

修士論文 2025 年度

布と 3D プリントによるテクスチャー付与型枠の可能性  
—コンクリート触覚表現への応用を目指して—

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

汪明靖

# 修士論文 2025 年度

## 布と 3D プリントによるテクスチャー付与型枠の可能性 —コンクリート触覚表現への応用を目指して—

### 研究要旨

本研究は、布地への 3D プリンティング技術をコンクリートの布型枠として応用し、新たな触覚表現を有する表面テクスチャの転写手法を確立することを目的とする。

これまで、布地への 3D プリンティング技術は異素材間の定着強度に課題があり、主に視覚的な魅力が注目されてきたが、本研究では実用的な建材型枠へと開発を広げ、これまでにないコンクリート形状を実現した。具体的には、布地の収縮応力と熱可塑性樹脂の支持力を利用した自己形成プロセスをデジタル制御し、独自の造形システムを構築した。また、実験過程で生じた「コンクリートの自重による型枠の変形」という課題に対し、刷毛を用いた積層手法を応用した補強法を開発した。布型枠の表面を事前に硬化させた後にコンクリートを充填することで、布特有の有機的なかつ精緻なテクスチャーをコンクリート表面に定着させることに成功した。

実証実験のために制作したプロトタイプを用い、ウォータース竹芝での公開実験を行った。その結果、冬季の温水循環とテクスチャーの相乗効果が、鑑賞者の「触りたい」という接触行動を誘発することを確認し、触覚を介して水が拡散する効果が得られた。技術面においては、通常のコンクリートと比較して表面積を約 20% 増大させることに成功し、開発した布型枠は 7 回以上の再利用が可能な実用性を実証した。なかでも、硬質なコンクリートでありながら、温かなテクスチャーによって「柔らかい」という質感の変化を来場者に体験させた点は、本研究が提示した予想外の感性価値である。このような制作物は、都市空間における環境制御と人々の身体的な関わりを同時に再定義する、新たなメディアとしての可能性を提示したものである。

キーワード:

1. 3D プリンティング、2. 自己形成布地、3. 型枠、4. コンクリート

Master's Thesis Academic Year 2025

# Exploring the Potential of Fabric and 3D Printing in Creating Textured Formwork : Toward Tactile Expression in Concrete Surfaces

## Abstract

This study aims to establish a method for transferring surface textures with novel tactile expressions by applying 3D printing on fabric as a fabric formwork for concrete.

While 3D printing on textiles has previously faced challenges regarding bond strength between different materials and has primarily focused on visual aesthetics, this research expands its development into practical formwork for building materials, achieving unprecedented concrete geometries. Specifically, an original fabrication system was developed by digitally controlling a self-shaping process that utilizes the shrinkage stress of the fabric and the structural support of thermoplastic resins. To address the challenge of formwork deformation caused by the weight of the concrete, a reinforcement method was developed by applying a brush-on layering technique. By pre-hardening the surface of the fabric formwork before filling it with concrete, we successfully stabilized organic and precise textures inherent to textiles on the concrete surface.

Public experiments conducted at Waters Takeshiba using a functional prototype confirmed that the synergy between winter hot-water circulation and the surface texture strongly induced “active touch” among viewers. The experiments demonstrated that the tactile diffusion of water (warmth) could be achieved through this interaction. Technically, the method successfully increased the surface area by approximately 20% compared to standard concrete and demonstrated practicality with the fabric formwork being reusable more than seven times. Notably, providing visitors with a tactile shift—perceiving hard concrete as “soft” through its warm texture—represents an unexpected sensory value presented by this research. This work suggests the potential of a new medium that simultaneously redefines environmental control in urban spaces and the physical engagement of people.

## Keywords

1. 3D printing, 2. Self-shaping textiles, 3. Formwork, 4. Concrete

# 目次

<b>第 1 章. 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究目的 .....	1
1.2 導入 .....	1
1.2.1 [布 × 3D プリンタ] .....	1
1.2.2 [布 × 型枠] .....	4
1.2.3 [型枠 × 3D プリンタ] .....	8
1.2.4 3 要素の統合による造形システムの再構築 .....	11
1.3 コンクリートのメディア性と可塑的表現 .....	13
1.3.1 流動的本質と布型枠による形状の規定 .....	13
1.3.2 コンクリートと水が織りなす表面のテクスチャ .....	14
1.4 本論文の構成 .....	16
<b>第 2 章. 先行事例</b> .....	<b>17</b>
2.1 概要 .....	17
2.2 伸縮性素材と積層造形の融合 .....	17
2.2.1 形状可変インテリア .....	17
2.2.2 建築スケールへの拡張 .....	18
2.3 デジタル技術による伝統的テキスタイル工法の拡張 .....	19
2.3.1 スモッキング技法を用いたプログラマブルな幾何学成形 .....	19
2.3.2 布型枠侵食防止と護岸保護への応用 .....	20
2.4 3D プリント型枠領域 .....	21
2.4.1 砂型枠とトポロジー最適化による超軽量構造体の創出 .....	21
2.4.2 環境調整機能を備えた高精細コンクリート外装材 .....	22
2.5 総括と本研究の立脚点～Cooling Panel の分析に基づく課題の特定～ .....	22
<b>第 3 章. 布地と 3D プリントを融合させた造形システムの構築</b> .....	<b>24</b>
3.1 自己形成布地を用いた型枠の造形概要 .....	24
3.2 布プリンティングする機材と布の準備 .....	24
3.2.1 使用 3D プリンタの仕様 .....	25
3.2.2 機材の調整 .....	25
3.2.3 使用布地の詳細 .....	27
3.3 布プリンティング .....	27
3.3.1 布地の固定プロセス .....	27
3.3.2 ノズル干渉回避策 .....	30
3.3.3 ベッド高低差によるプリンティング品質 .....	34
3.3.4 熱可塑性樹脂の種類検討 .....	35
3.3.5 布地伸縮率の計算 .....	36
<b>第 4 章. 自己形成布地を用いた布型枠の試作と転写実験</b> .....	<b>38</b>
4.1 布型枠の形状検討と実験の目的 .....	38

4.1.1 概要	38
4.1.2 ボトム密閉型	38
4.1.3 二次加工型	43
4.1.4 考察	44
4.2 テクスチャー転写手法の改善	45
4.2.1 概要	45
4.2.2 一括充填法による試行	45
4.2.3 刷毛塗布法による打設手法	47
4.3 布纏材の製作と意匠展開	49
4.3.1 概要	49
4.3.2 制作詳細	50
4.4 コンクリートタイルの表面積測定	59
4.4.1 造形成果と考察	60
<b>第5章. 布型枠を用いた制作“±2°C Concrete”</b>	<b>61</b>
5.1 概要	61
5.2 水との相互作用による質感の変容	61
5.2.1 濡れたコンクリート	61
5.2.2 触覚を介した環境制御の提案	62
5.2.3 結果	66
5.3 公開実験「±2°C Concrete」の設計と製作	67
5.3.1 コンセプトと設計要件	67
5.3.2 支持機構の設計	68
5.3.3 支持構造の製造	69
5.3.4 水循環システム	70
5.3.5 布纏材の量産	71
5.3.6 技術まとめ	73
5.4 ウォーターズ竹芝”±2°C Concrete“	76
5.4.1 実施当日の状況	76
5.4.2 温度観察	77
5.4.3 人との関わり方	78
5.5 考察	84
<b>第6章. まとめ</b>	<b>86</b>
6.1 本研究の成果	86
6.2 今後の課題	86
6.3 社会的意義	86
6.4 結びに代えて	87
<b>参考文献・出典</b>	<b>89</b>
<b>謝辞</b>	<b>92</b>

# 第 1 章. 序論

## 1.1 研究目的

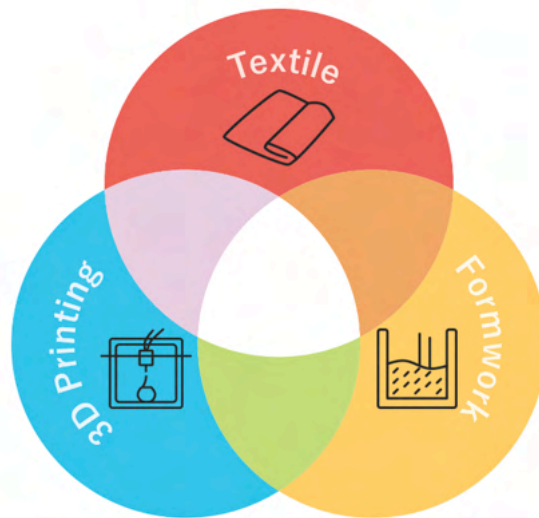


図 1: 本研究に関わった三つの要素の概念図

本研究は「布」「3D プリンタ」「型枠」の三つの要素を用い、新しい型枠の造形技術を開発する。布プリンティングで制作した自己形成布地を用いた布型枠技術により、コンクリート表面に微細なテクスチャーを付与する布型枠技術を確立し、制作物までこの技術の実証実験を行う。

これからはそれぞれ二つの要素を取り上げ、関わった先行事例を紹介する。

## 1.2 導入

### 1.2.1 [布 × 3D プリンタ]

デジタルファブリケーションが普及した現在、多様な工作機械の中でも 3D プリンタは重要な役割を担っている。3D プリンタは、ものづくりのあり方を工業時代の大量生産から、個人のニーズに応じたカスタマイズの時代へと変容させた。その過程で 3D プリント技術からは多くの派生技術が誕生し、布地と結合させる手法も現れている。現在、3D プリンティング技術と布地を組み合わせる手法は、その生成プロセスと素材の関係性にに基づき、概ね以下の 3 種類に大別される。

#### 1. 3D プリントによる布の模倣：

微細なパーツを連結した状態で出力することで、布のようなドレープ性を持つ構造体を構築する手法。（例：Iris van Herpen “Escapism” collection [1] / Nervous System “Kinematics”[2]）



図 2: “Escapism”. Iris van Herpen. 2011 (左)、“Kinematics”. Nervous System. 2014 (右)  
([1, 2] より引用)

## 2. 布自体の 3D プリンティング生成：

熱可塑性樹脂の吐出不足を意図的に制御し、擬似的な織物構造を生成する手法。  
(例：MIT Media Lab “DefeXtiles”[3])



図 3: “DefeXtiles”. Jack Forman, Mustafa Doga Dogan. 2020  
(<https://vimeo.com/465508515?fl=pl&fe=sh> より引用)

## 3. 布地への 3D プリンティング：

既存の布地の上に樹脂を直接造形し、複合材化させる手法。(例：MIT Self-Assembly Lab “Active Shoe”[4] / Self-Forming Structures[5])

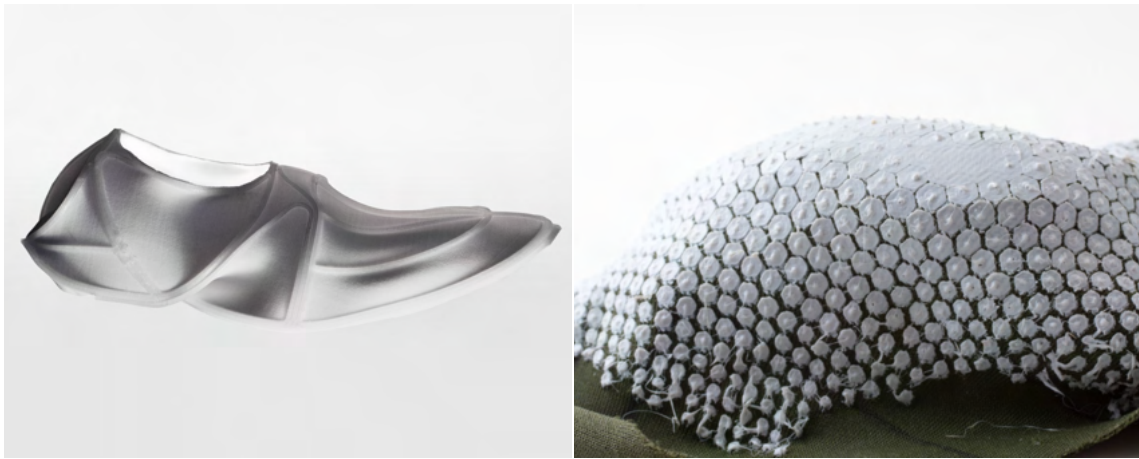


図 4: “Active shoe”. Christophe Guberan, Carlo Clopath. 2013 (左)、“Self-Forming Structures”. Gabe Fields. 2018 (右)  
([4, 5] より引用)

本研究では、これらの中で3つ目の「布への3D プリンティング」を主要技術として着目する。熱可塑性樹脂を溶解して布表面にプリンティングし、繊維の隙間に含浸させることで定着させる。

また、布地の種類によって「伸縮性のある布地」に分けられ、具体的に本研究では「自己形成布地」(Self-forming textiles / Self-shaping textiles) という技術に着目する[6]。これは図5のように、あらかじめ伸長させた布の上にロッド (rod) をプリンティングし、造形後に外力を取り除くことで、布地が元の形状に戻ろうとする収縮力と、樹脂の曲げ剛性が釣り合う均衡点において、平面であった布が自発的に三次元形状へと変形する。このプロセスは、XYZ 軸の空間次元に「時間」という軸を加えた造形手法であることから、この技術は「4D プリンティング」とも定義される[7]。

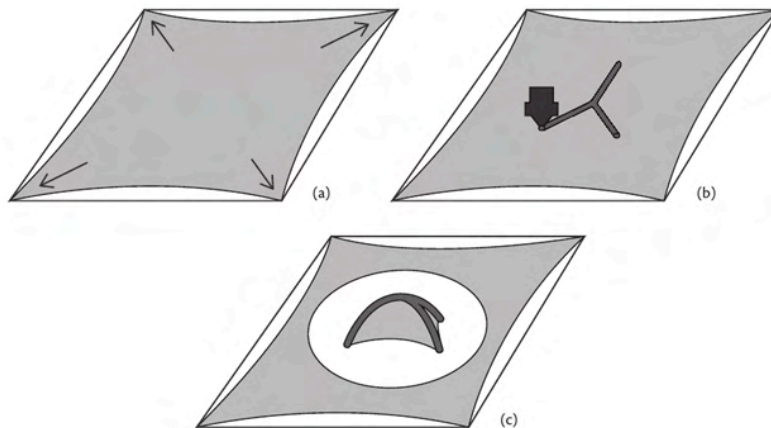


図 5: 布への3D プリント技術の概要：(a)従来の(FDM)3D プリンターのビルドプレート上に正方形の布を伸ばす、(b)プリンターが通常通り形状を造形する、(c)あらかじめ伸ばした布から切り出した後、形状が平面から変形する。

([https://www.researchgate.net/publication/360561100\\_Computational\\_design\\_of\\_self-shaping\\_textiles](https://www.researchgate.net/publication/360561100_Computational_design_of_self-shaping_textiles) より引用)

この挙動をシミュレーションする試みも進められている。例えば、Nervous Systemの Self-Forming Structures (図4) による形状の探索である。あるいは Kirchhoff-Plateau 理論を用いた曲面生成などが挙げられ、布一枚から狙い通りの形状を生成できることが実証されている (図6)。これにより、従来の裁断や縫製といった工程を経ずに、素材内部に直接形状の情報を埋め込むことが可能となった。

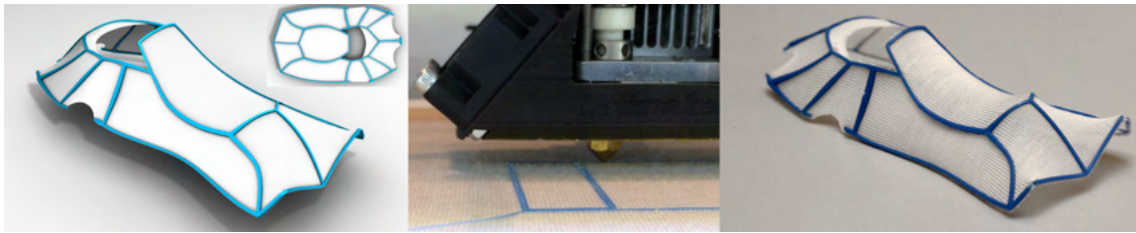


図 6: Kirchhoff-Plateau 曲面の計算機設計と自動製造。3D 形状は、事前伸張された布の上の平面ロッドによる平衡構成として設計される (左)。製造には、熱可塑性樹脂を布地へ直接出力する 3D プリンタを用いる (中央)。支持体からの解放後、プロトタイプは目的の形状へと自発的に展開する (右)。

([8] より引用)

一方で、本技術を実用化する上での最大の課題は、異素材間の界面における定着強度にある。布と樹脂の結合は、先行研究においても、織り組織の密度やプリント時の条件が質を左右し、それが結合強度に直結することが報告されている[9]。

