOVE 50pcs ws2811)を平面上に配置し、提案手法を用いて各 LED の影響度マップを算出し、検証用画像の色を LED アレイで再現する実験を行った。また、色抽出する画像 I_g として斜め方向にグラデーションする虹色の画像を用いた。

精度評価の実験結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 では算出された影響度マップの中から、代表として $i = 1, 2, 49$ の結果、 I_g 、色抽出しLEDを点灯させた画像を示す。点灯画像は、比較しやすいように I_g を半透明化し重ね合わせた画像を追加で示している。影響度マップは、ノイズが残る場合もあるがLED の位置を抽出できていることが確認できた。また、点灯画像によると、LED の点灯が虹色のグラデーションをおおむね再現できていることが視覚的に確認できた。以上の結果から、提案手法により I_g の色を抽出し、物理的な LED アレイ上で再現可能であることが示された。

4-2. LED 加飾表現検証

3 種の対象物への加飾検証では、①階段、②PC、③コップ、というスケールとコンテキストが異なるカテゴリから選定した。①と②では BTF-LIGHTING WS2812B 5m 60LEDs/1m, ③では BTF-LIGHTING WS2812B 1m 144LEDs/1m を用いた。

対象物への加飾検証結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 では、対象物別に、点灯前の空間画像、2 種のプロンプトでの I_g 及び点灯後の空間画像を示している。ここで、空間画像はLED の発色が撮像しやすいように、実験で用いたカメラと別のカメラにて撮影を行っているため、 I_g とずれが生じている。

全体的な傾向として、生成画像で表現されるグラデーションが、LED においても表現できていることが確認できた。したがって、LED アレイの配列方向だけでなく、画像としてグラデーションのような表現が可能であることを示す。

次に、物理的コンテキストに着目すると、特に階段に

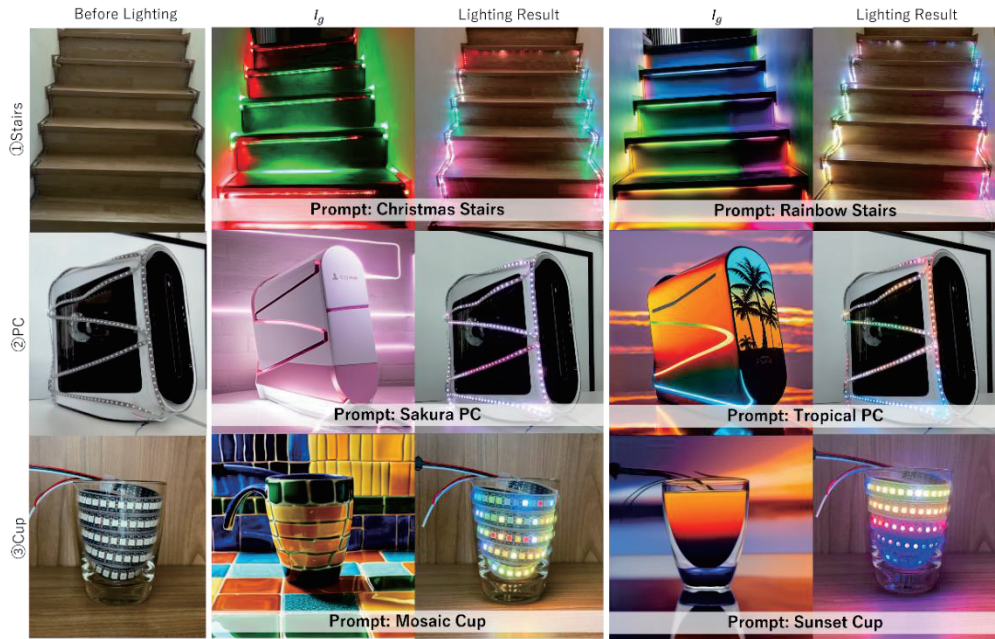


Fig. 3. Decoration Results for different objects.

において、 I_g で段ごとに色が変わるような表現が生成できており、LED においても色の変化を表現できたことを確認できる。したがって、階段形状のような物理的コンテキストを反映させた表現が可能であることを示す。

また、プロンプトを変えることで全く異なる点灯パターンを表現可能であることを確認した。したがって、ユーザー意図の反映というインタラクティブな体験が可能であることを示す。

最後に、実験結果から、LED加飾表現のユースケースアイデアを考案した。

①階段：季節やイベント、ユーザーに応じてリアルタイムに建築物を含む空間の表現を変更可能なため、エンゲージメントを高めるような空間体験へと活用。

②PC：プロダクトの表情をユーザーやプロダクトの状態に応じて変更可能なため、使用時の没入感を高めるためのパーソナライズ手法として活用。

③コップ：光の形状そのものを柔軟に変更し、形状に沿った光の表現が可能のため、形状を変化させ保持する機構をLED アレイに付与することで、インタラクティブに形状と発光を変更可能な新しいコミュニケーションメディアとして活用。

以上のアイデアを踏まえ、今後の課題は、入力と出力の両面から本研究を発展させることである。入力面では、センシング技術で多様なコンテキストを捉え、エンゲージメントの高い空間やパーソナライズされた体験の創出を探索する。出力面では、形状の変・保持機能を実装し、次世代コミュニケーションメディアとしてのプロトタイプの高度化を進める。

5. 結論

本研究では、画像生成 AI を活用し、LED の物理的な配置や対象物の形状といったコンテキストを考慮した発光パターンを、ユーザーの意図に応じて即時生成するインタラクティブな LED 加飾システムを提案した。

提案手法は、これまで専門知識を要した LED の空間演出の技術的ハードルを引き下げるものである。これにより、専門家でないユーザーでも、その場の環境や状況に合わせて直感的かつ試行錯誤を通じた創造的な表現が可能になる。

この研究は、LED 加飾を環境や人に適応し、その場で編集・共創される動的なメディアへと進化させる一歩であり、インタラクティブアートや空間デザインの領域に新たな可能性を拓くものである。

参考文献

1. Lepro:LightGPM,<https://www.lepro.com/pages/lepro-lightgpm>. Accessed: 2025-09-05
2. Mary Ellen Berglund, *et al.* “MAKE IT BLUE: A Controllable, Color-Changing Dynamic Costume”, ISWC(2018), pp. 236-241.
3. Ken Nakagaki, *et al.* “ChainFORM: A Linear Integrated Modular Hardware System for Shape Changing Interfaces”, UIST(2016), pp. 87-96.
4. 鈴永紗也ほか. “Coiled Display: 対象に巻きつけ可能なストライプ状フレキシブルディスプレイ”, TVRSJ Vol.26 No.4 pp.230-240, 2021.
5. Shen, Yuebo, *et al.* “RoCuModel: an iterative tangible modeling system”, TEI(2014), pp. 73-76.
6. Lvmin Zhang, *et al.* “Adding conditional control to text-to-image diffusion models”, ICCV(2023), pp. 3813-3824.
7. Alexey Bochkovskiy, *et al.* “Depth Pro: Sharp Monocular Metric Depth in Less Than a Second”, ICLR(2025).
8. Dustin Podell, *et al.* “SDXL: Improving Latent Diffusion Models for High-Resolution Image Synthesis”, [arXiv:2307.01952v1](https://arxiv.org/abs/2307.01952v1).

デザイン制作のリスクと保護

Risk and Protection of Design Product

市原 政喜

Masaki ICHIHARA

市原国際特許事務所

M. ICHIHARA & ASSOCIATES

【要約】

本稿は、4DFF関連の研究・開発の際に研究対象や製品の外観たるデザインの制作に伴い起こりうるリスクと、制作されたデザインの模倣からの保護に関するものであり、このようなリスクを回避あるいは低減するために、研究者や開発者がどのようにかかわることが可能か、またこうして制作されたデザインを保護する制度や手法を提案するものである。また、近年発達が目覚ましいAIによるデザインのリサーチおよび生成の法的側面についての現状の議論を紹介し、内在するリスクを検討する。デザイン制作のリスクを低減・回避し、デザインを保護することにより、適正な研究・開発および円滑な経済活動が可能となると期待される。

キーワード: デザイン, 著作権, 模倣, 侵害, 意匠権, 商標権, AI

【Abstract】

This paper is related to risks that may arise when producing designs as the external appearance of research subjects and products in 4DFF, and how to protect the produced designs from imitation. It also proposes how researchers and engineers can avoid or reduce such risks, and proposes systems for protecting the designs produced. The paper will also introduce current discussions on the legal aspects of AI-based design research and production, which has seen remarkable developments in recent years, and confirm the inherent risks. It is hoped that reducing and avoiding the risks of design production and protecting designs will enable appropriate research and production and smooth business processes.

Keywords: design, copy right, imitation, infringement, industrial design, trademark

1. 序論

3D プリンタ等を用いた造形により生成される研究対象物や製品は、何らかのデザインを有しており、そのデザインが意識して制作されたものか否かを問わず、すなわち一定のデザインを考慮して制作しているのか、たまたまそのようなデザインになったのかにかかわらず公開や販売などにより不特定多数者に公のものとなれば、権利の交錯する世界に置かれることとなる。一般的には、研究所や企業の知的財産権の他者との調整は知的財産部や法務部が担っているが、デザインを巡る状況が大きく変化している現在、研究・開発者が前提として課題や対処の基本を知っていることは業務を円滑に進めるうえで有効であると考えられる。

また、AI技術を用いたデザインのリサーチや生成は、現在の研究・開発においては欠くべからざるものとなってきたが、様々なデータベースからデータを抽出してくることに起因するリサーチの質の問題に加え、生成物の法的位置づけの議論が未だに続けられており、一度AIの使用の問題点を整理し、意識することは有意義である。

2. デザインの制作のリスク

2-1. 先行デザインに対するリスク

従来より、デザインにはその創作者に著作権などの

一定の権利の設定とともに制約が設けられており、相互に類似するデザインの法的状況が調整されている。基本的に、類似するデザインは先に創作された方が優先される。したがって、そのデザインが意識して制作されたものか否かを問わず、先行するデザインに類似する場合著作権の侵害の可能性など、一定のリスクが生じる。しかし、著作権の侵害はそもそも先行する類似デザインを知って創作したものでなければ成立しない(依拠性)ので、先行デザインの認識がなければリスクとはならない。