### 1.2.2 [布 × 型枠]

柔軟な素材をコンクリート型枠として利用する「ファブリック・フォームワーク (Fabric Formwork)」の起源は 19 世紀末に遡る。1899 年、ドイツの建築家グスタフ・リリエントール (Gustav Lilienthal) によって特許取得された床スラブ工法がその原点とされる(図 7)。

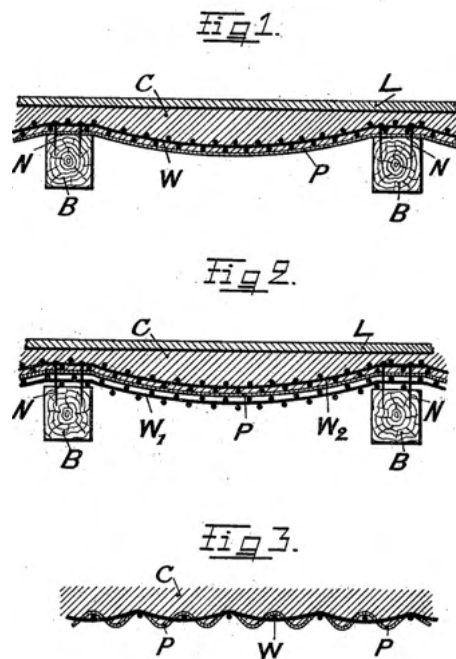


図 7: Louis Wilhelm Gustav Lilienthal, 床スラブ工法特許

([10] より引用)

20 世紀に入ると、ジェームズ・ウォラー (James Waller) の「Ctesiphon」システム (図 8) に代表されるように、コンクリートの自重が生み出す自然な懸垂線を利用した、薄肉かつ高強度のシェル構造の構築へと応用された。この時代の主眼は、材料を最小限に抑えつつ強度を最大化する構造的合理性の追求にあった。

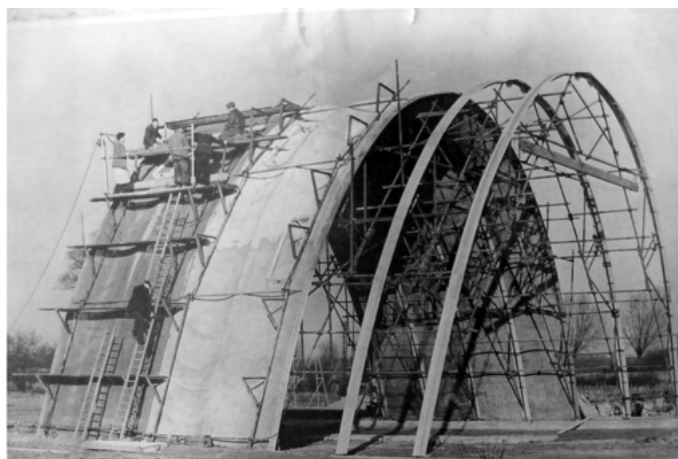


図 8: “Ctesiphon”. James Waller.

([https://www.researchgate.net/figure/Ctesiphon-formwork-system-21\\_fig3\\_336937686](https://www.researchgate.net/figure/Ctesiphon-formwork-system-21_fig3_336937686) より引用)

21世紀以降、その焦点は構造効率に留まらず、見た目の意匠表現へと拡大した。これはコンクリート本来が持つ「流動性」や「可塑性」を、柔軟な型枠の変形を通じて視覚化する試みである。例えば、2012年のウォルター・ジャック (Walter Jack) による「Crushed Wall」(図 9) では、ゴムシートを型枠として用い、打設時の側圧によってシートを意図的に変形させることで、流動的な瞬間を凍結させたような有機的な表情を実現している。



図 9: “Crushed Wall”. Walter Jack. 2012 (左)。製造時に使用した木材型枠 (右)

(<https://amusementlogic.com/general-news/construction-with-textile-formwork/> より引用)

本研究では、「複雑な形状成形特徴」と「コンクリートの品質向上」に着目する。

従来の剛性型枠では施工が困難であった複雑な三次曲面を、継ぎ目なく実現できる。例えば、ETH Zurich らによる“KnitCandela” (図 10) では、3D 編み技術によって生成された一続きのテキスタイルを型枠として用いることで、大規模な二重曲面シェルをジョイントなしで構築することに成功している [11]。これは、モジュール化されたパネルを組み合わせる従来の工法とは対極に位置する、シームレスなモノコック構造の可能性を示唆している。



図 10: "Knitcandela". Patrik Schumacher, Henry Louth. 2018

([https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.zaha-hadid.com/design/knitcandela/&ved=2ahUKEwj1ZGKm-KRAxUPcfUHHUwqGiIQFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw3sgS9\\_BbVmFRahrLx6F1rN](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.zaha-hadid.com/design/knitcandela/&ved=2ahUKEwj1ZGKm-KRAxUPcfUHHUwqGiIQFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw3sgS9_BbVmFRahrLx6F1rN) より引用)



図 11: "Concrete Chair". Tejo Remy & René Veenhuizen. 2010

(<https://www.dezeen.com/2010/03/18/concrete-chair-by-tejo-remy-renee-veenhuizen/> より引用)

また、コンクリートの品質向上させる利点として、透水性が挙げられた。打設時にコンクリート内部の余剰水分や残留気泡を外部へ排出し、この効果により、型枠界面における水セメント比が局所的に低下し、極めて緻密で耐久性の高い表面層が形成される [12]。

従来の硬質型枠を用いた施工では、型枠面に停滞した気泡が表面欠陥として残ることが避けられない課題であった。これに対し、布の型枠は全面からの排気が可能であるため、これらの欠陥を劇的に減少させることが証明されている [13]。この特性は、本研究が目的とする精緻な触覚表現をコンクリート表面に定着させる上で、重要な特徴となっている。

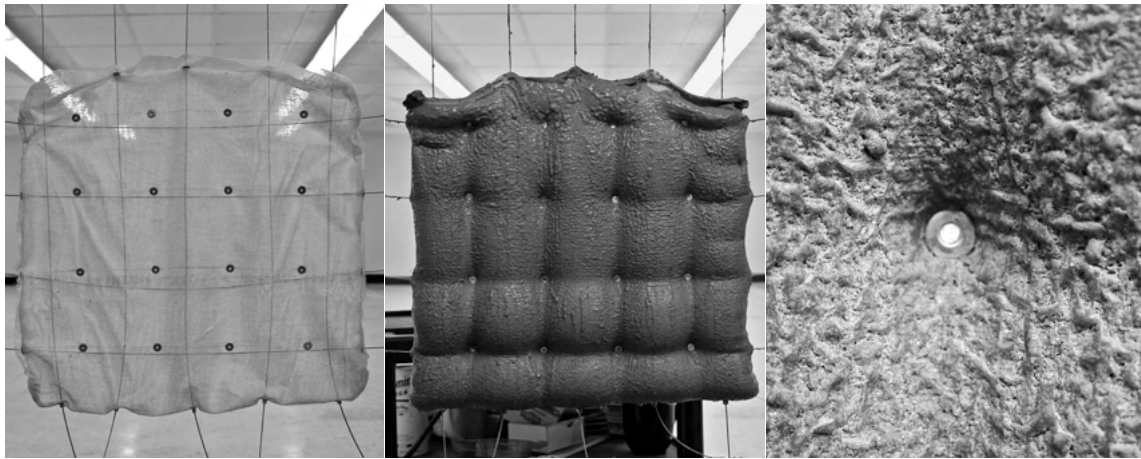


図 12: Series 3 – Permanent Fabric(Suspension)：垂直方向の成形において、『布型枠』の透水性により余剰水が排出される様子。

(<https://buildingmatters.wordpress.com/2011/11/16/series-3-permanent-fabricsuspension/> より引用)

その他、環境性能の面においても優位性を持つ。従来の木製型枠は、打設時の水分吸収や現場での加工により転用困難な廃棄物となりやすい。これに対し、Mark West らは布 × 型枠が極めて軽量かつ柔軟であり、同一面積の施工に必要な型枠重量を従来の数百分の1にまで低減できるため、輸送や保管に伴うエネルギー消費を劇的に抑制できると主張した [14]。

John Orr らの研究では、布の柔軟性を活かして構造最適化形状を成形することで、コンクリート自体の使用量を最大 40% 削減できることが実証されている [15]。このように、部材の軽量化と材料消費の抑制を同時に達成する本手法は、建設業界におけるカーボンニュートラルの実現に向けた有効なアプローチとして高く評価されている [16]。

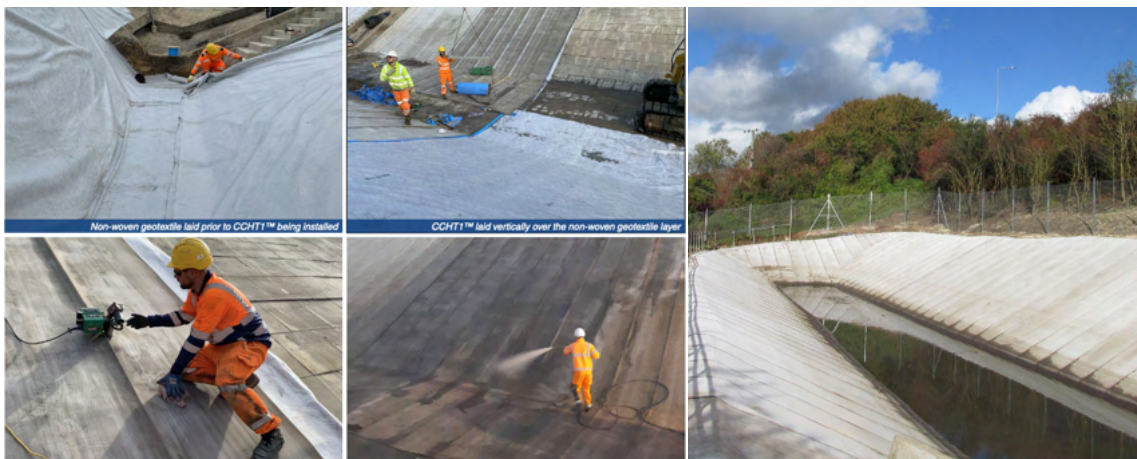


図 13: コンクリート含浸繊維 (Concrete Canvas) の施工事例。ロール状の柔軟な状態で搬入・敷設し、散水のみで硬化が完了する。地形に追従したシームレスで強固なライニングを形成可能である。(CCH Lagoon Lining - A23, Brighton, UK)

(<https://www.ccportal.co.uk/s/RbSab3KFjATQJLL?dir=/&editing=false&openfile=true> より引用)

一方で、柔軟な素材の制御の難しさが、実用化への大きな障壁となっている。コンクリートのような素材は型枠に強大な側圧を与え、非線形に変形させてしまう。設計者が物理的に安定しようとする自然形状との間の乖離を正確に制御することは、歴史的な課題である。

また、Mark West らは、布型枠の端部を固定するための支持フレームが、皮肉にも従来の型枠以上に重厚かつ複雑になる傾向を指摘している。John Orr 氏の研究では、打

設時の布の予期せぬ変形が、内部鉄筋のかぶり厚不足を招き、構造的な耐久性を損なうリスクが実証されている。これらの事例は、柔軟な素材を建築の精度で制御することの難しさを言及している。

### 1.2.3 [型枠 × 3D プリント]

製造業において、3D プリンティングの普及は、従来の大量生産から、個人の要求に応じたカスタマイズへのパラダイムシフトをもたらした。建築分野においても、従来の木材や発泡スチロールを切削するサブトラクティブ法から、図 14 のようにデジタルデータに基づき材料を積み上げるアディティブ法への技術的移行が進んでいる[17]。これにより、金型を必要とせず、多品種少量生産が可能となった。機材のスケールにおいても、卓上型のFDM（熱溶解積層法）プリンタが個人のプロトタイピングや小型型枠の製造を担う一方で、図 15 のように近年ではロボットアームを用いた大型 3D プリント技術が確立され、建築スケールの部材生産が可能となりつつある[18]。



図 14: “テキサス州 100 棟の住宅地”. Bjarke Ingels Group : BIG. 2023  
(<https://www.businessinsider.jp/article/272975/>より引用)

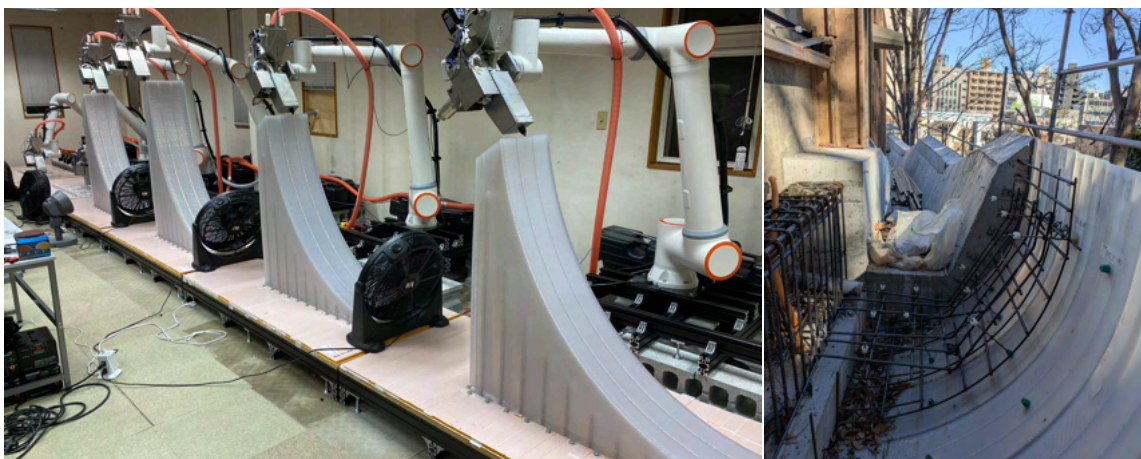


図 15: “Mazaka Project”. 株式会社 Digital Archi. 2026  
(株式会社 Digital Archi より提供)

この分野では「造形自由さ」と「造形正確さ」に着目する。

3D プリンタを型枠製造に用いる最大の利点は、その圧倒的な自由さにある。「設計→出力→実験→修正」のサイクルを回し、モジュールの形状最適化を行う研究プロセスにおいて極めて有効である。手加工や切削加工では不可能なアンダーカット（図 16）、二

重曲面、あるいは複雑な内部構造を持つ型枠を、一体で造形することが可能である (図 17)。

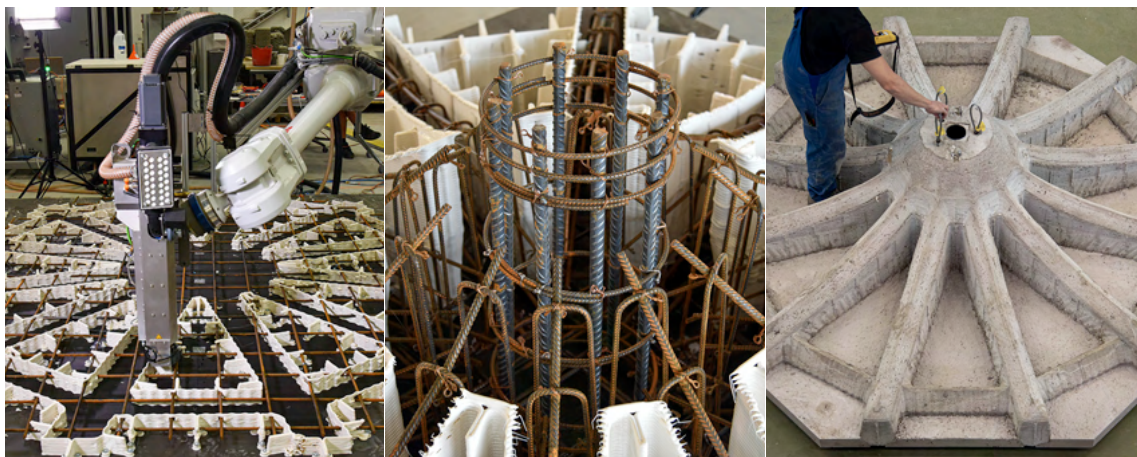


図 16: “RIBB3D”. Prof. Walter Kaufmann, ETH Zurich. 2023  
(<https://kaufmann.ibk.ethz.ch/research/selected-research-projects/RIBB3D.html> より引用)



図 17: “Additive Energy”. Eduardo Gascon, Sandy Curth. 2023  
(<https://programmablemud.mit.edu/Additive-Energy> より引用)

特有の「積層痕」も、意匠的な要素として再評価されている。「Parametric Waffle Slabs」(図 18) の事例に見られるように、積層ピッチがコンクリート表面に転写されることで、ミクロなテクスチャを生み出す効果がある[19]。



図 18: Parametric waffle slabs: Optimal geometry materialized with additive construction  
([https://www.researchgate.net/figure/Fabrication-of-flat-concrete-slab-element-with-mass-customized-formwork\\_fig5\\_364152892](https://www.researchgate.net/figure/Fabrication-of-flat-concrete-slab-element-with-mass-customized-formwork_fig5_364152892) より引用)

一方、3D プリント製型枠の実用化には物理的な限界が存在する。それは「造形速度」と「造形解像度」がトレードオフの関係にあることだ。

構造体そのものを積層出力する方式は、工期の劇的な短縮に寄与する一方で、造形解像度に制約が生じる。一般にノズル径が数センチメートルと太いため、表面には積層痕による粗い「リブ状」の質感が現れる。本研究では、この現象を「解像度が低い状態」とであると定義している。そのため、繊細なテクスチャや、人体が直接触れる部位に適した滑らかな曲面の生成は困難である。例えば、光州デザイン振興院 (Gwangju Institute of Design Promotion) による「The Curtained Wall」(図 19) は、ダイナミックな曲面を実現しているものの、その表面は積層ピッチに起因する特有の粗い質感に留まっている。

対照的に、ノズル径を細く調整すれば解像度を高めることは可能である。ETH Zurich による「Eggshell Pavilion」(図 20) では、ロボットアームを用いて熱可塑性樹脂の高精細な型枠成形を行っている。しかし、この手法では単一の柱を成形するためのプリント時間が極めて長くなる。広範な建築部材への適用において「出力速度と解像度の両立」は決定的な障壁だ。建築スケールの壁面全体を覆う型枠を出力する場合、面積あたりの積層時間が膨大となり、製造コストが跳ね上がるという課題が残る。



図 19: “The Curtained Wall”. SWNA. 2019  
(<https://theswna.com/en/projects/the-curtained-wall> より引用)

本研究が目指すような複雑な表面テクスチャや精密なディテールを得るためには、FFF 方式によるノズル径の細い (0.4mm～数 mm 程度) プリンタの使用が不可欠となる。しかし、この手法で建築スケールの壁面全体を覆う型枠を出力する場合、面積あたりの積層時間が膨大となり、製造コストも跳ね上がるという課題がある。例えば、ETH Zurich による「Eggshell Pavilion」(図 20) では、ロボットアームを用いた高精細な熱可塑性樹脂の型枠成形が行われているが、単一の柱を成形するためのプリント時間は極めて長く、広範な建築部材への適用において「出力速度と解像度の両立」が決定的な障壁となっている。



図 20: “eggshell pavilion”. ETH zurich explores digital design + robotic 3D printing in concrete .2022  
(<https://www.designboom.com/architecture/eth-zurich-gramazio-kohler-digital-design-robotic-3d-printing-eggshell-pavilion-10-05-2022/> より引用)

#### 1.2.4 3 要素の統合による造形システムの再構築

本節で概観した通り、デジタルファブリケーションの進展は、造形分野に新たな可能性をもたらした。しかし、既存の技術領域には、単体では解決し難い以下のトレードオフが存在する。



図 21: 3要素の統合による造形システムの再構築概念図

第一に、3D プリンティング技術は高い幾何学的自由度を誇るものの、建築スケールにおいては「造形解像度」と「造形速度」を両立できないという構造的課題を抱えている。構造体そのものを出力する方式では表面解像度が低下し、一方で高精細ノズルを用いた型枠成形は、膨大な積層時間とコストを要するため、広範な壁面への適用には限界がある。

第二に、19世紀から続く布型枠 (Fabric Formwork) の技術は、コンクリートの品質向上や環境負荷の低減、およびシームレスな曲面成形において極めて優れた特性を有する。しかし、素材の柔軟性ゆえに側圧による変形制御が難しく、意図した形状を正確に再現するには、複雑な支持構造や厳密なプレテンションの導入を必要とする。ここに施工上のジレンマが存在する。

こうした課題に対し、「布地へプリンティング」は、布の伸縮性と熱可塑性樹脂の剛性を利用した「自己形成布地 (Self-forming Textile)」という概念を提示する。これは、素材内部をプログラムすることで、外部からの拘束なしに自律的な形状生成を可能にする技術である。

本研究は、これら3つの領域を統合し、新たな型枠の造形手法を開発する。各要素の特性を相補的に活用することで、従来手法では到達し得なかった、独創的なコンクリートの造形表現を目指す。

## 1.3 コンクリートのメディア性と可塑的表現

### 1.3.1 流動的本質と布型枠による形状の規定

アメリカの建築家、ポール・ルドルフ (Paul Rudolph) [20] は、当時の施工業者が精確さを過度に追求するあまり、コンクリートに「薄い金属のような質感」を与えてしまっていることに不満を述べている [21]。彼は、コンクリートの本質が「泥のような流動的な状態」にあることに着目し、その未分化な特徴を肯定した。

コンクリートは、一般的に用いられる建築素材の中でも、当初は流体でありながら時間の経過とともに硬化していくという、極めて稀な性質を持つ。この流動性ゆえに、コンクリートは他の素材の質感を模倣することが可能であるが、これは他の材料には見られない特異な性質である。一方で、コンクリート自体には固有の定形がないため、その本質を捉え、表現として確立することは容易ではない。



図 22: 理想の宮殿、ドローーム県オートリブ、フランス、1879-1912 年。郵便配達人フェルディナン・シュヴァルが自らの労力ですべて作り上げた、巨大なコンクリート製フォルム  
(<https://lalocadelondres.com/el-palais-ideal-del-cartero-cheval/>より引用)

このような素材の特性を鑑みると、打ち放しコンクリートにおける型枠の影響力は絶対的かつ決定的であると言える。すなわち、型枠の製作プロセスそのものが、最終的な外観をほぼ支配することを意味する。スイスの建築家、アンドレア・デプラゼス (Andrea Deplazes) [22] は、「建築の性格は型枠の質に依存するため、それは原始的にも抽象的にもなり得る」と述べている [23]。彼はここで、安藤忠雄の作品に見られる「陶器のような繊細な脆さ」を持つ仕上げを例に挙げ、型枠が建築の表情をいかに規定するかを対比的に示している。



図 23: オトレンギ邸、バルドリーノ、ヴェローナ、1974-9 年、カルロ・スカルパ設計。石とコンクリートによる柱のディテール (左)。安藤忠雄、光の教会 (右)

(<https://globalspaces.eu/2022/02/07/villa-ottolenghi/> (左)、<https://www.christiantoday.co.jp/articles/24507/20170929/tadao-ando-exhibition.htm> (右) より引用)

現代においても、型枠によって形状をあらかじめ規定し固定する手法が一般的である。しかし、流体であるコンクリートには、本来それ以上の多様な造形可能性が秘められているはずである。1926 年、雑誌『コンクリート技術』の執筆者は、この素材を「無限の発展が可能」であると形容した [24]。その 40 年後の 1966 年、アメリカの建築雑誌『プログレッシヴ・アーキテクチャー (Progressive Architecture)』もまた、同様の文脈において「打ち放しコンクリートの潜在能力はいまだ開拓されていない」と言及している [25]。

筆者は、デジタルファブリケーション時代こそが、これら先人たちが予見したコンクリートの真の可能性を切り拓く契機になると確信している。

### 1.3.2 コンクリートと水が織りなす表面のテクスチャ

コンクリートは、水との化学反応（水和反応）によってのみ液体から固体へと変容する。いわば「水から生まれた石」であるこの素材は、硬化後においても水と密接な関係を持ち続ける。

コンクリートの本質は多孔質な素材である点にあり、水分を吸収することでその色濃度や質感は劇的に変化する。乾燥した状態の「静的な表情」に対し、水分を含んだ状態は素材の深みや質感が強調される「動的な表情」となる。これは、本研究が目指す「触覚的表現」が、水の介在によって視覚・触覚の両面でさらに増幅されることを示唆している。



図 24: 水に濡れた打ち放しコンクリートの表情変化  
(筆者撮影)

「メディアとしてのコンクリート」[26]一書を参考して、これまで建築史においても、屋外空間におけるコンクリート外壁と雨水との関わりについては、多くの議論がなされてきた。代表的な事例として、Gillespie, Kidd & Coia によるスコットランドの『セント・ピーターズ神学校 (St Peter's Seminary)』が挙げられる。同地の湿潤な気候において、雨水がコンクリートのテクスチャを伝い、表面に「雨の筋」を描く様子は、単なる劣化ではなく「時間の記録」や「意匠」として肯定的に捉えられた。また、ル・コルビュジエに[27]よる後半期の作品群（ルダン邸、フランス・オー＝ラン県のロンシャンの礼拝堂など）においても、外壁に雨水を意図的に流し、汚れさえも建築の一部として受容する設計思想が見て取れる[28]。

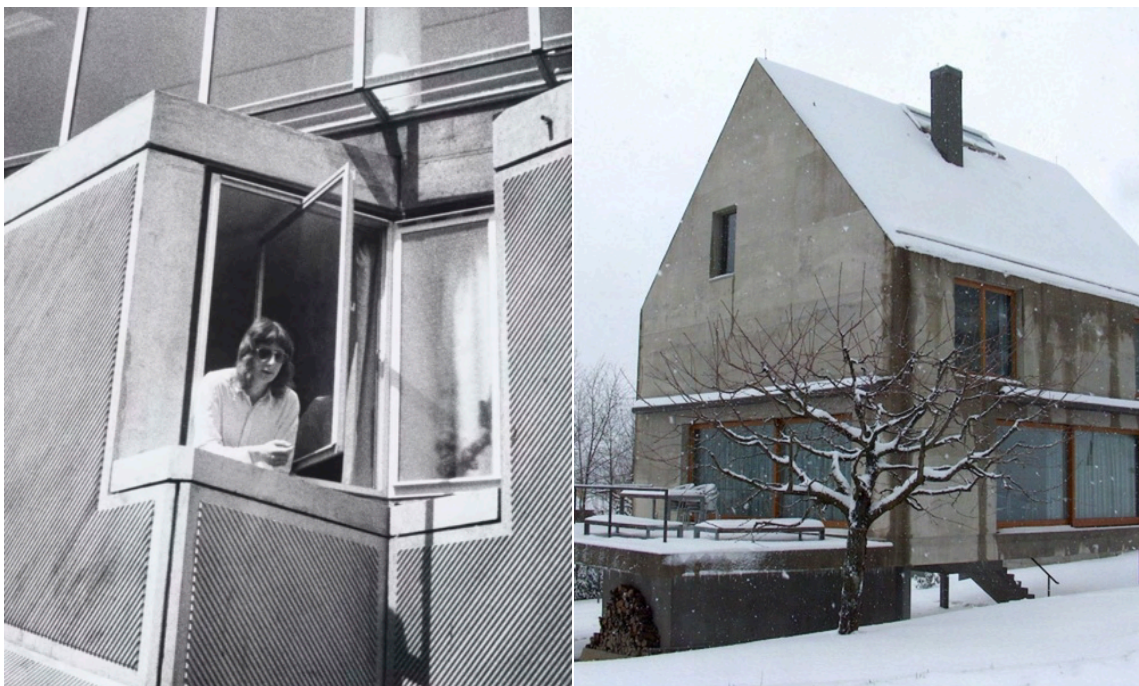


図 25: 学生寄宿舍、スコットランドのセント・アンドリューズ大学、1964-8 年、ジェームズ・スターリング設計。プレキャストコンクリートに膨らまれた斜めのリブは表面の雨水を斜めに流し、外観が汚れるのを防ぐためのものであった（左）。Herzog & de Meuron, Haus Rudin, 1997, Leymen. (右)  
(<https://www.cca.qc.ca/en/search/details/collection/object/426117/> (左)、[https://allover-magazin.com/?attachment\\_id=961](https://allover-magazin.com/?attachment_id=961) (右) より引用)



図 26: オスカー・ラインハルト美術館。増築においてコンクリートに銅を混入し、頻繁に濡れている部分に不規則な緑青の縞が現れるように仕掛けられている。

(<https://www.gigon-guyer.ch/en/project/oskar-reinhart-collection-roemerholz/>より引用)

これらは、ポール・ルドルフが不満を述べた金属のような質感とは対照的に、雨水を吸い込み、周囲の風景と同化していくコンクリートの美学を提示している。

さらに、コンクリート表面を流れる水は、単なる視覚的变化に留まらない可能性を秘めている。コンクリート表面に施された微細なテクスチャは、水の流れを滞留させるための建材となり得る。水と素材が掛け合わせた関係性が、本研究において布型枠を応用するための重要な理論的基盤となっている。

## 1.4 本論文の構成

第1章(序論)では目的を提示し、本研究の軸となる「3Dプリント」「布」「型枠」の3要素に着目し、これらを2要素ずつ組み合わせた先行事例を俯瞰する。

第2章(先行事例)では、第1章で導き出された目的に対し、特に機能性を重視したアプローチの試みた研究事例を分析する。また、コンクリート固有の特徴を整理した上で、新たな製造手法の必要性を論理的に導き出す。

第3章(布地と3Dプリントを融合させた造形システムの構築)では、提案手法の有効性を検証するための実験環境、使用装置の仕様、および実験を遂行する上での技術的な課題点について記述する。

第4章(自己形成布地を用いた布型枠の試作と転写実験)では、布型枠が型枠としての機能を持たせるための実験プロセスについて詳述し、確立した技術のパラメータを記録した。

第5章(布纏材を用いたプロトタイプ制作)では、第4章の実験結果と考察に基づき、実用性と施工性を兼ね備えた制作物の具体的な提案を行う。

第6章(まとめ)では、本研究のプロセスから導き出された結論と展望を論述するとともに、本論文の結びとする。

## 第 2 章. 先行事例

### 2.1 概要

本章では、前章で提示した3つの主要な構成要素の観点から、形状を生かした機能性を有する先行事例を抽出し、その技術的特徴および意匠的な意義を分析する。単なる形状の面白さだけでなく、デジタルファブリケーションによる意匠制御と、コンクリート等の流体材料に対する型枠機能を重視した。これらの分析を通じて、本研究が提案する自己形成布地を用いた手法の独自性と、制作物表面における新たな触覚表現としての位置づけを明確化する。

### 2.2 伸縮性素材と積層造形の融合

#### 2.2.1 形状可変インテリア

材料の物理的な特性から形態を導き出す「マテリアル・ベースの形態探索」を建築設計に適用した先駆的事例である[29]。技術的な側面においては、あらかじめ伸張を付与した伸縮性布地の上に、FFF方式を用いて熱可塑性樹脂を直接積層する手法が採られ、平面から三次元構造へと自発的に変形する「自己形成 (self-shaping)」のプロセスにある。

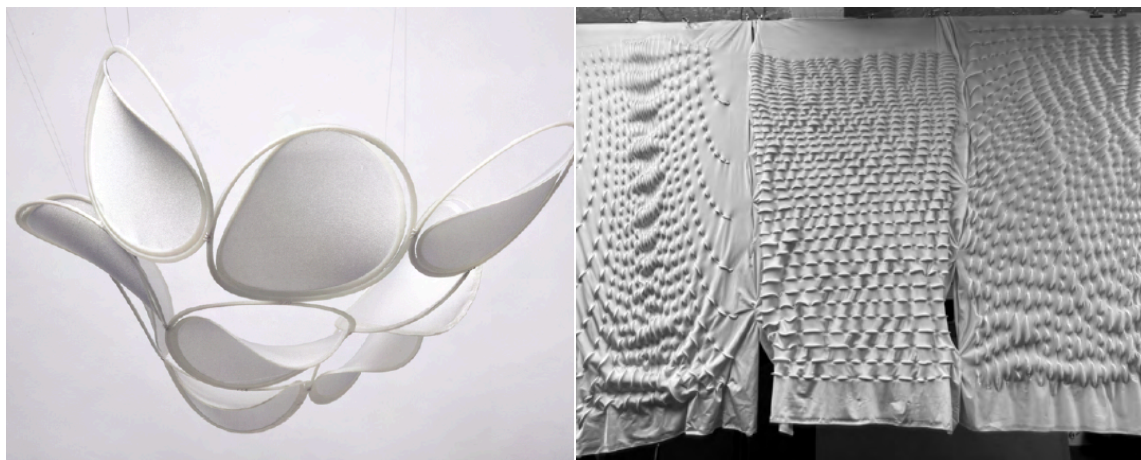


図 27: “Self-shaping Textile”. Agata Kycia, Anton Tetov Johansson. 2022  
([29] より引用)

この研究成果は、環境の変化に応じて受動的に形状を変える「ソフト・ビルディング・スキン」(soft building skin) としての応用が期待されており、具体的には建築ファサードにおける可変日よけや、照明効果を調整する軽量な天井構造、可変的なインテリアやエレメントとしての展望が示されている。(図 27)