著作物該当性

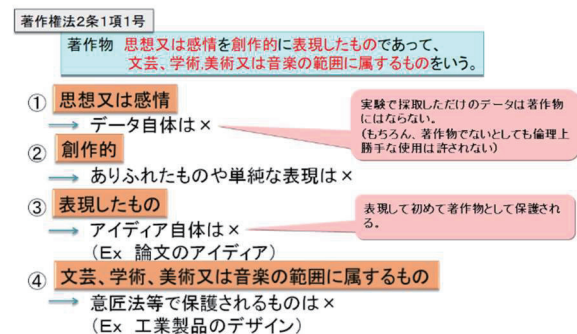


Fig. 1. Copy right and Industrial Design [1]

一方、4DFF で研究・開発されたデザインは一般に

工業デザインとなるから、上記 Fig. 1 に示すように著作権の対象とならないことが多いが、工業デザインを保護する工業所有権においては、著作権とは異なり依拠性を必要とせず類似すれば侵害に問われる可能性があるから、デザインを公開する際は、一定の調査が必要なることを念頭に置いておくことにより、リスク回避を行うことが可能となる。特に、制作されたデザインがその製品の機能に不可欠な形状や模様を有するものである場合は発表前に類似する先行デザインを確認しておくことを考慮する。

2-2 AI 技術利用時のリスク

4DFF 関連分野で研究・開発を行う際に、AI 技術を用いたデザインのリサーチを行う場合、データベースに保存されていないデータはリサーチ結果から漏れるので、これを前提とした対処が必要である。また、生成 AI 技術を用いてデザインを生成する際には、下記 Fig. 2 に示すように現在様々な議論が行われているが、基本的に先行デザインに類似するデザインが生成された場合、生成時に対象となったデータベースにその先行デザインが格納されていたときは、著作権の依拠性が認められることから、生成 AI により生成されたデザインは取り扱いに注意が必要である。従来からデザイン設計事務所では、著作権のクリアランスを行っているので、研究・開発上重要なデザインは生成 AI ではなく、設計事務所に依頼することも選択肢の一つであろう。

生成・利用段階での著作物の利用

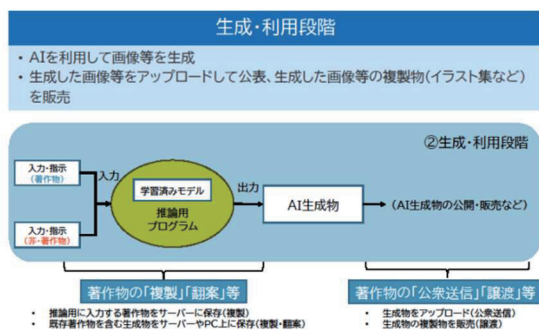


Fig. 2. Copy right of AI Product [2]

3. デザインの制作の保護

研究・開発に伴い制作されたデザインは、美観的に優れている、あるいは機能上必要な形状や模様を有している場合、そのデザインを模倣されることは研究・開発上にも想定外の影響を及ぼすこととなる。加えて、模倣品が先願主義のため先に工業所有権を取得した場合、自己のデザインを使用できなくなる事態も想定されることから、少なくとも重要なデザインであれば模倣から保護する必要がある。

ここで、工業デザインの場合、著作権の保護は限定的なため、工業所有権を取得して保護することが有効

である。特に意匠権は、下記 Fig. 3 に示すように近年その保護対象を拡大しており、通常の物品のみならず、建築物やインテリアなど従来著作権も含め保護が認められなかった対象も保護されるようになっている。例えば、3D プリンタで造形された建築物なども保護対象となる可能性がある。

さらに、意匠権以外に、商標権においても、研究・開発により制作されたデザインを立体商標として保護することが可能となっており、意匠権同様近年では建築物やインテリアを立体商標として保護することが可能となってきた。

以上の通り、ビジネス上重要なデザインが制作されたときは、著作権と異なり権利取得に一定の費用を要するが、工業所有権の取得も検討することがデザインの保護として有効である。

意匠法による保護対象の例

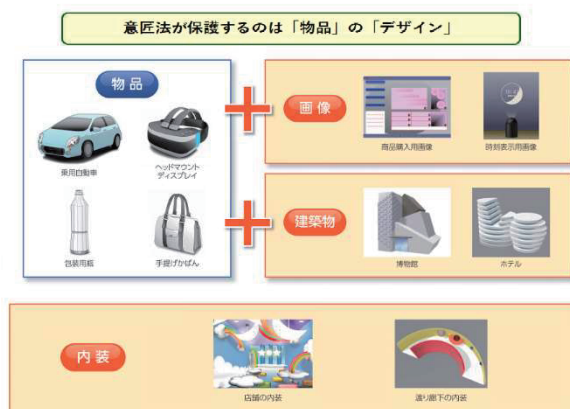


Fig. 3. Protection for Industrial Design [3]

4. 結論

研究・開発において、意識的か否かにかかわらずデザインを制作する際は、制作されたデザインに類似する先行のデザインが存在する可能性を意識して、必要であれば専門家の調査を考慮する。また、美観的に優れている、あるいは機能上必要な形状や模様を有するデザインが制作されたときは、工業所有権の取得を検討する。

参考文献

- 「理工系学生向けの知的財産権制度講座のための講義用資料～その他の知的財産制度(1) 著作権」(特許庁)
- 「AIと著作権」(文化庁)
- 「理工系学生向けの知的財産権制度講座のための講義用資料～その他の知的財産制度(2) 実用新案、意匠」(特許庁)

振動×柔軟性”でひらく新たな動き ——四方向移動ソフトアクチュエータの設計と4D 的応答の可能性

New Movements Opened by "Vibration x Flexibility" -- Design of a Four-Directional Soft Actuator and the Possibilities of 4D Response

清水 康央¹, 古川 英光²

Ko Shimizu¹, 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】

従来の振動ソフトロボットが持つ方向転換の課題を解決するため、ロボットの重心移動と各バイブレータの駆動パターンを調整することで、前後左右の全方向移動を実現し、その移動速度と直進性を実験的に評価した。素材と振動が環境と相互作用する4D 的な応答性も期待できる。今後は、がれき等の不整地探索への応用を視野に、「素材×振動×設計」による自律的移動の設計論を追究していく。

キーワード: ソフトロボット, 振動, 非対称性摩擦

【Abstract】

To solve the problem of changing direction that conventional vibrating soft robots have, we have achieved omnidirectional movement (forward, backward, left, and right) by adjusting the movement of the robot's center of gravity and the drive pattern of each vibrator, and have experimentally evaluated its movement speed and straightness. We can also expect 4D responsiveness, in which the material and vibration interact with the environment. In the future, we will pursue a design theory for autonomous movement that combines "material x vibration x design, " with a view to applying it to the exploration of uneven ground such as rubble.

Keywords: soft robot, vibration, asymmetric friction

1. 序論

近年、タイヤやキャタピラ、さらには生体模倣など様々な方法で移動するロボットが研究されている[1]–[3]. その中でも振動を利用した小型移動ロボットは、構造が単純で軽量、安価に製作できる利点から注目されている[4]. 振動モータによって機体に周期的な力を加えると、接触部の摩擦の非対称性により推進力が生じ、前進することが可能となる[5]. しかし従来の振動ロボットは、この摩擦特性や機体形状に依存するため進行方向が固定され、自由度の高い移動制御は困難であった。

本研究では、Fig. 1 に示す通り、サーボモータで駆動するアームを用いて機体の重心を動的に移動させることで、摩擦分布と反力方向を切り替え、DC モータによる振動駆動と組み合わせることで全方向への移動を実現する。本稿では、これら構造とシリコンと熱可塑性ポリウレタン(Thermoplastic polyurethane, TPU)製の2種類のロボットの移動性能を比較評価し、単純な機構を維持しつつ、自在な方向制御が可能となる設計を明らかにすることを目的とする。重心移動と振動への応答を統合した新しい4D 的な移動原理により、全方向移動が可能な小型ロボットを実現することで、極限環境での探索や教育研究用途への応用を目標とする。

2. 機体の構成と製作

2. 1. 機体設計

本研究では、素材および構造の異なる2種類のロボットを製作し、性能を比較評価した。管体の素材にはシリコンの「HTV-4000」(エングレービングジャパン社製)とTPUを用いた。脚部の形状は、角度3種類(45°, 60°, 90°)と厚さ3種類(1.0, 1.5, 2.0 mm)を組み合わせた計9パターンをFig. 2とFig. 3の寸法で各素材用意した。両機体ともに、加振用に直径10mm・厚さ3mmのDCモータ、操縦用にサーボモータ(MG90S)を搭載した。サーボモータには、Fig. 4のようなポリ乳酸(Poly-Lactic Acid, PLA)製の可動アームと4.5gの重りを取り付け、動的な重心移動を可能とした。さらに、ロボットの重心を不安定にするため、同じくPLA製の突起(半径3mm, 高さ7mm)を管体裏面の中心に取り付けた。

2. 2. 機体の構造と製作方法

管体およびアクチュエータの搭載方法は、Fig. 5の概要図に示すように素材ごとに異なる。

シリコンロボットは各辺にアタッチメントを取り付け、そこにDCモータをいれたが、TPUロボットでは中心にDC

モータと同じ大きさのくぼみをつけ、そこに DC モータをはめ込むことで搭載した。

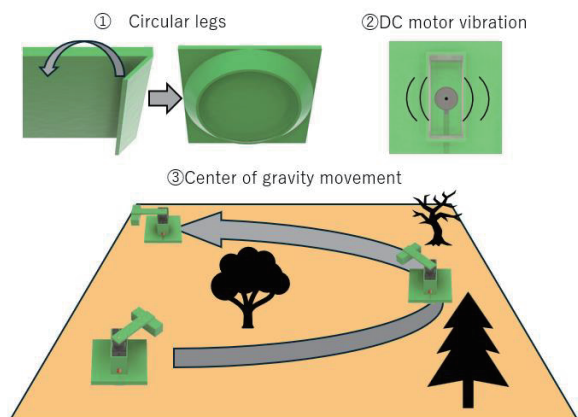
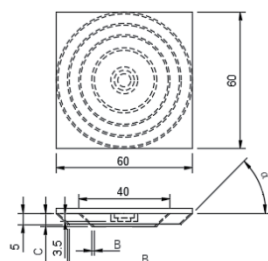
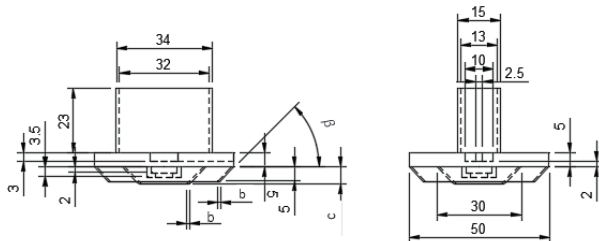