一方で、実用化に向けた最大の課題は「スケールアップに伴う制御」の精度向上である。メートル規模の大型プロトタイプにおいては、布地の均一な張力維持や重力による自重たわみの影響が顕著となり、計算機上のシミュレーションと実製作の間の誤差をいかに埋めるかが重要な焦点となる。また、材料工学的な側面では、持続的な応力下で発生する布のクリープ現象や、変形時のせん断応力に起因する界面での剥離が障壁となっている。特に、樹脂と布の物理的アンカー効果が不十分な場合、変形プロセスそのもの

が界面破壊のトリガーとなり、熱可塑性樹脂が布から図 28 のように脱落する現象が確認されている。

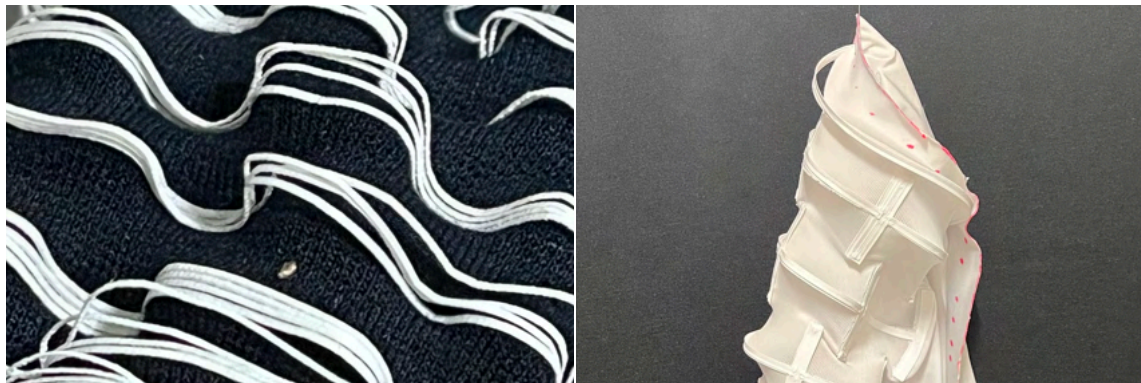


図 28: 布プリントの実験で 3D プリントポリマーが布から取れちゃった様子  
(筆者撮影)

### 2.2.2 建築スケールへの拡張

本事例は、伸張した布の上に熱可塑性樹脂を直接積層し、張力解放後の収縮によって三次元形状へと自己変形させる技術を、建築スケールへと拡張した点に独自性がある [30]。技術的側面では、デスクトップ型プリンタの空間的制約を打破するため、多軸の産業用ロボット (ABB IRB 2400) に独自開発の押出機と制御システム (Arduino Mini Controllino) を搭載した点が特筆される。これにより、従来の小型プロトタイプでは到達し得なかった、建築部材としての実用サイズを持つテキスタイル・コンポジットの製造を実現した。

成果として、ドーム型やタワー型などの自立可能な自己支持構造体が製作されている。これらは、軽量かつ平坦な状態で輸送が可能であり、施工現場で自己展開する特性を持つ。この特性を活かし、極限環境下 (宇宙空間の居住施設等) における動的な空間構築や、環境負荷を低減する軽量建築部材としての活用が展望されている。

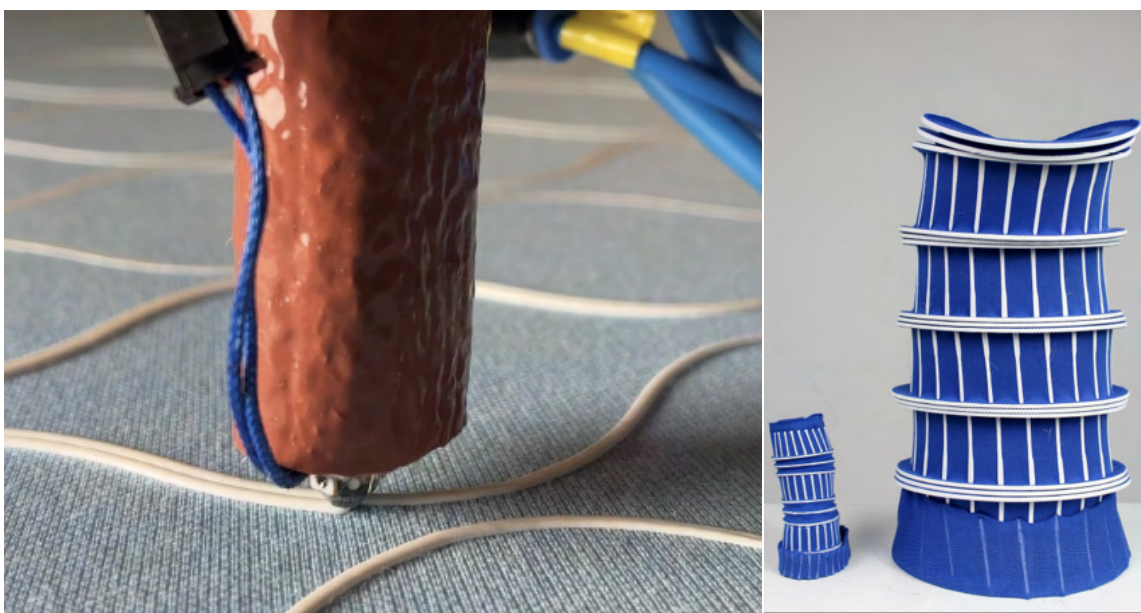


図 29: “4D Printing Architectural Textiles”. Amelia Vey Henry, Anton Tetov Johansson. 2024  
([30] より引用)

一方で、本研究が浮き彫りにした課題は、規模の拡大に伴う材料間の相互依存性の制御の極めて高い難易度である。大型の布をフレームに固定する際、面全体の張力を均一に維持することは困難であり、わずかな張力誤差が最終的な変形状の不一致や、構造的安定性の欠如を招く。

また、熱可塑性樹脂と布の界面における定着強度の維持も深刻な課題である。出力面積の増大に伴い、ノズル高さやプリント速度の微細な変動がアンカー効果の質を左右するため、極めて精密な製造管理が不可欠となる。さらに、現行のデジタルシミュレーションでは、複雑な非線形挙動を正確に再現しきれていない。そのため、設計の予測可能性を向上させる高精度なシミュレーション手法の確立や、実用化に向けた宇宙グレードの耐放射線と高耐久素材の導入が、依然として重要な研究課題として残されている。

## 2.3 デジタル技術による伝統的テキスタイル工法の拡張

### 2.3.1 スモッキング技法を用いたプログラマブルな幾何学成形

伝統的な刺繍技法である「スモッキング」を、コンクリート成形用の柔軟な布型枠に適用した点が最大の特徴である [31]。技術的側面においては、独自に開発したデジタル設計ツール「OriNuno (オリヌノ)」を用い、複雑な三次元幾何学形状を、裁断や縫い合わせを最小限に抑えた1枚の布のスモッキングパターンへと解体する手法を確立している。これに加え、物理シミュレーション (Kangaroo 2) を活用することで、打設時のコンクリートの流動性や側圧による布の変形をデジタル上で正確に予測するワークフローを取り入れている。

研究の展望として、この技術は従来の木製型枠に比べて材料廃棄を約40%削減できる持続可能な施工手法であると述べられている。事例として示された「Wall Three」図 30 などの壁体、複雑な曲率を持つ柱、あるいはシェル構造など、意匠性と構造効率を高度に両立した次世代の建築部材の製造への活用が期待されている。



図 30: “Concrete form[ing]work : Wall three”. Annie Locke Scherer. 2021

([31] より引用)

一方で、実用化に向けた今後の課題は、実物大の建築スケールにおける施工精度と予測可能性のさらなる向上である。具体的には、大規模な施工においてはコンクリートの強大な側圧によって型枠が破断したり、想定外のたるみが生じたりする物理的リスクがあり、材料選択や支持構造のさらなる最適化が求められる。また、設計者と施工者間に介在する暗黙知をいかに形式化して継承するかも重要である。産業界への普及に向けては、高度な専門知識を必要としない再現可能な施工マニュアルの確立や、過酷な現場環境に耐えうる耐久性の実証が、実用化に向けた重要なステップとして残されている。

### 2.3.2 布型枠侵食防止と護岸保護への応用

本事例は、土木・地盤工学分野における侵食防止や護岸保護を目的とした「布製型枠コンクリートライニング (Fabric Formed Concrete Linings)」の技術である[32]。技術的側面においては、高強度にエンジニアリングされた特殊テキスタイルをカスタムパネル状に加工し、その内部に高流動・高強度のコンクリートまたはグラウトを直接注入させる手法が採られている。(図 31)

本技術の最大の特徴は、用途に応じて最適化された 3 つの形式を使い分ける点にある。表面を平滑に仕上げる均一セクション型 (US)、排水口を設けることで地盤内の過剰間隙水圧を逃がすフィルターポイント型 (FP)、そして表面の凹凸によって波のエネルギーを減衰させるフィルターバンド型 (FB) である。これらの技術は、急勾配の斜面や水中、あるいは化学薬品に曝される過酷な環境下での水路・池のライニングをはじめ、橋脚の洗掘防止や海洋構造物の基礎保護など、重機による従来の施工が困難な場所での活用において極めて高い優位性を持つ。



図 31: 急勾配の斜面でも施工が可能なファブリック型枠  
([32] より引用)

一方で、本事例における主な課題は、現場ごとの複雑な地形や水理条件に対する設計の最適化と、長期的なメンテナンス性の確保である。布型枠は地形に追従する柔軟性を備える一方で、注入時のコンクリート圧力管理が不適切である場合、不均一な厚みや構造的欠陥が生じるリスクを孕んでいる。また、フィルターポイント型等の排水機能を備えたシステムでは、長期間の運用において土粒子による目詰まりが発生し、設計通りの静水圧緩和機能が維持できるかという点も重要な検証事項となる。さらに、本手法を建

築プロジェクトへと転用するためには、個別条件に合わせたカスタムパネルの製造コスト低減や、各地域の建築基準に適合するための耐久性データの更なる蓄積が、実用化に向けた課題として残されている。

## 2.4 3D プリント型枠領域

### 2.4.1 砂型枠とトポロジー最適化による超軽量構造体の創出

本事例は、2023年ヴェネツィア・ビエンナーレにて展示された、サンゴに着想を得た複雑かつ繊細な幾何学形状を有する軽量コンクリート構造体である[33]。技術的側面においては、3Dプリントされた水溶性砂型枠と、マクロおよびメゾスケールの双方で実施されたトポロジー最適化を統合している点が最大の特徴である。

この手法により、所要の耐荷重性能を維持しつつ、従来のソリッドな構造体と比較してコンクリートの使用量を約60%削減することに成功した。また、型枠に用いた砂は溶解後にそのまま次工程の製造プロセスで再利用可能であり、廃棄物ゼロな生産を実現している。本成果は、環境負荷を大幅に低減しながら、複雑な意匠と構造効率を高度に両立する持続可能な建築部材や、最適化された高性能シェル構造の製造への応用が期待されている。



図 32: “Marinaressa coral tree”. Daria KOVALEVA, Ivan TOMOVIC. 2023  
([https://app.iass2024.org/files/IASS\\_2024\\_Paper\\_460.pdf](https://app.iass2024.org/files/IASS_2024_Paper_460.pdf) より引用)

一方で、本研究における今後の主な課題は、複雑な分岐構造を持つ薄肉部材への補強材（鉄筋等）の統合、および建築スケールへの拡大である。現在のプロトタイプは主に無筋コンクリートで構成されているが、実建築物としての構造的信頼性を確保するためには、この複雑な空洞内部へ補強材をどのように配置するかが技術的な障壁となっている。また、3Dプリント砂型枠の製造速度およびコストは依然として高く、大規模プロジェクトへ適用するための施工プロセスの自動化と効率化が不可欠である。さらに、トポロジー最適化によって導出された非標準的な形状の構造挙動を、実際の現場環境下で高精度に予測・検証するための解析手法の更なる洗練も、実用化に向けた重要なステップとして残されている。

## 2.4.2 環境調整機能を備えた高精細コンクリート外装材

建築家・小野寺将吾氏が設計した「[34]」は、蒸散冷却機能を有する次世代のコンクリートパネルである。技術面における最大の特徴は、3Dプリンタで製作された型枠をコンクリートの打設に用いている点にある。これにより、従来の木製や金属製の型枠では成形困難であった有機的かつ微細な凹凸を、コンクリート表面に形成することに成功した。

この特殊な形状によって表面積を従来比で10%増大させ、パネルに高い保水性能を付与している。水分が蒸発する際の気化熱を利用して周囲温度を低減させるメカニズムを実現した。都市のヒートアイランド現象を緩和する高機能ファサードとして、オフィスビルや公共空間の外装材への適用、さらには機能性と芸術性を高度に両立させた新たな都市景観の構築への活用が期待される。

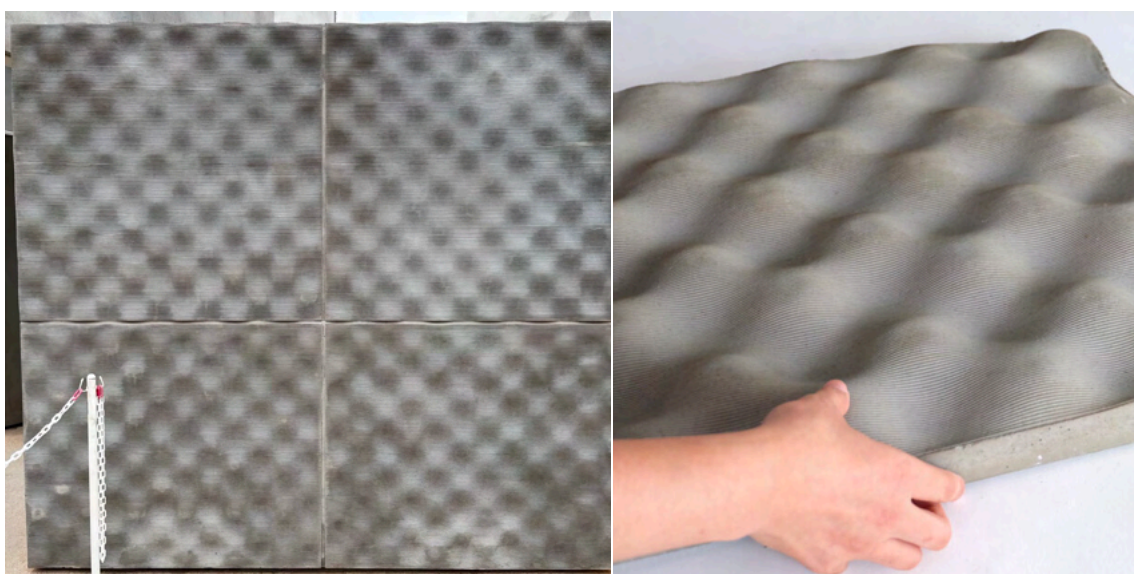


図 33: “Cooling Panel”. Office Shogo Onodera. 2025

(筆者撮影 (左)。 <https://mag.tecture.jp/feature/20251119-139057/> (右) より引用)

一方で、本事例における実用化への課題は、製造コストと速度の最適化である。現状、複雑なテクスチャを有する型枠を個別に3Dプリントするには膨大な時間とコストを要するため、大規模な一般建築へ普及させるための量産プロセスの確立が不可欠である。また、コンクリートの微細なエッジ部分は施工時や経年変化による破損欠けのリスクを孕んでおり、構造的な耐久性をいかに担保するかが重要な焦点となっている。さらに、屋外設置に伴う複雑な凹凸への塵埃や汚れの蓄積が冷却性能および美観を損なう可能性があり、長期的なメンテナンス手法の確立や、使用済み熱可塑性樹脂型枠のリサイクルといった環境負荷の低減も、実用化に向けた重要な課題として残されている。

## 2.5 総括と本研究の立脚点～Cooling Panelの分析に基づく課題の特定～

本章で考察した先行事例、特に「Cooling Panel」に代表される蒸散冷却を目的としたコンクリート表面の研究は、デジタルファブリケーションによって表面積を増大させ、

環境性能を向上させる可能性を示唆している。しかし、これらの事例を本研究の目的である触覚表現の観点から分析すると、以下の2つの点を取り上げた。



図 34: 雨の日の Cooling Panel  
(筆者撮影)

1. 布地特有の張力を生かした有機的な形状が生成できる自己形成布地では、3D プリントした型枠のようにコンクリートの型枠として利用することができるのか。
2. コンクリートがもたらす保水性や表面温度の低下といった物理的な機能については詳細に記述され、水が表面を流れることによる「視覚的な涼しさ」についても言及が見られる。しかし、そのテクスチャーが水に濡れ、光を反射し、あるいは温度を持つことで、「見る人に対してどのような触覚的欲求を抱かせ、どのような接触行動を誘発するか」という感性価値については、看過されてきた。

自己形成布地が生み出すより精緻なテクスチャーを変数としてコンクリート表面を設計したら、水といった要素と組み合わせることで、素材を思わず触れたい対象へと変容させるだろうか。これは、形状表面が持つ触覚的な感性価値を意図的にコントロールする技術として確立できる可能性を秘めている。