Fig. 1. The principle of movement of the robot in this study



	45° - 1.0mm	45° - 1.5mm	45° - 2.0mm	60° - 1.0mm	60° - 1.5mm	60° - 2.0mm	90° - 1.0mm	90° - 1.5mm	90° - 2.0mm
α	45	45	45	60	60	60	90	90	90
B	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	1.5	1.0	1.5	2.0
C	5.87	5.87	5.87	5.77	5.77	5.77	5.67	5.67	5.67

Fig. 2. Silicon robot dimensions



	45° - 1mm	45° - 1.5mm	45° - 2.0mm	60° - 1.0mm	60° - 1.5mm	60° - 2.0mm	90° - 1.0mm	90° - 1.5mm	90° - 2.0mm
β	45	45	45	60	60	60	90	90	90
b	1	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
c	6.11	6.11	6.11	5.95	5.95	5.95	5.80	5.80	5.80

Fig. 3. TPU robot dimensions

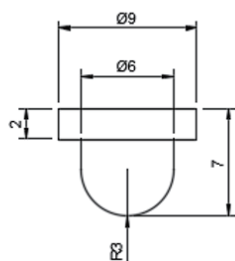
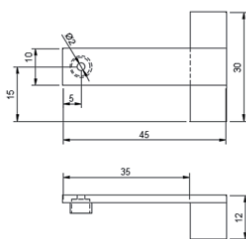


Fig. 4 Dimensions of the movable arm and protrusion

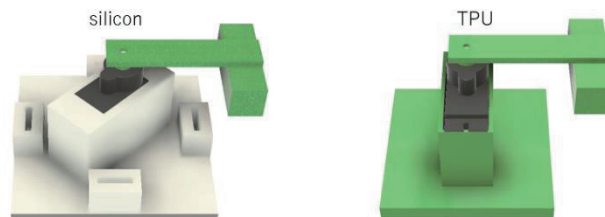


Fig. 5 Overview of each robot

2.2.1 シリコン製ロボット

筐体は基本形状を 60mm 四方の正方形とし、注型によって製作した。なお、本実験で用いるシリコン製機体は、各辺中点に DC モータを配置する 4 モータ方式を採用した。アクチュエータを搭載するためのアタッチメント(サーボモータ用 1 つ、DC モータ用 4 つ)も、筐体と同様に PLA 製の鋳型を用いた注型によってシリコンで別途製作した。最後に、完成したシリコン製筐体に、これらのシリコン製アタッチメントを後付けで接着し、アクチュエータを固定した。シリコンロボットの作成手順を Fig. 6 に示す。

2. 2. 2 TPU 製ロボット

筐体は基本形状を 50mm 四方の正方形とし、3D プリ
ンタを用いて直接造形した。アクチュエータの搭載部分
は筐体と一体で設計されており、サーボモータを取り付
けるためのマウント部分は筐体と一体で造形されている。
また、DC モータは筐体中央に設けた専用の窪みに圧
入することで固定した。

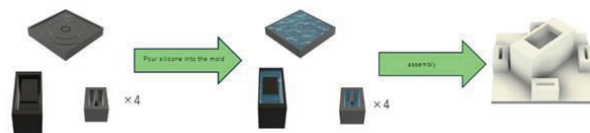


Fig. 6 Silicon robot creation procedure

3. 実験

3.1 実験方法

本研究で提案するロボットの移動性能を定量的に評価するため、シリコン製とTPU製の機体を用いて、移動性能の比較実験を行った。

実験環境として、Fig. 7 に示すように水平な机の上に描いた 50cm 四方の正方形を実験フィールドとし、その中心を原点(0, 0)、各辺に平行な線を直交座標軸として設定した。

実験手順は以下の通りである。まず、いずれか一方の試作機をフィールド中央の原点に設置し、進行方向をY軸正方向(+Y)に合わせた。次に、接続したArduino Uno にプログラムを書き込むことで DC モータを 5 秒間振動させ直進させた。この際、TPU 製機体では中央の単一モータを、シリコン製機体では進行方向に対して前方に位置する2つのDCモータを同時に駆動させた。停止後、機体中心の座標(x, y)を定規で計測し、記録した。この試行を、前後左右の 4 方向(+Y, +X, -Y, -X)全てにおいて各 3 回実施した。

上記の一連の計測を、両方の素材の試作機に対して、脚の角度と厚さをそれぞれ変えて同様に行った。

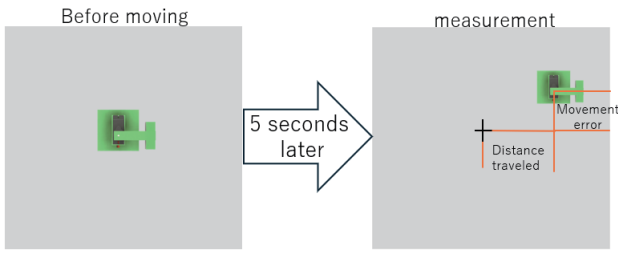


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental method

3. 2 実験結果

各試作機の移動性能を評価するため、全試行の最終座標から 3 つの指標を算出した。まず、総移動距離 (total distance traveled) は、原点から最終停止位置までの直線距離であり、機体の純粋な移動能力を示す。次に、誤差距離 (error distance) は、進行軸から垂直方向への変位 (X 軸進行時は $|y|$, Y 軸進行時は $|x|$) として定義され、機体の直進性を示す。最後に、有効距離割合 (effective distance ratio) は、総移動距離に対する有効移動距離の割合として算出し、移動の効率性を示す。この値は 1 に近いほど無駄なく目標方向へ進んだことを意味し、有効移動距離は進行方向への正味の移動距離 (逆進はマイナス評価) として算出した。シリコンロボットと TPU ロボットの指標をそれぞれ Table.1, Table. 2 に示す。横軸を平均有効移動距離、縦軸を平均軸ズレ誤差でプロットした性能評価マップを Fig.8 に示す。Fig.8 は各機体の総合的な走行性能を図示したものであり、グラフ上の右下に近いほど理想的な挙動を実行できていると評価できる。

3. 2. 1 シリコン製ロボット

Table.1 の結果を比較すると、脚角度が 90° の場合は、他の角度条件に比べて誤差距離が相対的に小さい値を示した。しかし、このとき総移動距離が短く、結果として有効距離割合は大きく算出された。このことから、直進性は高い一方で推進力が十分に得られず、全体の移動性能としては必ずしも優れていないことが分かる。また、脚の厚さの違いに着目すると、厚さ 1 mm の場合には、角度が 45° および 60° のいずれにおいても誤差距離が他の厚さのときよりも大きくなり、結果として有効距離割合が小さくなる傾向を示した。脚角度 45° かつ脚厚 1.5 mm の条件で有効距離割合が 0.92 と最も高い値を示し、Fig.8 ではシリコン製ロボットの中では最も右下に近い場所に位置し、シリコン材料を用いた試作機の中では最も優れた移動性能を発揮した。

3. 2. 2 TPU 製ロボット

Table.2 の結果に着目すると、脚の角度が 90° の場合には、すべての脚の厚さにおいて誤差距離が大きく算出され、有効距離割合が他の角度に比べて最も小さい値となった。これは、 90° という角度条件が移動効率の大幅な低下を招くことを示している。また、脚の厚さに

着目すると、厚さが 2 mm のときには、脚の角度 45° および 60° のいずれの条件においても誤差距離が他の厚さより大きくなり、その結果として有効距離割合が小さくなる傾向が確認された。一方で、角度 45° かつ脚の厚さ 1 mm の条件において総移動距離が 96.5 mm, 誤差距離 36.8 mm, 有効距離割合 0.87 と最も高い値を示し、Fig.8 において最も右下に近い場所に位置する結果になった。以上より、TPU 製ロボットにおいては角度 45° 脚厚 1 mm が最適条件であり、設計パラメータの違いが移動性能に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

angle[$^\circ$]	thickness[mm]	total distance traveled[mm]	error distance[mm]	effective distance ratio[%]
45	1.0	200.3	142.6	0.60
45	1.5	180.1	67.9	0.92
45	2.0	158.7	87.2	0.80
60	1.0	106.8	75.7	0.62
60	1.5	204.1	83.3	0.87
60	2.0	205.6	90.8	0.88
90	1.0	22.5	9.9	0.45
90	1.5	67.3	53.2	-0.56
90	2.0	45.4	19.1	0.31

Table. 1 Silicon robot measurement results

angle[$^\circ$]	thickness[mm]	total distance traveled[mm]	error distance[mm]	effective distance ratio[%]
45	1.0	96.5	36.8	0.87
45	1.5	78.8	65.9	0.41
45	2.0	71.3	52.8	0.30
60	1.0	167.4	143.5	0.21
60	1.5	139.2	87.4	0.72
60	2.0	115.2	98.8	0.18
90	1.0	163.8	157.6	-0.12
90	1.5	152.11	134.6	0.06
90	2.0	159.3	123.6	0.30

Table. 2 TPU robot measurement results

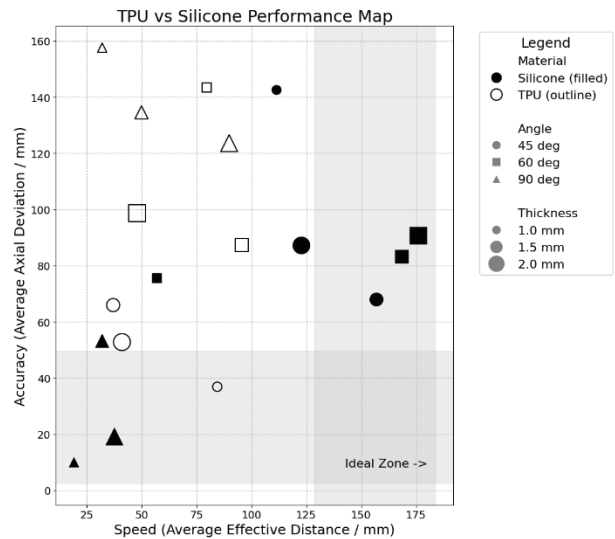


Fig. 8 Performance Evaluation Map

4. 考察

本研究では、脚角度および脚厚さを変化させた試作ロボットの移動特性を比較した結果、すべてのロボットにおいてある程度の誤差が生じることが確認された。この要因の一つとして、配線の張力など、実験環境に依存する外乱の影響が考えられる。これらはロボット本体の小型・軽量性ゆえに無視できない力となり、進行方向のずれや旋回を引き起こしたと考えられる。また、本研究の結果から、材料の違いや脚の幾何学的条件が移動