以上の分析に基づき、本研究は「精緻なテクスチャーと水の相互作用が、素材に対する身体的介入をいかに誘発し得るか」という問いを立脚点とする。ここでは、コンクリートを単なる構造体や建築部材としてではなく、人々の感性に訴えかけ、インタアクションを引き出す「触覚的なインターフェース」として再定義することを試みる。

## 第3章. 布地と3Dプリントを融合させた造形システムの構築

### 3.1 自己形成布地を用いた型枠の造形概要

本研究では、伸縮性を有するテキスタイルに熱可塑性樹脂のロッドを直接積層造形することで、自律的に三次元へと展開する自己形成布地を生成する。細かいテクスチャが付与できる布型枠として活用し、布特有の柔軟性と幾何学的な拘束が織りなす新たなコンクリート表現の開発を行う。

全体の製作フローは(図35)に示す通り、大きく「型枠の造形」と「コンクリートの打設」の2段階に分けられる。

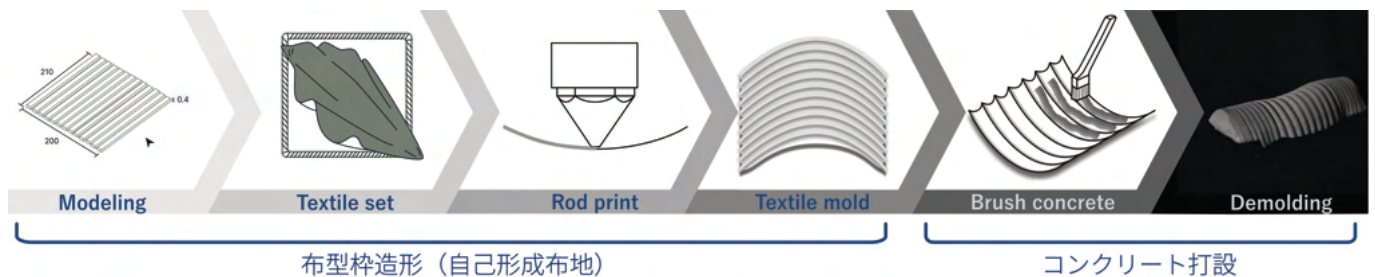


図 35: 布型枠の製造からコンクリートを流し込むまでの手順

まず、デジタルモデルに基づき、一定の張力を与え伸張させた布地の上に熱可塑性樹脂をプリントする。積層完了後、布地を固定治具から解放することで、布が元の形状に戻ろうとする収縮エネルギーと、プリントされた樹脂ロッドの曲げ剛性が相互に干渉し、平面から複雑な三次元構造へと自発的に変形する。

次に、この三次元形状へと展開した自己形成布地を布型枠と見なし、コンクリートの打設を行う。まず、刷毛を用いてコンクリートを薄く表面に塗布し、初期硬化を待つ。この工程により、精緻なテクスチャの定着と型枠の剛性強化を図る。その後、残りのコンクリートを型枠内に充填し、完全な硬化を待つ。最終的に型枠を離型することで、布の織り組織や樹脂ロッドのパターンがコンクリート表面に高精細に転写された様子を確認できる。

### 3.2 布プリンティングする機材と布の準備

本研究における自己形成布地の製造には、FFF (熱溶解積層) 方式の3Dプリンタ2機種を使用し、それぞれの特性に合わせて布への3Dプリンティングを可能にするためのハードウェア的な改造および道具の制作を行った。

### 3.2.1 使用 3D プリンタの仕様

表 1: 使用した 3D プリンタの仕様比較

項目	Creality Ender 3	Bambu Lab P1S
最大造形サイズ	220 × 220 × 250 mm	256 × 256 × 256 mm
レベルリング方式	手動レベルリング	自動レベルリング
実験での役割	研究前半：造形手法の確立と 治具試作	研究後半：高精度なプロトタイプ 量産
図表参照	(図 36)	(図 37)



図 36: Creality Ender 3

(<https://imade3d.com.cy/product/creality-ender-3-pro/> より引用)



図 37: Bambu Lab P1S

(<https://jp.store.bambulab.com/en/products/p1s?srsId=AfmBOop11D4NOUQFUvcaZMau8mJj69m1tlnYDfxOmAi0I7iPctr-1p5> より引用)

### 3.2.2 機材の調整

#### 1. Creality Ender3

初期段階では、布地に適切な張力を付与した状態で保持するための専用固定フレームを製作した。

当初は木製フレーム (図 38) を試作したものの、布の強い収縮力によって木材にたわみが生じ、均一な張力を維持することが困難であった。検討の結果、直径 5.6mm の金属棒を矩形に成形した治具 (図 39) を採用した。これにより、造形中も布の張力を一定に維持することが可能となった。

布を固定フレームに装着した際、布が空中に浮いた状態でプリントを行うため、ヒートベッドによる加熱は行わずに造形を実施している。既存のビルドプレートは完全に取り外した。

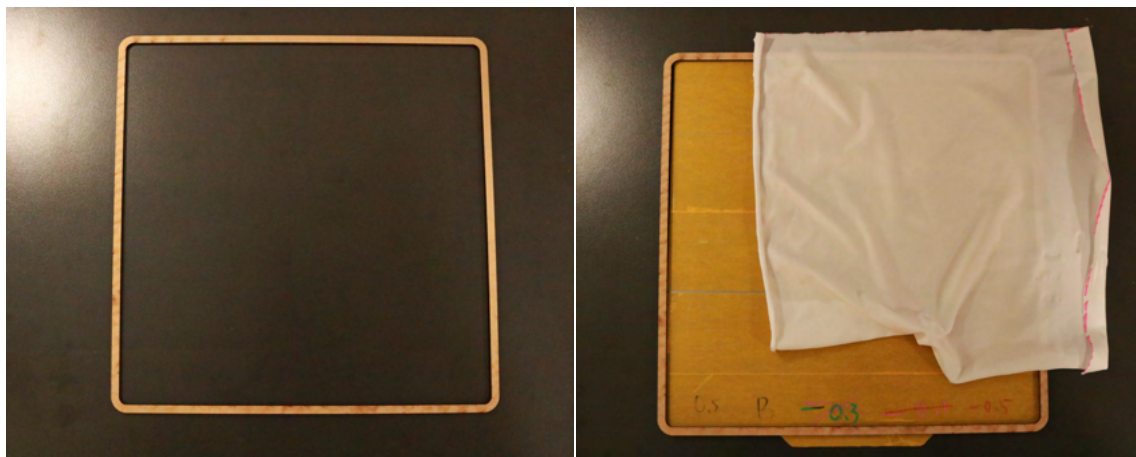


図 38: Ender3 向け木製の布固定用のフレーム

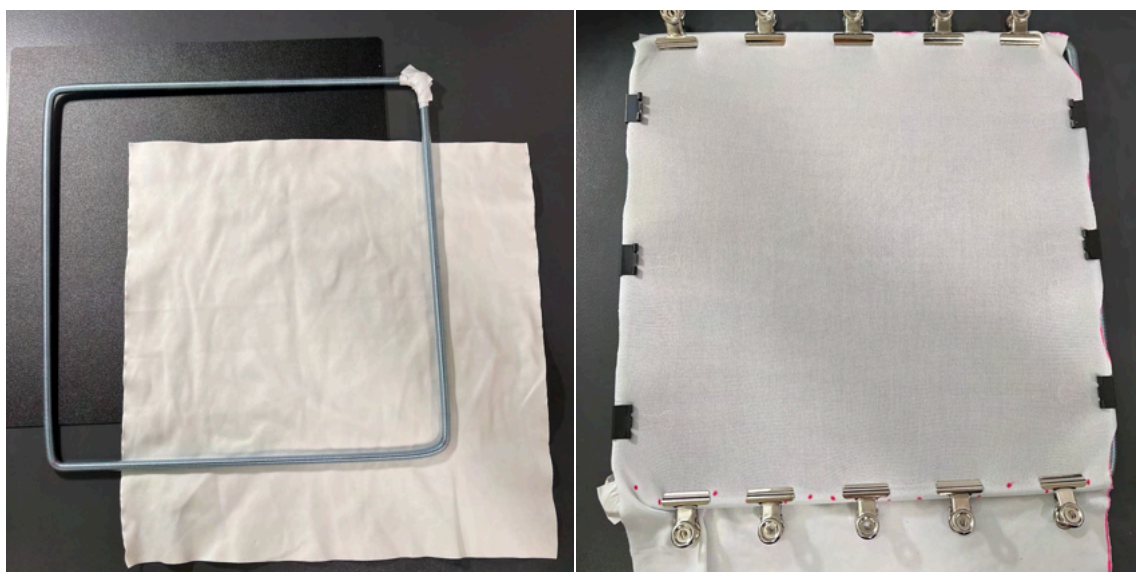


図 39: Ender 3 向け金属の布固定用のフレーム

## 2.Bambu Lab P1S の運用

研究後半に導入した P1S は、自動レベリング機能により高度な積層精度が期待できる。本機では本体の改造は行わず、着脱可能な固定手法を開発した。

- 磁石ゴムシートによる固定: 金属製のビルドプレートに布を固定するため、プレートの形状に合わせた磁石ゴムフレーム (図 40) を制作した。
- 開口部の設計: ゴム磁石のフレームの中央に 200 × 200 mm の正方形の開口部を設け、その範囲内で布への 3D プリンティングを行う。この手法により、安定した造形環境を構築した。



図 40: 布固定用のゴム磁石フレーム

### 3.2.3 使用布地の詳細

自己形成布地が立体形状に変形する重要な要素は、布地の「伸縮性」と「回復性」である。加えて、積層される熱可塑性樹脂との定着安定性も必須条件の一つと言える。試作の結果を踏まえ、本研究では以下の4種類の布地を選定し、実験を行った。

表 2: 使用した布地の情報一覧

製造・販売元	製品名	組成 (比率)	引用
ユザワヤ商事株式会社	さらさらニット (白)	ナイロン 90%, ポリウレタン 10%	[35]
	スッキリポンチニット (黒)	レーヨン 69%, ナイロン 27%, ポリウレタン 4%	[35]
キャラヌノ	ライクラストレッチ (パール)	ナイロン 83%, ポリウレタン 17%	[36]
	ライクラファイバー (モノトーン)	ポリエステル 79%, ポリウレタン 21%	[36]

選定の理由と特性では、いずれの布地もポリウレタンを含有しており、プレテンション解放時に熱可塑性樹脂を三次元的に変形させるのに十分な収縮力を有し、熱可塑性樹脂と安定して定着できる。

## 3.3 布プリンティング

### 3.3.1 布地の固定プロセス

布地にプレテンションを付与した状態で固定し、その張力を維持したままプリンティングを行う工程は、本手法における主要な技術的課題の一つである。特に、自動レベリ

ング機能を持たない FFF 方式の 3D プリンタを用いる場合、ノズルと布地の距離（Z オフセット）を一定に保つ必要がある。そのため、造形中の樹脂の脱落を防止する、確実な固定手法が求められる。本研究では、使用機材の特性に合わせて以下の 2 種類の手法を実験した。

### クリップ固定

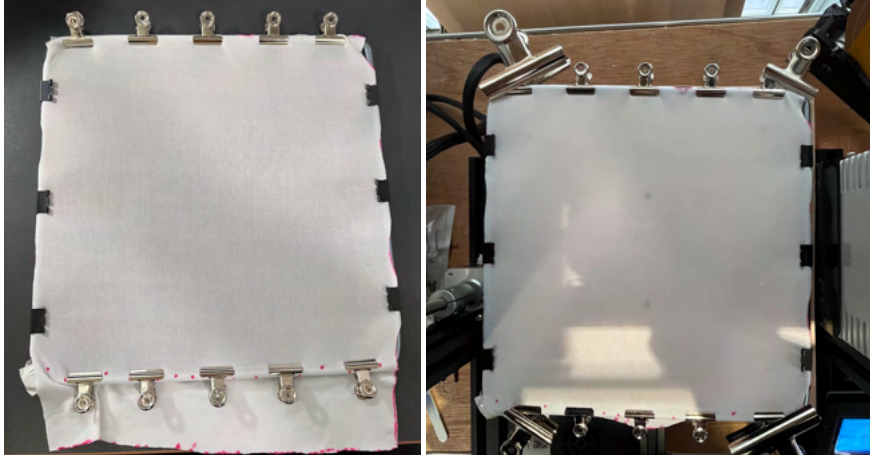


図 41: クリップだけで Creality Ender3 に布を固定する様子

Ender 3 を用いた実験では、金属製フレームに対してクリップを用いた固定を行った (図 41)。

- 使用道具: ダブルクリップ (幅 15mm) および目玉クリップ (幅 42mm) の 2 種類を使用した。
- 方法: 布地の端部をフレームに巻き込み、積層中の振動やノズルとの接触による位置ずれを防止するため、フレームのビルドプレートへの固定、および布地のフレームへの固定を、複数箇所のクリップを用いて実施した。
- 留意点: 張力の高い布地を使用する場合、高い保持力を有するクリップによる補助が不可欠となる。また、ノズルの移動経路とクリップが干渉することを避けるため、設置位置を適切に調整する必要がある。

## ゴム磁石固定

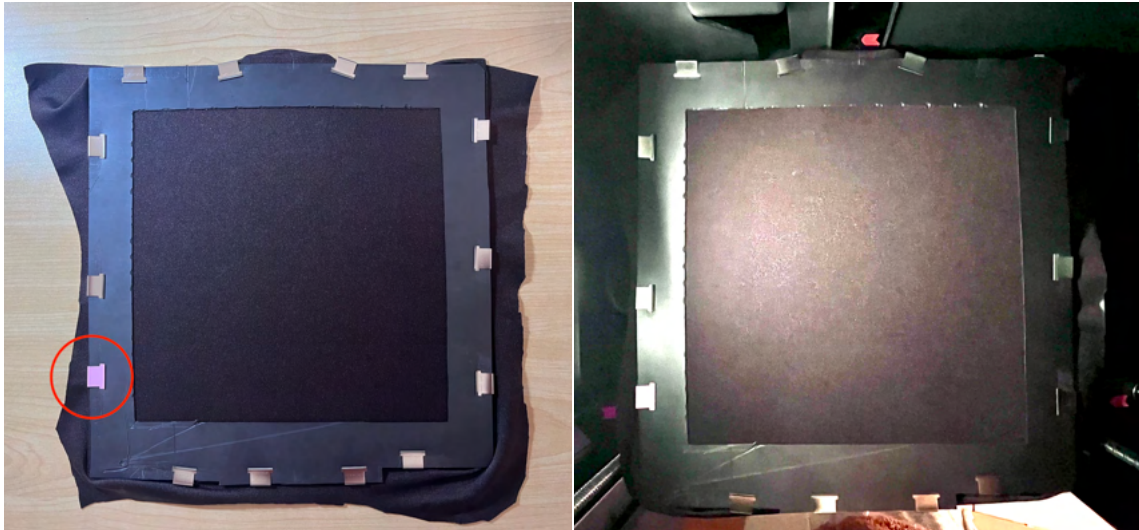


図 42: ゴム磁石とクリップで Bambu lab P1S に布を固定する様子

Bambu Lab P1S 等の金属製ビルドプレートを採用している機材では、磁力を利用した固定手法を試みた。

- 使用器具: 大型クリップ (目玉クリップ等) も布地の固定に利用可能であるが、その本体の厚みが金属プレートの厚みに加算されることで、自動レベリングの際にノズルがクリップと干渉し、均一な高さ測定を阻害するリスクがある。そのため、本工程では極めて薄い形状を持つ「ペーパークリップ」を採用した (図 43)。



図 43: ペーパークリップ

(<https://amzn.asia/d/c1VDv30> より引用)

- 固定方法: ゴム磁石シートとスチールプレートの上に布地を挟み込み、磁力による密着を利用して布地を全方向へ均一に伸張・固定する。 Bambu Lab P1S のビルドプラットフォームに布地および金属プレートを設置する際は、造形精度を確保するため、プラットフォームの奥端にプレートが完全に密着していることを手で確認する (図 44 左)。

磁力のみでは布地の収縮応力を完全に抑制できない場合があるため、ゴム磁石フレームの上からさらにクリップでプレート端部を固定する二重の拘束手法を採用した。この併用手法により、造形プロセス全体を通じて布地の平坦性と張力が安定し、自律的な形状生成が可能となった。



図 44: ゴム磁石を設置する時の注意点

- 留意点: 素材をペーパークリップで固定する際、クリップの厚みにより生じるわずかな隙間を埋めるため、切断したゴム磁石の端材を裏面に敷き、高さを補足する (図 44 右)、しかし、高すぎるもよくないので注意が必要となる (図 45)。なお、Bambu Lab P1S を使用する場合、(図 42) の赤印で示した位置にクリップを配置すると、プリントヘッドやクリーニング機構が物理的に干渉する恐れがある。クリップの固定位置については、ヘッドの可動範囲を十分に考慮し、干渉しない位置へ調整することが不可欠である。