性能に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

まず角度条件に着目すると、90° の場合にはシリコンおよび TPU のいずれにおいても誤差距離が大きくなり、有効距離割合が他の角度に比べて最も小さい値となった。これは、脚が鉛直に配置されることで、接地時に非対称な摩擦が発生せず、振動による推進力が前進方向へと変換されなかったためと考えられる。一方で、シリコン製ロボットにおいて 45° や 60° の条件では、脚厚 1 mm のときに誤差距離が大きくなる傾向がみられた。これは、シリコンの柔らかい特性に加えて脚厚が薄すぎたため、脚のたわみが過度に大きくなり、進行方向への推進力が安定して得られず、結果としてロボットが曲がる・暴走するなどの挙動を示したためであると考えられる。

一方、TPU 製ロボットにおいては脚厚 2 mm の場合に誤差距離が大きく、有効距離割合が小さい結果となった。これは、脚が硬すぎることによって十分に振動せず、DC モータが発生する振動エネルギーを進行方向への推進力に変換できなかったためであると推察される。つまり、過度な剛性は振動エネルギーの伝達効率を低下させ、推進性能を阻害する要因となると考えられる。対して、角度 45°・厚さ 1 mm という条件では、DC モータの放射状に広がる振動を効率的に前進方向へと変換することができた。TPU 使用時には、厚さ 1 mm は剛性と柔軟性のバランスが良く、硬すぎず柔らかすぎないため、接地時に適度なたわみを生じつつも、非対称性摩擦が生じたことによって推進力を生み出すことができたと考えられる。この 2 つの条件が組み合わさったことにより、TPU 製ロボットの角度 45° 厚さ 1 mm の条件が最も高い移動性能を示したと考えられる。

さらに、シリコンと TPU で最適条件が異なった背景には、材料固有の柔らかさの違いや表面摩擦特性の違いが関与していると考えられる。シリコンは柔軟で大きなたわみを生じやすい一方で、TPU は相対的に硬さがあるため、脚厚の影響が異なる形で現れた可能性が高い。また、本研究においては DC モータの配置や数が異なる点も、移動特性の差を引き起こす要因の一つであると推察される。これらの要素が複合的に作用した結果、シリコン製ロボットでは角度 45°・厚さ 1.5 mm が、TPU 製ロボットでは角度 45°・厚さ 1 mm が最も優れた移動性能を示したと考えられる。

5. 結言

本研究では、脚角度および脚厚さを変化させたシリコン製および TPU 製の振動駆動ロボットを試作し、その移動特性を比較・評価した。その結果、材料特性や脚の幾何条件が移動性能に大きな影響を与えることが明らかとなった。特に、脚角度においてはシリコン、TPU の両材料においても影響が顕著であり、一定以上の角度は振動ロボットの走行性能において深刻な障害となることが判明した。また、使用材料や脚の厚さによる接地面積、摩擦分布の変化も機体の駆動に影響を及ぼし

ていることもわかった。

一方で、これらの振動ロボットに関するパラメータは複雑に影響を及ぼしあっており、最適な構造の模索が今後の課題となっている。また、本実験中において、複雑化した配線と、それによって発生する張力が各機体の走行データに影響を及ぼした可能性がある。無線化を通してこれらの外乱を排除するとともに、機体の設計の最適化が必要である。

以上の課題を克服し、走行性能及び実用性の改善を目指す。また、平面上だけでなく、砂や石などを含んだ不安定な足場での走行性能の調査も併せて実施することで、振動ロボットの極限環境における駆動の実現可能性を追求する。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、「NEDO 先導研究プログラム／マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」(JPNP14004)、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第 3 期／バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(管理法人:NEDO)(JPNP23025)、JSPS 科研費(基盤 A JP23H00498、JP25H00890、基盤 C JP24K12997、JP24K15231)、ムーンショット農林水産研究開発事業(MS511)等によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Russo, Matteo, and Marco Ceccarelli. "A survey on mechanical solutions for hybrid mobile robots." *Robotics* 9.2 (2020): 32.
2. Bruzzone, Luca, Shahab Edin Nodehi, and Pietro Fanghella. "Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review." *Machines* 10.8 (2022): 648.
3. Wang, Tianyu, et al. "Mechanical intelligence simplifies control in terrestrial limbless locomotion." *Science Robotics* 8.85 (2023): eadi2243.
4. Kim, D., et al. "On the forward and backward motion of milli-bristlebots." *International Journal of Non-Linear Mechanics* 127 (2020): 103551.
5. Cicconofri, Giancarlo, and Antonio DeSimone. "Motility of a model bristle-bot: A theoretical analysis." *International Journal of Non-Linear Mechanics* 76 (2015): 233-239.

大阪関西万博におけるトイレ「島の蜃気楼」の 3D プリント外装材の設計・製造から施工まで

3D-Printed Facade Design and Construction for the Toilet “Mirage of the Island” at the Osaka–Kansai Expo

田住 梓, 鷲見 良, 池本 祥子, 田川 直樹

Azusa TAZUMI, Ryo SUMI, Shoko IKEMOTO, Naoki TAGAWA

ND3M

【要約】

大阪・関西万博トイレ 7「島の蜃気楼」において、透明ポリカーボネート外壁を大型 3D プリンタで製作したプロセスを報告する。本計画は単なる外装材としての導入ではなく、素材の質感や製造上の制約をポジティブに解釈し、設計者との協働によってそれを活かす形態へとアップデートしていくプロセスに取り組むことで、風景に溶け込み、反射・透過・歪みを伴う蜃気楼のような外観を実現した。また過程で生じた失敗品をリペレットし再利用する循環利用のモデルケースとした。建築外装材としての 3D プリンティング素材の利用のモデルケースを社会実装として提示した。

キーワード: 3D プリンター, 建築, ファサード, 大阪・関西万博, ポリカーボネート, リサイクルペレット

【Abstract】

At the Osaka–Kansai Expo, Toilet 7 “Mirage of the Island” showcased the fabrication of transparent polycarbonate panels using a large-scale 3D printer. Beyond cladding, the project investigated how texture and production constraints could inform architectural expression through designer collaboration. The panels create a mirage-like facade that reflects, transmits, and distorts the surrounding landscape. Prototypes produced during experimentation were re-pelletized and reused as exterior benches, presenting a circular material cycle. This work demonstrates the architectural potential of 3D-printed façade materials and their reuse as a practical model of sustainable social implementation.

Keywords: 3D printer, architecture, Osaka–Kansai Expo, facade, polycarbonate, recycled pellets

1. 建築概要

大阪・関西万博施設内のトイレ 7「島の蜃気楼」は、3D プリントしたポリカーボネートを外装材として用いた仮設建築である。透明な素材に光や色が反射・透過することで輪郭が曖昧になり、周囲に溶け込む蜃気楼のような外観となっている(Fig. 1)。本建築は鉄骨造平屋建て、敷地面積は 201.51m²、建築・延床面積 100.81m²である。そのうち 3D プリント外装材パネルは、幅が 1.3m~2.3m 程度、高さは最大で 2.7mのパネル計 35 枚で構成されている。設計は、鈴木淳平・村部壘・溝端友輔の 3 名であり、筆者である ND3M は 3D プリントに関する部分の設計協力・製造を担当した。



Fig. 1. Completion Photo (by JUMPEI SUZUKI)

本建築は大阪・関西万博会場内の休憩所、トイレ等の設計を担う若手建築家を決定するコンペによって選出さ

れ、3D プリントに関しては、2023 年 10 月からの試験製造、その後 2024 年 8 月から 2 ヶ月間の本製造を実施した。建築本体の設計と 3D プリント外装材の試験製造を同時並行で行うことで、造形技術に関する課題を洗い出し、設計者と製造担当者の議論や試験の積み重ねを元に詳細設計を行った。本報告では、3D プリント外壁の実現に至るまでの一連の流れについて述べる。

2. 3D プリント外装材の実現性の確認

2-1. 試験製造時における課題

筆者らが参画する以前にも小さいモデルでの検討等は行われており、

- ・構造ではなく外装材として 3D プリントを用いること。
- ・シンプルな鉄骨の軸組に対して取り付け、パネルは波形状であること。

は決まっており、横幅の小さいパネルを試験製造することから実現可能性を探った。

まず、用いる材料については、住化ポリカーボネート株式会社からの提供が決まっており、層間の結着・造形後の収縮などに対して樹脂のグレード等を調整した。次に、造形幅や積層ピッチ等については、目標とするパネルの大きさに対して現実的な造形時間と、層間結着を得るための時間を考慮して設定し、その条件で強度試験を実施し、妥当性を確認した。

形状については、大きくふたつ、全体の板形状としての反りや歪みと、波形状に対しての収縮歪みの問題に分けられた。全体の板形状に対しては、パネル自体が

安定した形状ではないため、造形の歪みや揺れなどに影響され、パネルの垂直が確保できなくなってしまう。また、パネルの大きな形状としては円弧状で、その収縮による割れや定着不良、パネル全体の周期的な歪みが生じた。これに対し、パネルの波を大きくすればパネル自体が自立形状になるほか、全体での歪みが抑制されるが、逆に波部分での収縮に耐えられず造形中や造形後にパネルが割れる問題が発生することとなった。

また、パネル底面の反りについては、造形に伴い波の頂点や端部で大きく反ってくるが、治具などで抑え込みすぎるとパネルの強度が足りず、層間での割れにつながることも分かった。これらの問題は、今回用いる機器側で対策可能なことは限られていたことから、パネル形状の設計にフィードバックし、これらのバランスを探り、造形の安定を目指すこととした。



Fig. 2. Cracking due to residual stress and layer misalignment

2-2. 形状へのフィードバック

試験造形を行いながら、設計者側との協議により形状を調整した。まず、パネル自体の幅については大きくなるほどパネル全体の歪みは大きくなり、また、造形時間も長くなることから、最大の幅を決定した。全体に生じる周期的なパネル面の歪みについては、今回においては製造に伴い生じる制御できないパネルの表情としてポジティブにとらえ、解決するのではなく許容し、その代わりにパネルの波形状を自由にデザインすることを優先した。パネルの波に関しては、試験造形のなかで波のピッチと深さの関係性が分かってきた。目安となる比率を製造側から提示し、それでも意匠としてパネルの波が薄くなる部分も存在するため、その場合には隣接する波の形状を調整することや、パネル幅を小さくすることなどで対応することとした。