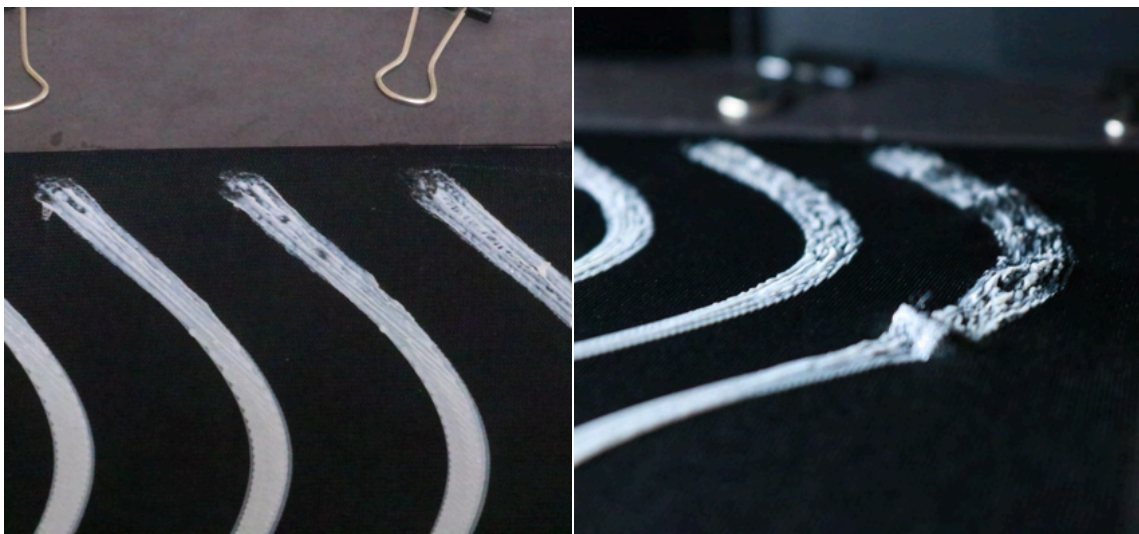


図 45: ゴム磁石乗せすぎて、印刷がうまくいかなかった様子

### 3.3.2 ノズル干渉回避策

布地をプラットフォームに固定するために配置するクリップは、造形プロセスにおいてノズルやツールヘッドの進行を妨げる要因となる。特に、プリント開始時のノズル清掃やヘッドの移動経路においてクリップとの衝突が発生すると、機材の破損や布地の位置ずれ、さらには造形失敗を招く。これはデスクトップ型 3D プリンタを用いた布地への造形における、最も重要な技術的課題の一つである。

本研究では、3D プリンタの動作を制御する G-code を編集することでこの問題を回避した。以下に対策事例を記述する。

### 自動レベリングなしの機種

スライサーが出力する標準的な Start G-code は、布地固定用のクリップを考慮していない。そこで、以下の 2 点に主眼を置いて G-code を編集した。

ホーム復帰後、ノズルがクリップを乗り越える十分な高さを維持させる。

X および Y 座標をビルドプレートの中央寄りに設定し、クリップの設置エリアを回避する。以下に、編集後の Start G-code の抜粋を以下に赤い文字で示す。

```
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; extruder relative mode
M104 S150 ; set temporary nozzle temp to prevent oozing during homing
G4 S30 ; allow partial nozzle warmup
G28 ; home all axis
G1 Z50 F240
G1 X25.0 Y30 F3000
M104 S200 ; set final nozzle temp
M109 S200 ; wait for nozzle temp to stabilize
G1 Z5 F240
G92 E0
G1 X125.0 Y30 E10 F360 ; prime the nozzle
G1 Y60
G1 Z0.20 F240
G92 E0
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; use relative distances for extrusion
...
```

多くの 3D プリンタは、ノズル内の残存樹脂を排出するためにプレート端に (図 46) を描画する設定となっている。しかし、Ender 3 等の標準設定ではプレートの最外周を走行するため、固定用クリップと衝突する危険性が極めて高い。

衝突を回避できない場合は、直ちに本体の主電源を遮断し、物理的な損傷を防ぐ必要がある。本研究では、このリスクを最小化するため、スライサー設定内のパージライン描画スクリプトを、クリップの干渉を受けない内側の領域へ移動させる修正を行った。

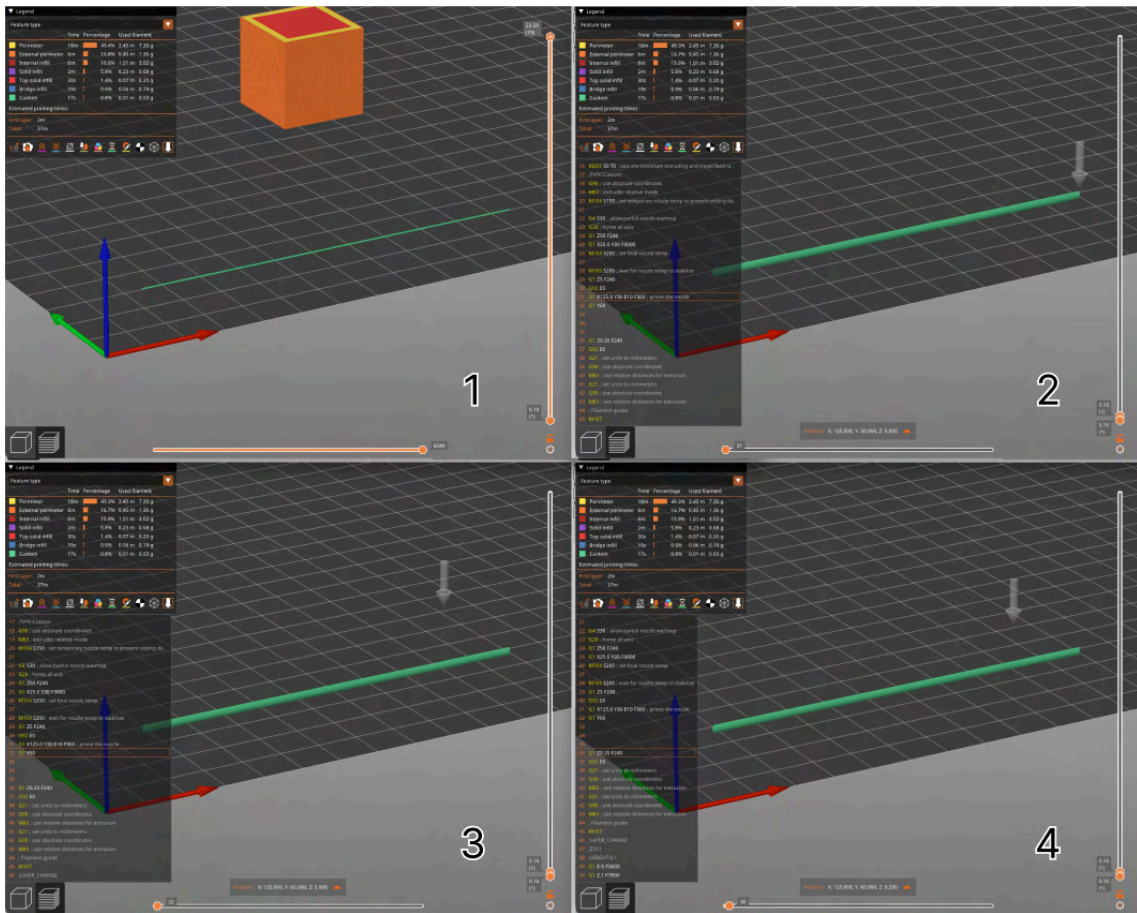


図 46: PuraSlicer の緑のパーズラインを示す。1)普通のパーズライン。2)Z軸を5mmまで上げたパーズライン。3)パーズコードが終わった後にノズルの位置をセンター寄りに移動する。4)Z軸を下げ、印刷を開始する前。

(PuraSlicer より撮影)

### 自動レベリングありの機種

自動レベリング機能を備えた Bambu Lab P1S においても、標準の Start G-code はビルドプレート外縁での動作を含むため、固定用クリップとの干渉リスクが存在する。本項では、P1S における Start および End G-code の改善点について述べる。

まず、P1S の Start G-code は非常に多くの制御コマンドで構成されているが、特にパーズ動作（ノズル清掃）を規定する「Nozzle Load Line」セクションの修正が不可欠である。本研究では、以下の 2 点を変更した。

```

;===== nozzle load line ===== M975 S1
G90
M83
T1000
G1 X38.0 Y31.0 Z8.8 F18000;Move to start position
M109 S{nozzle_temperature_initial_layer[initial_extruder]}
G1 Z8.8
G0 E2 F300
G0 X100 E15 F{outer_wall_volumetric_speed/(0.3*0.5) * 300}
G0 Y41 E0.700 F{outer_wall_volumetric_speed/(0.3*0.5)/ 4 * 300}

```

```
G0 X100.5
G0 E0.2
G0 Y31.5 E0.700
G0 X38 E15 F{outer_wall_volumetric_speed/(0.3*0.5) * 600}
M400
...
```

パーズ動作時のノズル高度がクリップに接触することを防ぐため、上記赤印のZ軸の値を変更した。具体的には、クリップに衝突しないよう、Z軸高度を8.8mmに設定することで、物理的な衝突を回避するセーフティ高度を確保した。

標準設定ではプレートの端に沿って長いパーズラインが描画されるが、クリップの設置位置を避けるため、X軸およびY軸の移動距離を短縮した。これにより、パーズ動作をプレート中央寄りの安全な領域に限定させた。

造形完了直後、ツールヘッドは通常、所定の待機場所へ高速で移動する。この際、ツールヘッドのZ座標が十分に確保されていないと、布地を固定しているクリップや、自己形成によって隆起した造形物にノズルが衝突し、機材の破損や作品の損傷を招く恐れがある。本研究では、Bambu Lab P1SのEnd G-codeを以下のように編集し、水平移動を開始する前に垂直方向のクリアランスを物理的に確保する仕様とした。

```
;===== date: 20230428 ===== M400 ; wait for buffer
to clear
G92 E0 ; zero the extruder
G1 E-0.8 F1800 ; retract
G1 Z{max_layer_z + 20} F900 ; lower z a lot
G1 X65 Y245 F12000 ; move to safe pos
G1 Y265 F3000
```

標準設定からの主な変更点は、赤印のところで、G1 Z{max\_layer\_z + 20}の記述である。ここでは変数値であるmax\_layer\_zに対して20mmのオフセットを追加した。P1Sのようなビルドプレート降下型のプリンタにおいて、Z値の増加はプレートの降下を意味する。水平移動(X, Y軸移動)を行う前にZ軸を20mm下げて退避させることで、プレート外縁に配置された高さのあるペーパークリップとの物理的干渉を完全に回避することが可能となった。

### 3.3.3 ベッド高低差によるプリンティング品質

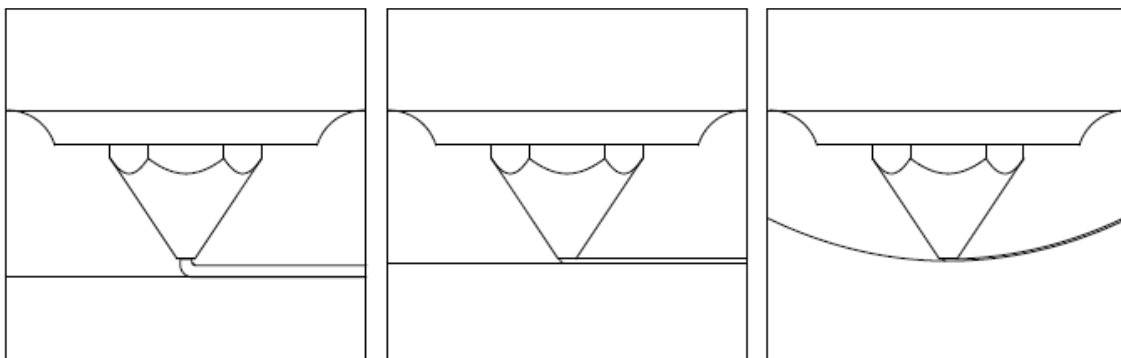


図 47: ノズル高さの違いが定着性に及ぼす影響を示す模式図。定着不良 (左)、良好 (中)、最良 (右) の各状態を表している。

([30] p71 より引用)

自動レベリング機能を持たない Ender 3 においては、造形前にビルドプレートの水平レベリングを手動で行う必要がある。本研究のように布地を造形面として用いる場合、通常の樹脂プリントよりも厳密な高さ調整が求められる。調整の目安として、ノズルが布地表面に接触し、布の繊維をわずかに押し込む状態を理想的な Z 軸の原点 (Z=0) とした(図 47)。

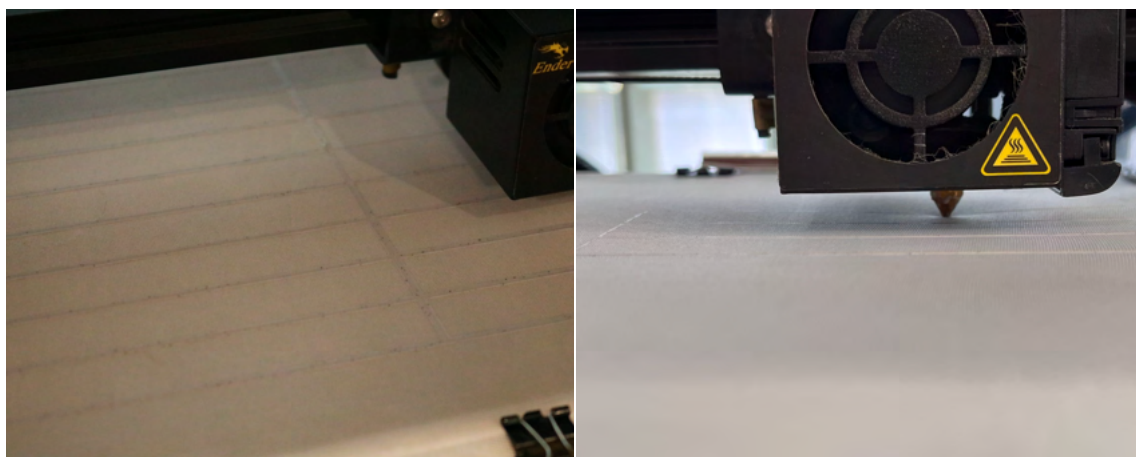


図 48: Ender3 の造形様子

(撮影者: 筆者)

Bambu Lab P1S は、造形開始前にノズルを用いてビルドプレート上の複数ポイントを自動で測定し、その平均値から仮想的な水平面を算出する自動レベリング機能を備えている。しかし、本研究のようにプレートの四辺をペーパークリップで固定する場合、クリップの厚みや保持圧によってプレートの外周部がわずかに浮き上がり、相対的に中央部が凹む現象が発生しやすくなる。

前述のように(図 49)、この高低差を解消し、ビルドプレートの平坦度を確保するため、本研究ではゴム磁石シートの端材を用いた物理的なレベリング補正を行った。具体的には、金属プレート下の磁石シートとプレート間に、適切な厚みに調整したゴム磁石の端材をスペーサーとして挿入した。これにより、クリップによる外周部の浮き上がりを相殺し、ノズルがスキャンする全域において布地表面を可能な限り水平かつ均一な高度に保つことが可能となった。

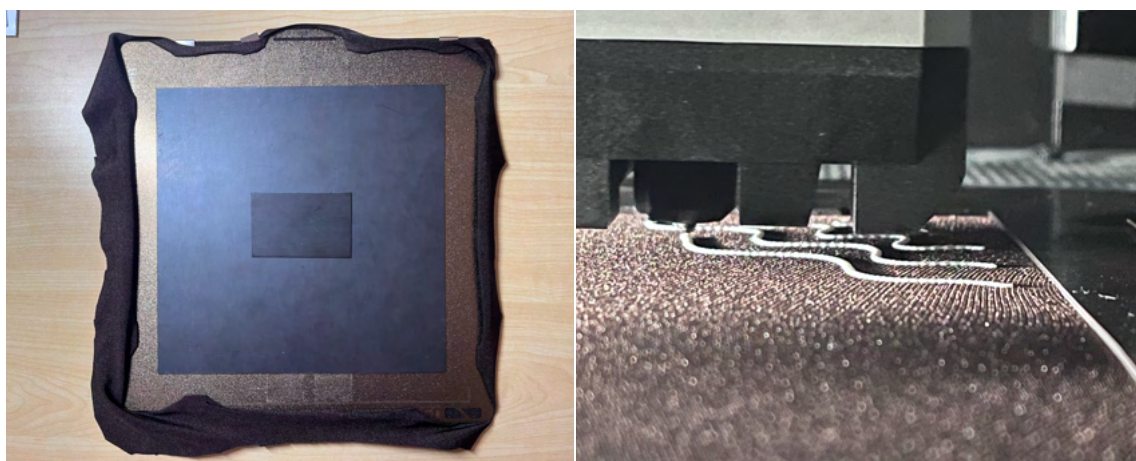


図 49: Bambu Lab P1S の造形様子

(撮影者：筆者)