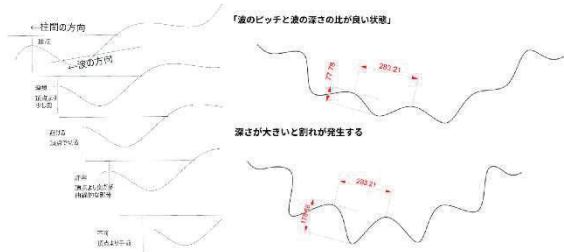


Fig. 3. Part of the shape rules shared with the design team

このように、パネル自体の歪みを許容するためには、パネルを取り付ける際の精度をどのように確保するかが重要となった。まず、パネル端部での鉄骨との接合部以外では他の建築部材と取り合うことの無いようにすることで、パネル中央部の歪みを許容した。端部については、歪みを吸収するパーツを両端に設け、造形後にカットすることで極力端部に反り等の影響がでないような設計とした。一方、反りは抑制できてもパネル形状に由来する大きな歪みは発生してしまうため、極力波ごとに歪みを完結させて全体へ歪みが波及しないようにすること、端部では波の終端位置と方向を、歪みが小さくなるように調整すること、の2点で対応することとした(Fig.3)。

また、試験造形を進める中で、造形の安定性を高めるために、いわゆるラフト的なパーツを設けることとした。薄いパネルを安定させる土台の役割に加え、これをそのまま反転させて建築の笠木的な役割をするパーツとして雨仕舞いを兼用することを考えた。パネル間で隙間等は生じるが、今回の壁部分は半屋外として壁面内側を水が伝うことは許容されており、直接雨が吹き込むことを防止する点では十分な性能を有している(Fig.4)。

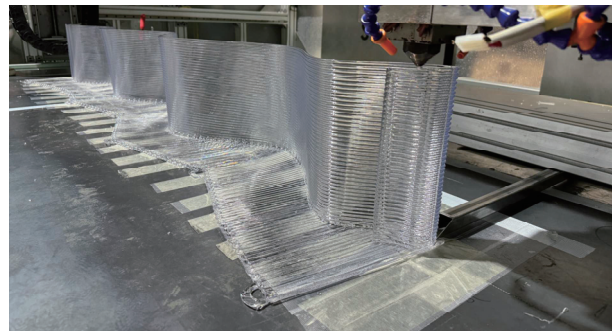


Fig. 4. A multifunctional component integrating the print base with rainproofing performance

2-3. 強度試験

造形可能なパネルサイズが概ね定まってきたところで、パネルの支持ピッチや大きさを決定するため、強度試験を実施した。造形したパネルから試験用のピースを切り出し、パネルそのものの強度と、接合部の強度を確認し、ディテールを決定した。また、ここでのピース切り出しや穴あけなどの作業を通し、応力の溜まり方や安全な加工方法についての知見も得ることで、施工方法も決められていった。

3. パネル形状の設計

3-1. パネルの構成

ここからは、試験造形でのフィードバックをふまえた、パネルの設計について述べる。パネルは大きく3種類から構成される。1つ目は、両端と上下で鉄骨から支持されている一般的なパネルである。2つ目は、入口部分など端部になるパネルで、屋根のない通路に設置されるため笠木パーツはなく、また、端部も鉄骨に覆いかぶさる形状になっているため造形が不安定である。そのため高さと波形状には大きな制約を設けた。3つ目は、内

壁として用いられるパネルである。バリアフリートイレは 3D プリントパネルの二重壁としており、その内壁は光は透過する乳白色のパネルとし、造形の安定のため、外壁とは異なる規則的な波形状としている。

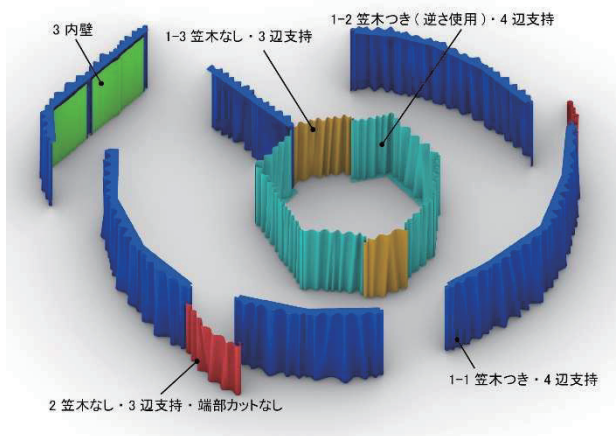


Fig. 5. Composition of the 3D-printed panel



Fig. 6. Semi-transparent interior wall panel
(photograph on the right by JUMPEI SUZUKI)

3-2. 形状の作成原理

大きな波形状を定義する上下の曲線と、その間を結ぶ直線からなる NURBS によって定義されている。パネル端部は極力歪みのない形状とするために端部に最も近い波は垂直に立ち上がるようにしている。パネルと笠木パーツの surface を設計チームから受領し、製造側では G-code 作成のために mesh 化し、造形時の付加パーツを追加する(Fig.7)。G-code 作成時の解像度や吐出の動作により表面に模様が発生してしまうことがあったため(Fig.8)、モデル作成にルールを設け、意図しないノズルの動きを極力発生させないようにしている。

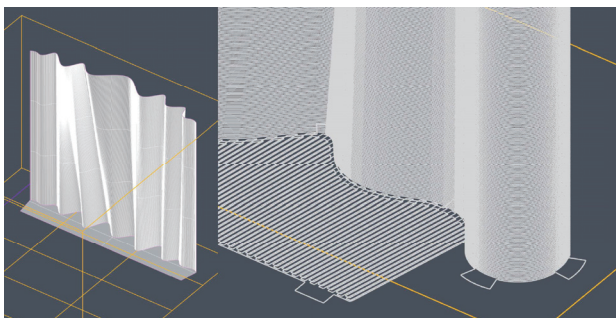


Fig. 7. Design model and generated toolpath for production

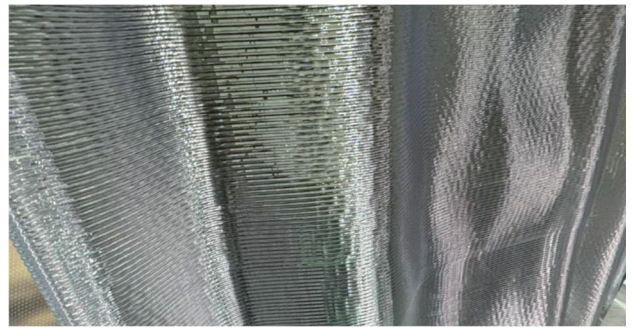


Fig. 8. Unexpected texture resulting from toolpath patterns.

4. 製造の品質管理

4-1. 外装材としての品質基準の設定

製造したパネルには品質基準を設け、合格品のみを用いた。主に、パネル形状・吐出不良・割れや積層ズレ、についての 3 項目を設けた。パネル形状については、「歪みの記録、管理」「パネル端部の歪み」「パネル中央の干渉チェック」「底面の反り」について定めた。吐出不良については、「材料管理」「吐出幅」「気泡の状況」について定め、割れや積層ズレについては一律 NG とした。いずれも、試験造形したパネルをもとに、美観と強度の両面から設計者と協議して品質基準を設けた。

4-2. AR を用いた精度管理

パネル中央付近の歪みは許容して意匠的要素として取り入れるようにしていたが、胴縁など他部材と干渉は避けなければならない。自由曲面のパネルは基準がなく測定が困難であり、また、干渉さえなければ 3D モデルと造形物の間に乖離があっても問題はないため、造形後に AR を用いて干渉及び 3D モデルとの差異を確認した(Fig.9)。なお、鉄骨と取り付け部等については別途歪みを計測し取り付け部の精度は確認している。

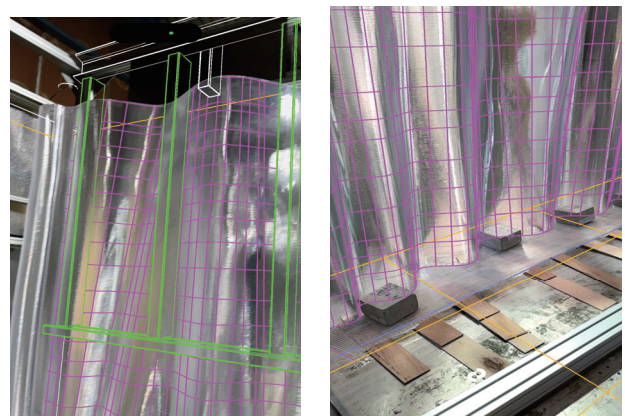


Fig. 9. Panel interference verification through AR

5. モックアップの実施

24 年 8 月末にモックアップを実施した。パネルの本製造は既に進行していたが、製造したパネルを仮組みをした鉄骨に取り付け、施工性や固定方法について現地と同じ状況で検証した。



Fig. 10. Full-scale mock-up for construction assessment

5-2. モックアップを通した製造へのフィードバック

本製造のなかでも造形難易度の高いパネルや、意匠を追求したいパネルは、製造後半に予定し、モックアップのフィードバックや蓄積した知見を反映できるようにしていた。モックアップでの課題を一つ例示する。

外装パネルの多くは、鉄骨軸組の上部と下部の両端で固定しているが、トイレ入口のパネルについては鉄骨軸組の下部からのみ固定している。また、通常は笠木パーツが上部にくるため造形時の反りが問題になることは少ないが、当該部分は造形時の下部がそのまま地中で埋め込まれる格好となっている。下部の固定は現場にて孔あけのうえ固定金物と取り合っているが、パネルの反りによるへりあき不足や留応力による割れのリスクが懸念された(Fig.11)。この解消のため、径の細いボルトのディテールへの改善・残留応力低減のため笠木パーツの削除・反り低減のためのパネル波形状の制約の追加、を協議により決定し、以降のパネルへ反映させた。

この他にも、笠木パーツの端部と鉄骨梁のクリアランス、鉄骨丸柱とパネル側端部のクリアランスなど、3DP パネルならではの歪みや精度について実際に組立ることを通じて、設計者・製造者・施工者の議論により、施工手順や品質管理について詳細を詰めていった。



Fig. 11. Detail of the lower joint in the mock-up

6. 造形不良パネルのリサイクル

大阪・関西万博では、サステナブルな取り組みや資源の利活用を推進している。そこで本建築の試験製造や製造時に失敗したパネルを用いたリペレット材を用いた家具製作に取り組んだ。リペレット材は、本製造とほぼ同等の造形条件を用いることができ、バージン材より若干黄色みがかかったような材料であった。

このリペレット材を用いたベンチは、「島の蜃気楼」の周囲に設置する3箇所のベンチのうち1箇所に採用し、「島の小さな蜃気楼」と題し、家具も建築本体の一部となり、そして風景に溶け込むことを目指すというコンセプト

のもとにデザインした。ベンチの脚を建築本体の外装材と同様の形状および製造方法によってつくられた波板とし、天板は存在感をなるべく消すように正面から見た時の水平ラインの厚みが薄くなるような断面形状とし、実際に設置されると、本体に溶け込みつつ本体の材料とリペレット材の対比がよく分かる。



Fig. 12. Bench constructed using re-pelletized material

(Photo by JUMPEI SUZUKI)



Fig. 13. Design incorporating elements of the architecture

7. 総括と今後の展望

大阪・関西万博には3D プリントを用いた数多くの取り組みが設置されている。3D プリントを用いた建築や空間デザインといえば、実用性のある建築事例よりもアートに近い事例が多い現状の中で、より実用的な建築への活用方法を模索した実践事例が本プロジェクトの位置づけであると考えている。今後、3D プリントを活用した建築においてデザイン性と品質を追求した建築や空間の在り方の事例が世の中に増えることを願う。

関係者一覧

設計:PONDEDGE+farm+NOD

担当:鈴木淳平(PONDEDGE), 村部 塁+藤本章子(farm), 溝端友輔(NOD)

設計監理:PONDEDGE+farm

構造設計:オーノ JAPAN

設備設計:ZO 設計室

3DP 設計協力・製造:VOID+ND3M

施工:セットアップ

卵パック由来のペレット式3D プリント用 リサイクル材料開発と地域内循環への展開

Development of Recycled Materials for Pellet-Based 3D Printers from Egg Packs
and Their Application in Local Community Circulation

矢田 美涼¹, 河合 慈英², 白石 慶彦¹, 鳥居 巧¹,
湯浅 亮平¹, 荒井 将来¹, 田中 浩也²,

Misuzu YADA¹, Jiei KAWAI², Yoshihiko SHIRAISHI¹, Takumi TORII¹,

Ryohei YUASA¹, Masaki ARAI¹, Hiroya TANAKA²

¹ 慶應義塾大学大学院, ² 慶應義塾大学

¹ Keio University Graduate School, ² Keio University

【要約】

市民から回収したプラスチック製卵パックを用いてリサイクル材料を開発し、回収地域で使用されるプロダクトにアップサイクルし地域に還元することで、地域内資源循環の実現を目指している。プラスチック製の卵パックは A-PET フィルムで成形されており、単一素材であること、汚れが比較的少ないこと、家庭から高頻度で排出され効率的に回収できることから、安定した資源としての活用が期待出来る。またリサイクル材料としては特異である、ピンク色とシルク調の質感を合わせ持つ材料になるため、その特性を生かした公共製品をデザインし製造を行う。ペレット式3Dプリンタを用いることで小規模な製品開発と製造を実現し、回収量に過不足なく生産し還元していくことで地域内資源循環において理想とされている、小さな閉じた循環が実現できると考えられる。また、卵パックは市民からの排出頻度が高い資源であるため地域内資源循環システムの可視化を行い市民参加の実感を持ってもらうことで、地域内資源循環の持続につながると考えられる。これらの製品の地域への還元及び、市民参加の実感を返礼品と捉えた、「資源クラウドファンディング」を提案する。

キーワード: 3D プリンタ, 3D プリント材料, リサイクル, リサイクル材料

【Abstract】

This research aims to realize local resource circulation by developing recycled materials from plastic egg packs collected from citizens, upcycling them into products used in the collection area, and returning them to the community. Plastic egg packs are molded from A-PET film. Being made of a single material, relatively clean material, and frequently disposed of from households for efficient collection, they hold promise as a stable resource. Furthermore, as a recycled material, it possesses unique characteristics: a pink color and a silky texture. We design and manufacture public products that leverage these properties. Using a pellet-based 3D printer enables small-scale product development and manufacturing. By producing and returning products in quantities that precisely match the amount collected, we believe we can achieve the ideal small, closed-loop cycle envisioned for regional resource circulation. Furthermore, since egg packs are a resource frequently discarded by citizens, visualizing the local resource circulation system and fostering a tangible sense of citizen participation is expected to contribute to the sustainability of local resource circulation. We propose “Resource Crowdfunding,” where the return of these products to the community and the tangible sense of citizen participation are treated as rewards.

Keywords: 3D printer, 3D printing material, recycling, recycled material

1. 背景

近年多くの自治体や企業でプラスチック分別回収が導入されているが、市民が回収したプラスチックがその後どのようにリサイクルされ、最終的にどのような製品になるかを実感する機会は少ない。多くの分別回収されたプラスチックは、破碎、選別、圧縮等の処理を経て回収地域外に輸出されるため[1]、市民がリサイクルのプロセスを追って知ることは難しい。こうした状況は、資源循環に対する市民の参加意識を十分に引き出せておらず、分別回収への動機付けや理解を得ることに課題がある

と考えられている。また、Bocken ら(2016)が示す「narrow, slow, close, regenerate」という循環型経済の設計戦略においては、小さな閉じた循環(close)の実現が、資源の価値保持と環境負荷低減に有効であるとされている[2]。この観点から、地域内で回収・再資源化されたプラスチックを再び地域に還元し地域内で利活用する仕組みを構築することは、循環の可視化を通じて市民の参加意識を高めるとともに、持続的な資源循環の推進に寄与すると考えられる。

プラスチック製の卵パックは高い透明度と柔軟性を持

つ A-PET フィルムで成形されており、単一素材であること、汚れが比較的少ないこと、家庭から高頻度で排出されるため効率的に回収できることから、安定した資源としての活用が期待出来る。また、国内で流通しているプラスチック製卵パックは無色透明とピンク色の 2 種類に限られるため(Fig.1), 着色剤を添加せずに鮮やかなピンク色のリサイクル材料が得られる。一般にリサイクルプラスチックは混色により灰色がかかる傾向があるが、卵パックは色調が限定されているため、市民に元製品を想起させやすい材料になり得る。

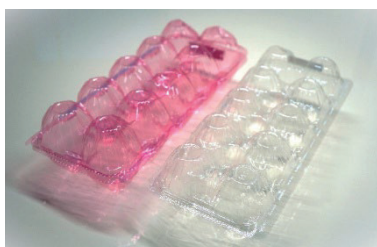


Fig.1 Two types of Egg Packs

2. 目的

本研究の目的は、地域から回収した卵パックを用いたペレット式 3D プリント用のリサイクル材料を開発し、その材料を活用したアップサイクル公共製品を地域内に設置することで、市民が資源循環を実感できる仕組みを構築することである。

特に卵パックは市民からの排出頻度が高い資源であるため、これを用いたアップサイクル公共製品の設置は循環への参加意識を喚起する有効な手段となる。また、特徴的な色彩を持つリサイクル材料を地域資源循環のシンボルとして位置づけ、そのデザイン実践を試みる。

さらに、3D プリントを活用することで小規模かつ地域資源量に応じた過不足のない製品開発・製造を行うことが可能になり、地域内資源循環において理想とされている「小さな閉じた循環」が実現できると考えられる[2]。

卵パックの回収過程からは、市民が「活動への期待」を抱いて資源を提供していることが明らかとなった。その期待への「返礼品」としてアップサイクル公共製品を提示し、市民参加の実感を高めることを目指す資源循環を地域に還元する新たな仕組みとして「資源クラウドファンディング」を提案する(Fig.2)。

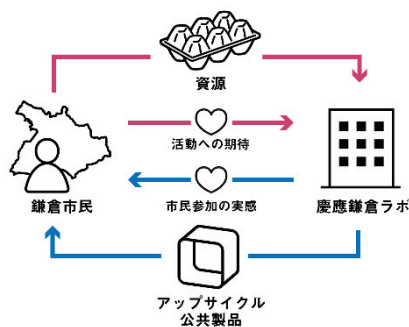


Fig.2 Resource Crowdfunding Explained

3. 先行研究と位置づけ

近年、廃棄プラスチックを用いたデザイン実践が国際的に展開されている。例えば、オランダのデザインスタジオ The New Raw による「Print Your City!」プロジェクト[3]や、イギリスの Smile Plastics[4] が挙げられる。

前者は、市民が持ち込んだペットボトルキャップなどの廃プラスチックを大型ロボットアームによる 3D プリントで都市家具へと転換し、循環の成果を公共空間に可視化する試みである。この事例は、大都市スケールにおける参加型リサイクルのモデルを提示した点に特色がある。

一方、Smile Plastics は使用済みプラスチックを圧縮成形し、テラゾー風の装飾性を持つパネルとして再生している。これらは家具や内装材に広く利用され、リサイクル素材そのものの色彩や質感を審美的価値へと昇華させた事例といえる。

これらに対して本研究は、公共空間にアップサイクル公共製品を設置することによる循環の可視化と、リサイクル素材の審美性の追求を継承しつつ、より小規模な地域での閉じた循環を基盤とする仕組み設計、実践的プロトタイプ提示に重点を置いている点で、独自性があるといえる。

4. 卵パックの回収と資源化

4.1. しげんポストプロジェクト

しげんポストとは、地域で集めた資源を使用し、地域のアップサイクル公共製品を制作するプロジェクトとして鎌倉市で始まった資源回収 BOX である[5]。2023 年 10 月より、プラスチック製卵パック回収用のしげんポストがリサイクリエーション慶應鎌倉ラボ前に設置された(Fig.3)。



Fig.3 Shigen Post Station

4.2. 卵パック回収状況

卵パックは、リサイクリエーション慶應鎌倉ラボ前の一か所での回収で月に約 200 個のペースで安定して回収されている。これは年間約 36 kg 回収される計算になる。家庭から週に約 2 個のペースで排出されるため、市民参加の頻度が高いことが特徴である。

4.3. 卵パック回収後の処理

卵パックは、家庭から回収されたものであり、基本的に食品残渣などの汚れは少ないが、ラベルシールが付着している場合がある。そのため、事前処理としてハサミを用いてシール部分を切除した。また、卵パックはフィルム素材であり、薄く軽量なため、本研究で使用する粉砕機に直接投入しても刃に十分に噛み込まず粉砕が進行しにくい。このため、投入前に卵パック全体を手で絞るように圧縮して塊状にし、粉砕機で効率的にフレーク化できるようにした。得られたフレークは、その後乾燥機により乾燥処理を施し、押出成形用の前処理とした(Fig.4)。