この歪みが生じた状態で ABL(Auto Bed Levelling)を実行すると、算出された水平面と実際の布地表面の間に微細な誤差が生じ、特にプレート中央部での定着不良の原因となる。

### 3.3.4 熱可塑性樹脂の種類検討

本研究では、自己形成の制御および構造体の機能性を検証するため、特性の異なる 2 種類の熱可塑性樹脂、PLA (ポリ乳酸) および TPU (熱可塑性ポリウレタン) を選定した。フィラメントは、いずれも Overture 社製品を採用した。

- PLA (Polylactic Acid):

高い剛性と冷却時の収縮特性を持つため。布地にプリントした際の収縮応力を利用し、平面から立体へと自己形成させる駆動力として最適である。また、低い熱収縮率により造形中の反りが少ない。

- TPU (Thermoplastic Polyurethane):

高い弾力性と柔軟性を持つため。布地の柔軟性を損なわずに構造を補強する場合に用いる。また、布地の繊維に対して物理的に絡みつきやすく、高い定着性が期待できる。

表 3: 本研究におけるフィラメント別の自己形成布地用推奨印刷設定

設定項目	PLA (Overture)	TPU (Overture 95A)	備考
ノズル温度	190°C – 220°C	210°C – 230°C	TPU は高温の方が繊維への浸透が良い、しかし高すぎると冷却に間に合わず
ベッド温度	0°C	0°C	本研究では 0°C に設定している
印刷速度	5 – 25 mm/s	*7 – 10 mm/s	*ここは PIS だけに実験した
第 1 層の厚み	0.1 – 0.3 mm	0.1 – 0.2 mm	布地への押し込みを考慮
ファン速度	100%	50 – 100%	粘着度に応じて調整が必要

### 3.3.5 布地伸縮率の計算

本研究は布の伸縮率を手動で記号をマークし、手動で布を引き延ばす。そのために 3D プリンタで自作の道具を制作した。

本研究では、布地に付与する初期張力を定量化するため、以下の式に基づき伸張率  $S$  を算出した。

伸張後の長さを一定 ( $L_0 = 200 \text{ mm}$ ) とし、それに対する無負荷時の布地の長さ  $L_1$  の比率から伸張率を定義した。

$$S = \frac{L_0}{L_0 - L_1} \times 100 \quad [\%]$$

ここで、

- $L_0$  治具によって固定される伸張後の長さ (200 mm 固定、ゴム磁石フレーム内側長さ)
- $L_1$  布地の無負荷時における長さ。治具の範囲 (ペンでマークすることが多い)。

例として、無負荷時の長さ  $L_1$  が 67 mm の布地を 200 mm まで引き伸ばした場合、伸張率  $S$  は約 150% となる。

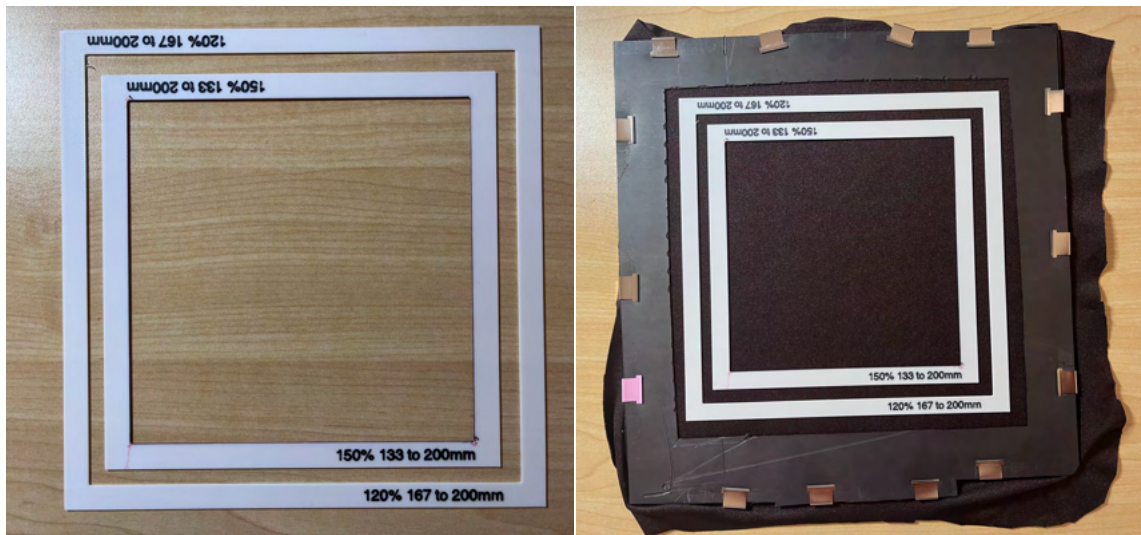


図 50: 本研究が使った道具、無負荷前布に道具の内部にそってマークし、最後はマークをゴム磁石までを伸長すると固定伸縮率で 3D プリティングできる。

(筆者撮影)

手動での正確なサンプリングを行うため、3D プリンタで制作した専用の測定・伸張道具を使用した。手順は以下の通りである。

1. 無負荷状態の布地を治具にセットし、ペンを用いて道具の内部幅に沿って、距離  $L_1$  に基準点をマークする。
2. マークした基準点が、ゴムフレームの固定端 ( $L_0 = 200mm$ ) に到達するまで布地を手動で引き伸ばす。
3. 規定の長さに達した状態で布地をフレームに固定する。

## 第4章. 自己形成布地を用いた布型枠の試作と転写実験

### 4.1 布型枠の形状検討と実験の目的

#### 4.1.1 概要

本章で行う実験の主な目的は、自己形成布地をコンクリート型枠として成立させるための、熱可塑性樹脂と布地の接合性の検証、およびコンクリート表面へのテクスチャー転写手法の探索である。具体的には、先行事例における形状や係数を参照し、自己形成布地によって作製したサンプルに対し、実際にコンクリートの打設実験を行った。

造形プロセスにおいては、スライサーソフトウェア「PrusaSlicer」および「Bambu Studio」を併用し、布地に粘着しやすいようパラメーターを調整した独自の Start/End G-code を用いて出力を行った。

本節では、自己形成布地が布型枠としての役割を十分に果たし、流体状のコンクリートの側圧に耐えうる形状を検討した。本研究では、以下の2種類の造形アプローチに分類して検証を行う。

1. ボトム密閉型 3D プリントによって布地を立体的に拘束し、コンクリートの注入口を除いた底部および側面を一体的に密閉する形状である。造形後の追加加工を最小限に抑え、自己形成布地による複雑な曲面をそのまま布型枠として利用することを目指す。

2. 二次加工型 すべての自己形成布地が単体で密閉構造を成すわけではないため、造形後の布地をミシン等で縫製・加工し、布型枠へと仕立てる手法である。自己形成布地によるテクスチャー付与の自由度と、布型枠としての実用的な堅牢性の両立を試みる。

#### 4.1.2 ボトム密閉型

単一の自己形成布地によって型枠として成立し得る形状としては、コーヒーフィルターのような円錐形状が代表的である。また、自己形成布地は一般にアーチ状の曲面を形成する特性を持つ。本研究では、この形状を反転させ、その内部にコンクリートを充填する手法についても実験を行った。

##### 円錐状布型枠によるテクスチャー転写

まず、円錐状に変化する自己形成布地の造形にあたり、Kycia ら [37] の制作記録における「Prototype nr.06\_03」を参考とした。この自己形成布地を布型枠として使い、内部にコンクリートを打設した結果、コンクリートの側圧および荷重に耐え、自己形成布地特有のテクスチャーや布の質感を精緻に転写することが確認できた (図 51)。



図 51: 円錐状の布型枠と作られたコンクリート

円錐状の布型枠は、荷重を支持し形状を維持する剛性は有しているものの、単体での自立は困難である。そのため、打設に際しては別途支持具を用いて固定を行った。また、離型時には図 52 に示す通り、布型枠を容易に取り外すことが可能であった。この結果から、布型枠自体の再利用性についても検討の余地があることが示唆された。

しかし、こうした単体形状の検討のみでは、先行事例が限られていることもあり、拡張性において限界があると判断した。

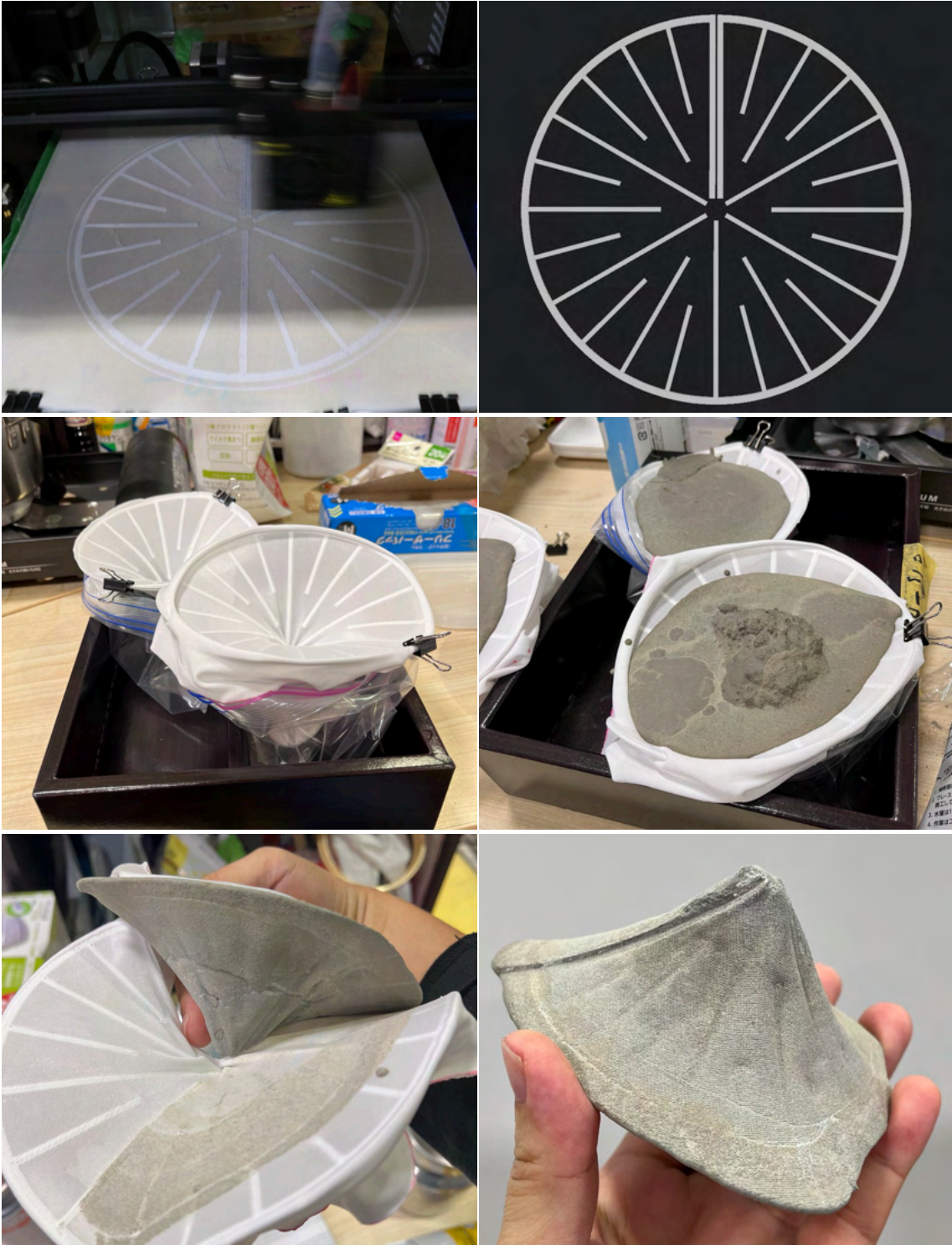


図 52: 円錐状布型枠にコンクリートを流し込むから離型までの様子

## アーチ形状の応用と外枠による支持

アーチ状のたわみを持つ形状は、熱可塑性樹脂（PLA）で長尺の直線を3Dプリントした際、布地の張力と樹脂の収縮応力によって生じやすい。そのため、プリントモデルを長めに設計することで、多くの造形において任意のたわみを得ることが可能である。

本実験では、同様に Kycia らの研究を参考に「Prototype nr.02\_07」をベースとした造形を行った。図 53 に示すように、直線状のモデルを積層した場合、自己形成によって得られた美しいアーチ形状をコンクリート表面に転写することが可能となった。

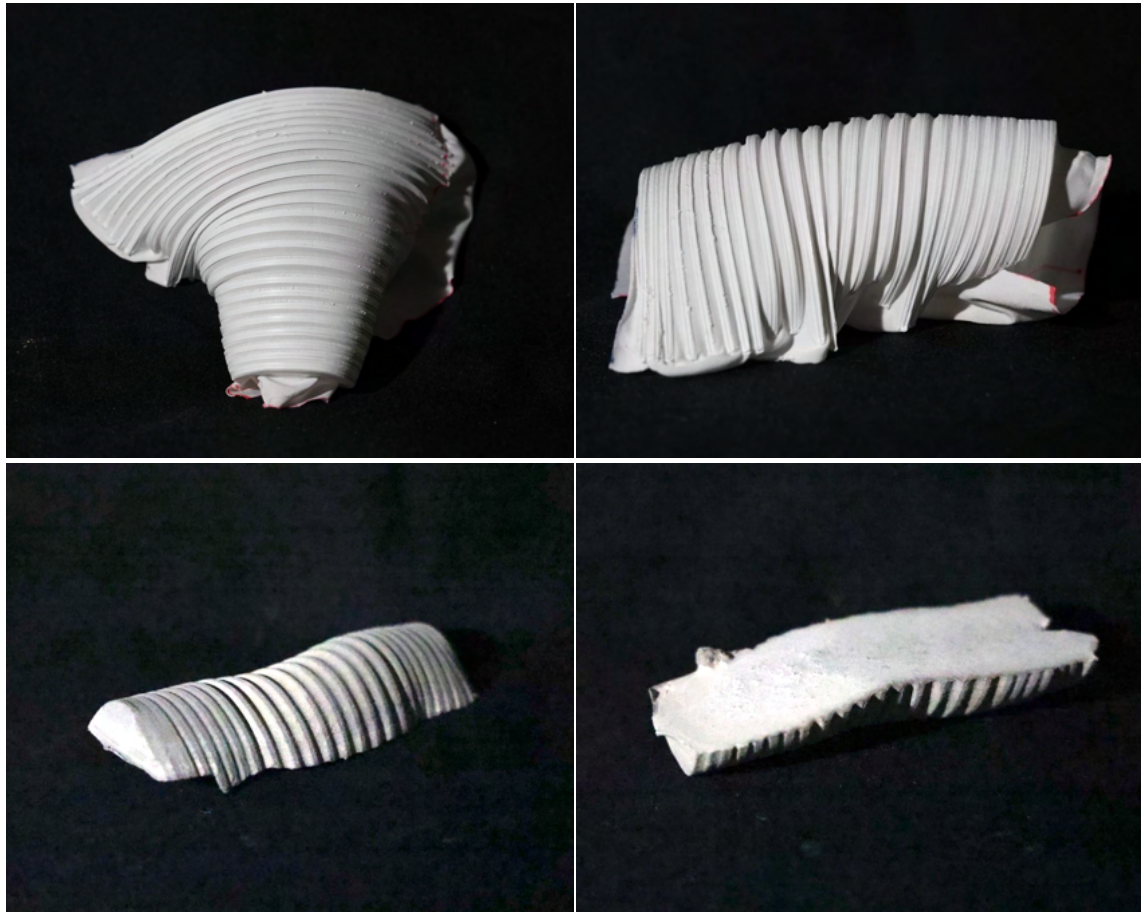


図 53: アーチの布型枠と作られたコンクリート

これらの形状についても自立性に欠けるため、実験では図 54 に示す通り、段ボール製の外部支持枠を製作し、布型枠を固定した状態で打設を実施した。

しかし、型枠側面の間隙からコンクリートの流出が発生し、十分な充填が困難であった。この結果から、支持枠と布型枠の接合部における密閉性の確保に課題があり、現時点では手法としての成立性が低いと判断した。