Fig.4 Strained egg packs and flaked egg packs

4.4. ペレット状バージン材料との混合と造形

本研究では、卵パック由来の A-PET を単独で使い、ペレット式材料押出型 3D プリンタによる造形を試みた。しかし、原料がフレーク状であるためスクリューへの供給が不均一となり、押出挙動が不安定となった。さらに、A-PET は層間接着性に乏しく、造形物の強度が十分に得られなかった。以上の理由から、本研究環境において A-PET 単独での実用的な造形は困難であることが確認された。

造形の安定化を目的として、バイオベース PC である Durabio® ペレット(三菱ケミカル製)[6]と A-PET との混合による利用を検討した。A-PET フレークをペレット式 3D プリンタに安定的に供給するためには、ペレット化を行うことが望ましい。しかし、卵パック由来のフィルム状フレークをリペレットに安定して投入し、均一なストランドとして押出・冷却・カットすることは本研究環境では困難であり、十分な再現性を得ることができなかった。

そこで本研究では、ペレット状の Durabio®とフレーク状の A-PET を直接ドライブレンドし、その混合物を大型のペレット式 3D プリンタである IRORI(S.lab 製)に投入して造形を行った(Fig.5)。通常 24mm/s 程度のノズル移動速度に対して、50% 程度速度を落とすことでエクストルーダのスクリュー内で溶け合いながら押し出されるため、不均一な見た目になることを抑えることが出来る。これをペレタイザに繋ぎペレット化する方法も試したが、速度が遅く効率が悪いため断念した。また、ペレットとフレークの混合比率を段階的に増やしていったところ、A-PET の割合が 20%を超えると押出および造形の安定性が著しく低下したため、20%を上限とした。



Fig.5 A mixture of Durabio® and flake-shaped egg packs

4.5. カラーバリエーション

国内で流通しているプラスチック製卵パックは、無色透明と赤卵用に多く用いられるピンク色の 2 種類に大別される。そのため、着色剤を添加することなく、ピンク色由来の鮮やかな色調を有するリサイクル材料を得ることが可能である。

本研究では、無色およびピンク色の卵パックフレークの混合比率を調整し、3 種類のカラーバリエーションを有するリサイクル材料を作成した(Fig.6)。



Fig.6 Three types of egg pack recycling materials

さらに、Durabio®と A-PET を混合して押出成形を行ったところ、シルク調の質感が観察された。PC 系樹脂と PET 系樹脂のブレンドにおいては微細な相分離構造が形成される可能性があり[7]、この構造が可視光の散乱や干渉を誘発し、その結果としてシルク調の外観が発現したと考えられる(Fig.7)。

以上の結果より、シルク調の質感を有し、かつグラデーションなピンク色を持つ卵パック由来のリサイクル材料を得ることができた。グラデーションなカラーはペレット式 3D プリンタならではの造形表現として生かすことのできる特徴である。



Fig.7 Egg pack recycling material output sample

5. デザイン実践

本研究におけるデザイン実践では、地域内資源循環を市民が実感するきっかけとして、特徴的な質感と色彩を有する卵パック由来のリサイクル材料を用いて、地域

におけるシンボリック的存在としてアップサイクル公共製品を制作・設置することを目指す。

特に地域市民の目に日常的に触れる場に配置することが重要であると考え、公共空間において使用される製品を想定した複数のプロトタイプを提案する。

5.1. ランプシェード

卵パック由来のリサイクル材料でピンク色～白色の滑らかなグラデーションカラーが造形できた(Fig.8)。シルク調の質感が透過光によって美しさが一層際立つことから、ランプシェードとしての活用に適していると考えられる。

現在鎌倉市において分庁舎建設の企画提案が上がっており、市民利用を目的とした公共スペースの拡充が期待される。これらの空間における照明器具に、卵パック由来のリサイクル材料を導入することで、市民の日常的な利用環境において本材料が視認される機会を増加させ、地域資源循環のシンボルとしての役割を果たすことが期待される。



Fig.8 Egg pack recycled material lampshade

5.2. ミニ三角コーン

小型の三角コーンでささやかなエリアの分割ができる。従来の三角コーンでは主張が強すぎて景観を損なってしまう場面でも、やさしい色彩とミニサイズでその影響を軽減できる(Fig.9)。また、光が透過する性質を生かして内部に照明を仕込み、光る三角コーンとして設置することで、夜間の足元の注意喚起にも使用できる。



Fig.9 Egg pack recycled material Mini traffic cone

6. まとめと展望

本研究の卵パック回収、資源化、アップサイクル公共製品の造形、設置というフローを通して「資源クラウドファンディング」という概念を示した。

その構想の一環として、地域で回収した資源の材料化を行い、さらにその材料を用いたアップサイクル公共製品のプロトタイプ制作を実施した。

今後はデザイン実践として試作した製品を地域内施設に実際に設置し、市民における資源循環の実感や参加意識の向上をアンケートやインタビューを行い検証する必要がある。また、材料研究の観点からは、卵パック由来のリサイクル材料における A-PET の混合比率を増加させる検討や、PETG との混合による透明性の向上など、さらなる改良の余地が残されている。

参考文献

1. Kamakura City, “Youki housou plastic bunbetsu shite dashita ato, dou naru no? [What happens after separating plastic containers and packaging?],” *Note* (2025). Available: <https://kamakura-city.note.jp/n/n06d632f7e5f9>.
2. N. M. P. Bocken, S. Short, P. Rana, and S. Evans, “Circular business model experimentation: Demystifying assumptions,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, 122596 (2020). Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122596>.
3. Print Your City, “Print your city,” (2025). Available: <https://www.printyour.city/>.
4. Smile Plastics, “Smile plastics,” (2025). Available: <https://smile-plastics.com/>.
5. Shigen Post, “Shigen post,” (2025). Available: <https://shigenpost.com/>.
6. Mitsubishi Chemical, “PC (polycarbonate) product information,” (2025). Available: https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/pc/product/1200363_9344.html.
7. Y. Kong and J. N. Hay, “Miscibility and crystallisation behaviour of poly(ethylene terephthalate)/polycarbonate blends,” *Polymer*, vol. 43, no. 6, pp. 1805-1811 (2002). Available: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00772-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00772-8).

謝辞

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

3D プリンターの魅力を多くの人に知ってもらうには？

How can we get more people to discover the appeal of 3D printers?

永井 健太, 山本 周

Kenta NAGAI, Shu YAMAMOTO

聖学院中学校・高等学校

SEIGAKUIN JUNIOR & SENIOR HIGH SCHOOL

【要約】

本実践は、筆者が「3D プリンターの魅力を多くの人に知ってもらうには？」というテーマで中学 1 年生から現在(高校 2 年生)までの約 5 年間取り組んできた活動の軌跡である。ガチャガチャイベントや Tinkercad を用いた名札作成、Fusion による USB ケーブルリール教材などのワークショップを実施し、学校内外延べ 130 名の小中高生が参加した。これにより、創造の楽しさと実用性を伝えるとともに、将来のデジタルものづくり人材育成にも資する意義を考察した。
キーワード: 3D プリンター, ワークショップ, 教育, ワクワク, 楽しさ

【Abstract】

This practice is an activity the author has pursued for approximately five years, from seventh grade through the present (eleventh grade), centered on the theme “How can we help more people discover the appeal of 3D printers?” Workshops were held, including gachapon events, name tag creation using Tinkercad, and USB cable reel teaching materials created with Fusion. Approximately 130 elementary, junior high, and high school students participated in total. This initiative conveyed the joy and practicality of creation while also exploring its significance in fostering future talent for digital manufacturing.

Keywords: 3D printers, workshops, education, excitement, fun

1. 序論

Society 5.0 の実現に向けた社会全体のデジタル変革(DX)が進む中、産業界における「ものづくり」のプロセスは根底から変容しつつある。従来の金型などを用いた大量生産方式に加え、デジタルデータから直接的に立体物を造形する 3D プリンターに代表されるデジタルファブリケーション技術が台頭し、個々のニーズに応じた多品種少量生産やラピッドプロトタイピングを可能にした。

このような社会および技術の変化を背景に、次世代のイノベーションを担う人材育成が急務とされており、教育現場でもその対応が求められている。近年、その具体的な動きとして教育現場ではデジタルファブリケーションの導入が進み、文部科学省の「高等学校 DX 加速化推進事業(DX ハイスクール)」の影響もあり高等学校への 3D プリンター導入が加速している。採択校では機器の増設や校内実習、探究活動への組み込みが報告されており、新たなものづくりの担い手を育むための制度的な追い風が生まれている。

しかしながら、本研究で報告する一連の実践は、こうした公的な支援が本格化する以前に筆者自身の体験的動機から始まったものである。筆者は中学 1 年生の時に自校の FabLab に初めて触れた際の「衝撃」と「ワクワク」を契機に、現在(高校 2 年生)まで約 5 年間にわたり

自発的に 3D プリンターの普及のためのワークショップを企画・運営してきた。これにより、個人発の教育実践が制度的支援と重なり合うことによって、どのように普及の効果が強化されるかを実地的に検討する好機が得られたと考える。

本稿では、「3D プリンターの魅力をどのように多くの人に伝え、継続的な学びや創作へつなげるか」という問いを立て、Tinkercad を用いた入門的ワークショップ及び Autodesk Fusion を使用し、発展的な学習へと結びつける「USB ケーブルリール」という教材を用いた中級ワークショップに関する実践等、約 5 年間の実践記録(延べ約 130 名対象)を整理・分析する。そして 3D プリンターの教育機関へのさらなる普及に向けた実践的示唆を提示することを目的とする。

2. 本実践の具体的な内容

2.1 中学 1 年生

筆者が 3D プリンターに初めて出会ったのは中学 1 年生の時である。学校内の FabLab で実機に触れた際、「頭に思い描いたものを自らの手で形にできる」という無限の可能性に大きな衝撃と強いワクワクを感じた。この体験を契機に、3D プリンターの魅力をより多くの人に伝えたいという思いが芽生え、実践を開始した。

中1でまず行ったことは、ガチャガチャを作成しその中に私や同級生、先輩が3Dプリンターで制作した作品を詰めて子ども達に渡すという実践をした。MDF板やアクリル板等を使用し、レーザーカッターで制作、Panasonic Center TOKYOで子どもたちに手にとってもらい、3Dプリンターの存在を知ってもらうこと、3Dプリンターで様々な形状が作れることを伝えるということを行



った。

図1.中学1年生、ガチャガチャイベント時、実際の画像

2.2 中学2年生

中2からは、実際にモデリングから印刷までを実際に体験してもらうことを目的に、初心者向けにTinkercadを用いた名札作成ワークショップを展開した。初めてのワークショップを行った場所は、東京都文京区にある文京区放課後青少年プラザ「b-lab」であった。



図2.中学1年生、ガチャガチャイベント時、実際の画像

このTinkercadを用いた名札作成ワークショップは、

頭の中に膨らんだ想像を実際にモデリングを行い3Dプリンターで印刷をすることで「創るワクワク・楽しさ」を持ってもらった。参加者からは、「どんな風にしよう」「犬の名前にしてケージにつけようかな」などといった声があった。



図3.Tinkercadを用いたモデリングワークショップの 作例

2.3 中学3年生

中3の時には校内で@club ファブラボという有志団体を立ち上げ、先輩から同級生、後輩まで仲間を集めて人材育成を行いながら、校内で新入生にワークショップを行い、校外では他校や図書館など、様々な場所でワークショップを行った。

@club ファブラボでの人材育成の結果、所属する学生達は3Dプリンターなどのファブ機材が扱えるようになるので、その学生の友達を連れて放課後にファブラボに来て一緒に創作活動をする姿も見られるようになり、club ファブラボに所属するという流れができるようになっていった。

その中で、生物部向けに金魚の隠れ家を作る学生や、特に中学生は家族へのプレゼントとしてファブ機材を活用し始める学生が現れるようになった。

だが、このワークショップは、tinkercadに元々用意されている四角形などの形から削るのが参加者にとっては少し難しく、名札の枠組みを用意した後に自分で好きな文字を打ち込んでもらい、少し形がいじれるようなワークショップしか行ってこなかった。ただ、名札と言ってもあまり実用性は低く、印刷した後は飾っておく程度にしかできず、それでは3Dプリンターの魅力は伝わりづらいと考えた。

2.4 高校1年生

そこで高1の時に本格的なCADソフトであるFusion360を使用したワークショップの教材開発をし、Fusion360が使えるようになれば大体の3Dモデルは作成できるので、3Dプリンターの強みでもある、自由にほぼなんでも作れるという魅力を最大限知ってもらえると考えたからである。主に中高生向けに「大体の機能が学べて」「印刷したあとも使いやすいもの」をコンセプトに、「USB ケーブルリール」というモデルの教材を開発した。



図 4.「USB ケーブルリール」のデータイメージ

この教材は、Autodesk Fusion の基本的な機能であるスケッチ、押し出し、切り取り、ネジ付け、ネジ穴の作成、回転、フィレットの 7 個の機能がこれ一つで学ぶことができ、参加者が USB のケーブルをまとめるグッズという実際に日常生活で利用できる、実用性の高い教材となった。これらの基本機能を学ぶことができ、実用性が高いものを自分の手で作れるのは 3D プリンターの魅力を体感できる、究極の教材となった。この教材のプロトタイプは、日本図学会が主催する第一回 全国高校生デジタルモデリングコンテストにて審査委員長賞を受賞した。実際に、このワークショップを試験的に筆者が所属するゼミでワークショップを行ったところ、効率的に習得し、その習得した技術を元にゼミの活動でガンダムを作成したり、自助具の開発を進める学生が現われた。

さらに、当時筆者が 2 期生として所属していた、鎌倉の社会課題をものづくりで解決するプロジェクト、「FabQuest」のチーム内でこの教材の教え方のフローをそのままに、プロジェクトに役立つ形でワークショップの実践を計 2 回行った。そのうち 1 回は今まで行ってきたワークショップと同じような形のワークショップだったが、もう 1 回はモデリングワークショップでは初めての、zoom を活用したオンライン開催を行った。1 対 1 であったこともあるとは思いますが、スムーズに進めることができると判明した。これにより、印刷を伴わないワークショップで少人数であれば、遠方にいる人にもワークショップが可能ということになる。

Tinkercad 及び Autodesk Fusion を使用したワークショップを延べ約 130 名の小中高生に対し、実施をした。参加者からは、「以前から CAD に興味があったので、今回のレクチャーはとても参考になった」「3D プリンターを使って、自分でデバイスの補助パーツを作りたい」となどの声が寄せられた。こうした反応から、3D プリンターの持つ可能性と影響力の大きさを改めて実感している。

3. 本実践を行う意義と効果

こうした取り組みの意義は二点にある。第一に、3D

プリンターを「触れるきっかけ」として提示することで、創造活動に対する関心を高められるということである。参加者にとって、3D プリンターは特別な研究機材ではなく、身近に活用できる道具であると感じてもらえることができるということ。参加者からは「CAD に前から興味があって参考になった」「自分のデバイス用パーツを作りたい」といった感想が得られている。これらのフィードバックより、3D プリンターに対するワクワクや、ものづくりの楽しさを提供でき、新たな分野の学びを継続させる原動力を生み出すことができる点であると考ええる。

第二に、製造業において人材不足が深刻化しており、経済産業省による「ものづくり白書(2025 年)」では、デジタル技術の導入に際し「約 6 割の企業が社内人材を活用・育成して対応している」と報告されており、3D 設計や CAD などの技能を持つデジタル人材育成の必要性が高まっていることが示されている中、学校教育段階で基礎的なデジタルファブリケーション経験を積むことは、将来的な人材育成にも資するという点である。

したがって、本実践は単なる工作体験にとどまらず、個々の学習者にとっては創造力を育む入り口となり、社会にとってはデジタルものづくり人材の裾野を広げる取り組みであると位置づけられる。

4. 課題点と今後の展望

本実践には一定の成果が見られた一方で、いくつかの課題も明らかになった。

第一に、ワークショップを実施できる場所が依然として限られている点である。現状では DX ハイスクール対象外である中学校、特に公立校での開催が難しく、また活動地域も首都圏に限定されている。そのため、今後は地方へも展開していく必要がある。

第二に、開催場所が「すでに 3D プリンターを備えている学校や施設」に限定されている点である。より多くの人に 3D プリンターの魅力を伝えるには、機材のない学校や地域にも自らプリンターを持ち込み、体験の場を提供していくことが求められる。

これらの課題を踏まえ、今後の展望としては、公立中学校を主な対象とし、ワークショップ活動をさらに広げていくことを目指す。将来的には起業の形で活動を基盤化し、全国規模で展開できる体制を築くことを視野に入れている。

5. 結論

本実践を通じて、3D プリンターの魅力を多くの人に伝えることの意義と可能性を改めて確認することができた。特に、参加者が 3D プリンターからものづくりへの関

心を高め、自らのアイデアを形にする喜びを体験する姿は、本活動の大きな成果であるといえる。

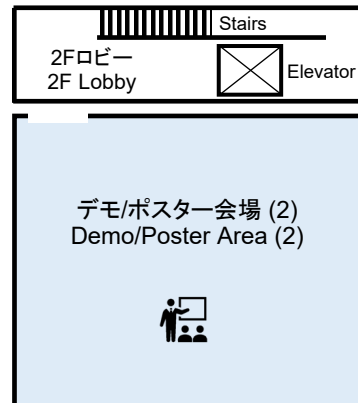
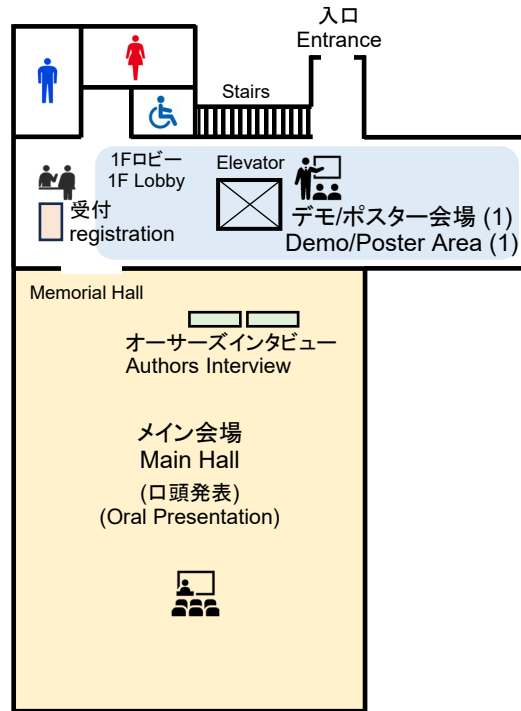
一方で、活動の場が限られていることや、機材の有無に依存していることは課題として残されている。今後は、公立中学校を中心に対象を広げ、全国規模で 3D プリンター関連の教育を展開できる体制を築くことを目指したい。本活動を継続し発展させていくことで、次世代を担う人材の育成と社会全体のデジタルものづくり文化の普及に貢献できると考える。

参考文献

1. 経済産業省, “令和 6 年版 ものづくり基盤技術の振興施策(ものづくり白書)”, 経済産業省 (2023).
<https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2025/pdf/gaiyo.pdf>
2. 文部科学省, “令和 7 年度 高等学校 DX 加速化推進事業(DX ハイスクール)”, 文部科学省 (2025).
https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/shinkou/s_hinko/mext_02975.html

現地会場案内 Venue Layout

京都工芸繊維大学 60周年記念館
Kyoto Institute of Technology 60th Anniversary Hall



4DFF2025大会実行委員会

実行委員長

津田 和俊 (京都工芸繊維大学)

副実行委員長

藤井 雅彦 (慶應義塾大学SFC研究所)

湯浅 亮平 (慶應義塾大学)

実行委員 (五十音順)

青木 まゆみ (慶應義塾大学)

市原 政喜 (市原国際特許事務所)

臼井 昭子 (山形大学)

大柏 宣栄 (武藤工業株式会社)

貝沼 友紀 (山形大学)

寛 康明 (東京大学)

木脇 幸洋 (株式会社ブリヂストン)

古賀 洋一郎 (プロメシアン株式会社)

高橋 茂樹 (山形大学)

竹内 達夫 (日本画像学会)

竹之内 崇 (三菱ケミカル株式会社)

常盤 拓司 (北海道大学)

徳田 雄嵩 (KDDI総合研究所)

中野 雄太 (三菱ケミカル株式会社)

山岡 潤一 (慶應義塾大学)

予稿集発行日(予稿公開日)

2025年10月14日

(OP-05, DP-12は2025年10月21日公開)

4DFF2025公式サイト

<https://sig4dff.org/conference/2025/>



4DFF研究会



一般社団法人
日本画像学会



KYOTO
Design Lab

京都工芸繊維大学
KYOTO Design Lab