図 54: アーチの布型枠にコンクリートを流し込むから離型までの様子

### 4.1.3 二次加工型

多くの自己形成布地は、単体では布型枠として十分な密閉性や容積を確保することが困難な場合が多い。そこで本研究では、造形後の自己形成布地にミシンによる縫製加工を施し、付与されたパターンを維持したまま立体的な型枠として機能させられるかについて検討した。

検証の結果、縫製を施した布型枠は固定および脱型に多大な時間を要し、作業効率において課題があることが判明した。また、注入されたコンクリートの側圧および荷重を適切に支持できず、底部へ過度に重量が集中する結果となった（図 55）。この荷重の偏りより、型枠全体の形状が歪むだけでなく、熱可塑性樹脂によって付与したテクスチャをコンクリート表面へ正確に転写することも困難であった。

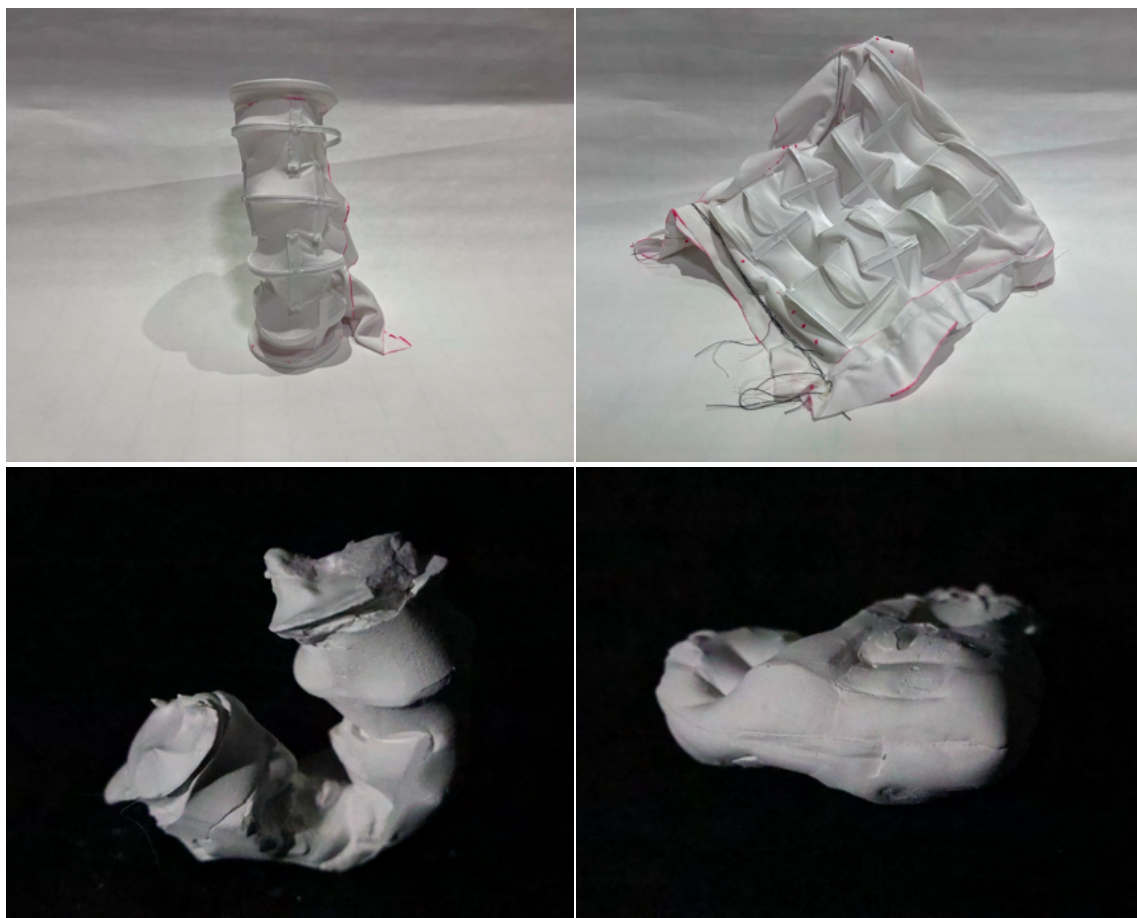


図 55: 2 種類の二次加工型布型枠と作られたコンクリート



図 56: ミシンで布型枠を制作し、その中にコンクリートを流し込む様子

#### 4.1.4 考察

本節では、自己形成布地を布型枠として実用化するための具体的な手法とその限界について検証を行った。一連の実験を通じて得られた知見を、以下の通り総括する。

自己形成布地は、外部応力に対して容易に変形する特性を有している。検証の結果、布地と熱可塑性樹脂間の接合強度は、コンクリート打設時の側圧および自重を支持する構造材としては不十分であることが明らかとなった。特に、荷重が集中する箇所では布型枠の形状維持が困難となり、積層したテクスチャが変形することで、意図した造形表現が損なわれる結果が確認された。

以上の知見から、コンクリートの重量が、自己形成布地のテクスチャを鮮明に転写させるための支配的な要因であるとの示唆を得た。次節ではこの仮説に基づき、改めて表面テクスチャの転写再現性に主眼を置いた実験的検証を行う。

## 4.2 テクスチャー転写手法の改善

### 4.2.1 概要

本節では、自己形成布地単体で型枠の全機能を担わせるという当初の目標に対し、前節で抽出された課題を踏まえた手法の改善を試みた。具体的には、自己形成布地によって形成されるテクスチャの保持に主眼を置き、コンクリートの打設プロセスを以下の2通りに設定し、比較検証を行った。

No.1 一括充填法：布型枠に対し、規定量のコンクリートを一度に全て充填する従来の手法である。

No.2 刷毛塗布法：布型枠の内表面に対し、刷毛を用いてコンクリートを薄く多層に塗布し、表面層を形成した後に厚みを増していく手法である。この手法により、コンクリートの側圧によるテクスチャの圧潰を最小限に抑え、熱可塑性樹脂によって設計された微細なパターンを精緻に転写することが可能になると考えた。

### 4.2.2 一括充填法による試行



図 57: コンクリート一括充填法に使った布型枠と離型した制作物

自己形成布地を型枠として用い、従来と同様にコンクリート全量を一括で充填した。本実験は、コンクリートの側圧がテクスチャの転写再現性に与える影響を明らかにするための対照実験として実施したものである。(図 57)

コンクリートを一気に布型枠に注入した際には仮設した通りに自己形成布型枠のテクスチャが重量に潰されて、コンクリートに転写がうまくできなかった。



図 58: 自己形成布地に 3D プリント型枠に打設と離型の様子

実験の結果、コンクリートを一括で充填する従来の手法では、意図したテクスチャをコンクリート表面へ精緻に転写させることは極めて困難であることが判明した。

柔軟な布地に対し、流体状のコンクリートが急激な側圧を与えたことで、熱可塑性樹脂によって形成された微細なパターンに歪みが生じたものと考えられる。これは、一括充填という手法そのものが持つ構造的な限界を示唆している。

以上の考察に基づき、自己形成布地特有の有機的なテクスチャを維持しつつ、3Dプリントによって制御された形状を精度良く転写するためには、打設プロセスを抜本的に変更する必要があるとの結論に至った。

#### 4.2.3 刷毛塗布法による打設手法

市販の刷毛を用い、意図的に流動性を高めたコンクリートを布型枠表面に薄く積層するプロセスを検証した。まず、少量のコンクリートを用いて表面層を先行して硬化させ、その後に構造的な厚みを付加することで、テクスチャの圧潰を最小限に抑える手法を考案した。初期層には、標準的な配合よりも水セメント比を高めたコンクリートを調製した。これは、刷毛の含浸性を向上させ、自己形成布地の微細な凹凸に対してコンクリートを隅々まで確実に浸透させるための措置である。実験では、以下のステップに従って打設を行った。

初期層（第1層～第3層）の塗布：布型枠の表面に対し、刷毛を用いてコンクリートを薄く均一に塗布する作業を合計3回繰り返した。各層の塗布間隔には約20分間の待機時間を設定し、下層の初期硬化を待って次層を重ねることで、初期層の定着を確実なものとした。

構造層の充填：3層の塗布完了後、標準的な硬化時間の約2分の1を経過させた後に、最終的な厚みが約3～5cmとなるよう、市販品の推奨配合比に基づく通常のコンクリートを型枠内へ充填した。



図 59: 刷毛塗布法に使った布型枠と離型したコンクリート

結果、自己形成布地が有する微細なテクスチャーを、コンクリート表面へ完璧に転写することが成功した (図 59)。一括充填法で見られたような荷重によるテクスチャや形状の崩落は回避され、熱可塑性樹脂によって設計された質感を保持したコンクリートタイルが綺麗に仕上がった。

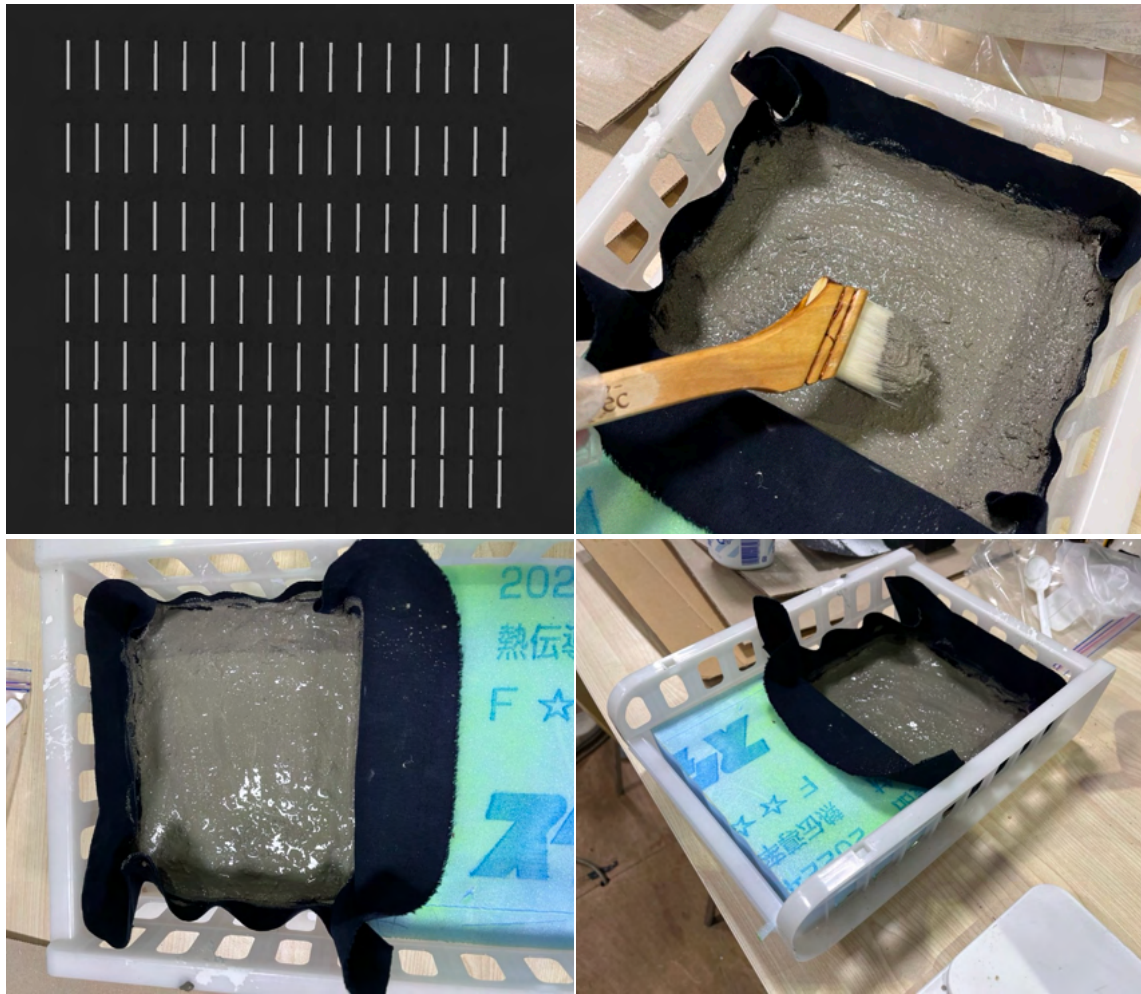


図 60: 刷毛塗布法乾燥の様子

前述の刷毛塗布法により、自己形成布地のテクスチャをコンクリート表面へ精緻に転写可能であることが実証された。この成果を「布纏材（ふてんざい）」の基盤技術と位置づけ、多様なテクスチャパターンへの展開を図るとともに、複数の試作品を制作した。

## 4.3 布纏材の製作と意匠展開

### 4.3.1 概要

前節までの検証を通じ、自己形成布地を布型枠として運用する際には、コンクリートの打設自重が転写精度を左右する極めて重要な因子であることが明らかとなった。

本節では、既報の実験により確立した刷毛塗布法に基づき、多様なパターンの自己形成布地を用いた応用検証を行う。本検証の目的は、独自のコンクリートタイル布纏材の製作手法を体系化し、その意匠的バリエーションを確立することにある。

「布纏材」とは、対象を布で纏うことにより、布特有の質感をコンクリート表面へ精緻に写し取った素材を指す。以下に、本実験で使用した各テクスチャの仕様、出力パラメータ、および造形の結果得られた外観的特徴について述べる。

## 4.3.2 制作詳細

### No.1 破線形状

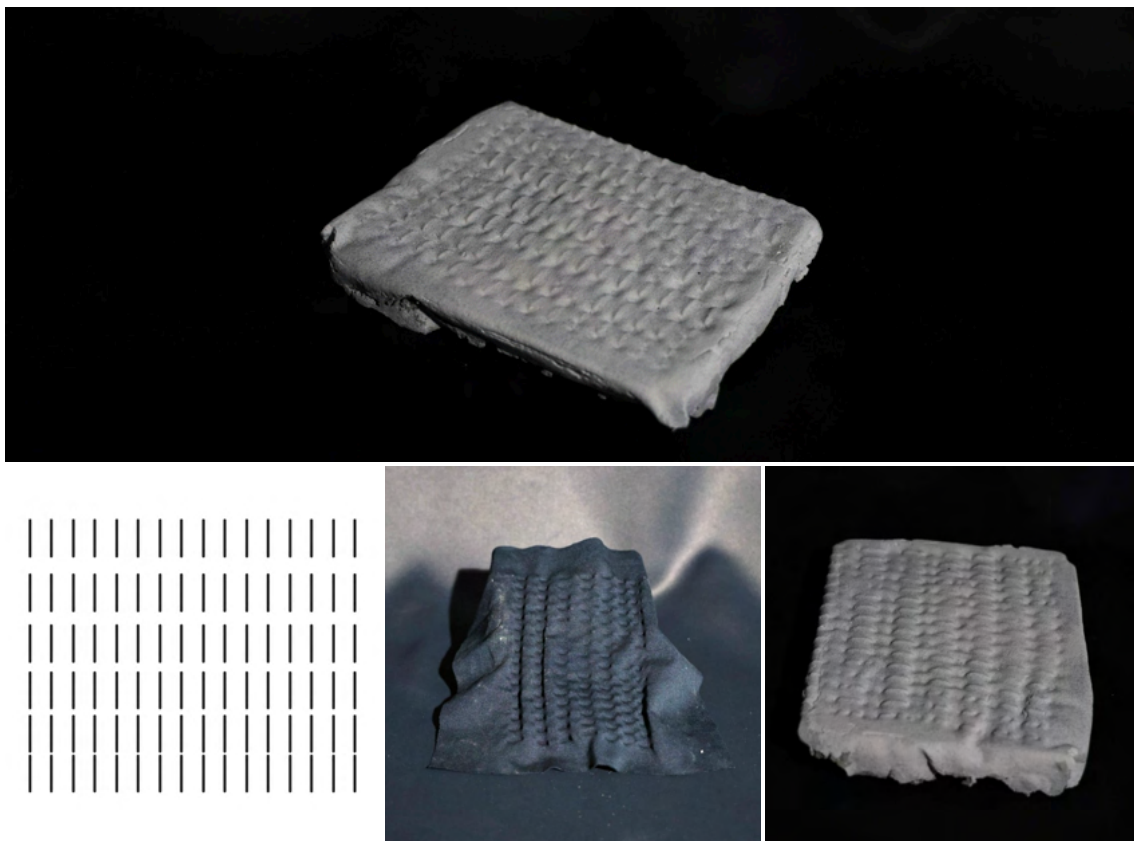


図 61: No.1 点線形状布纏材の制作物

#### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリポンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.2mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 25mm/s, Initial layer: 6mm/s
Model Detail	- Size: 200 x 210mm
	- Line width: 1mm, Thickness: 0.4mm

#### 描写

破線の両端が自己形成布地を牽引することで、点線の間隔ごとに自然な微小アーチ形状が形成される。凹凸の起伏は緩やかで全体として平面に近く、滑らかな触感を有している。

## No.2 波形状

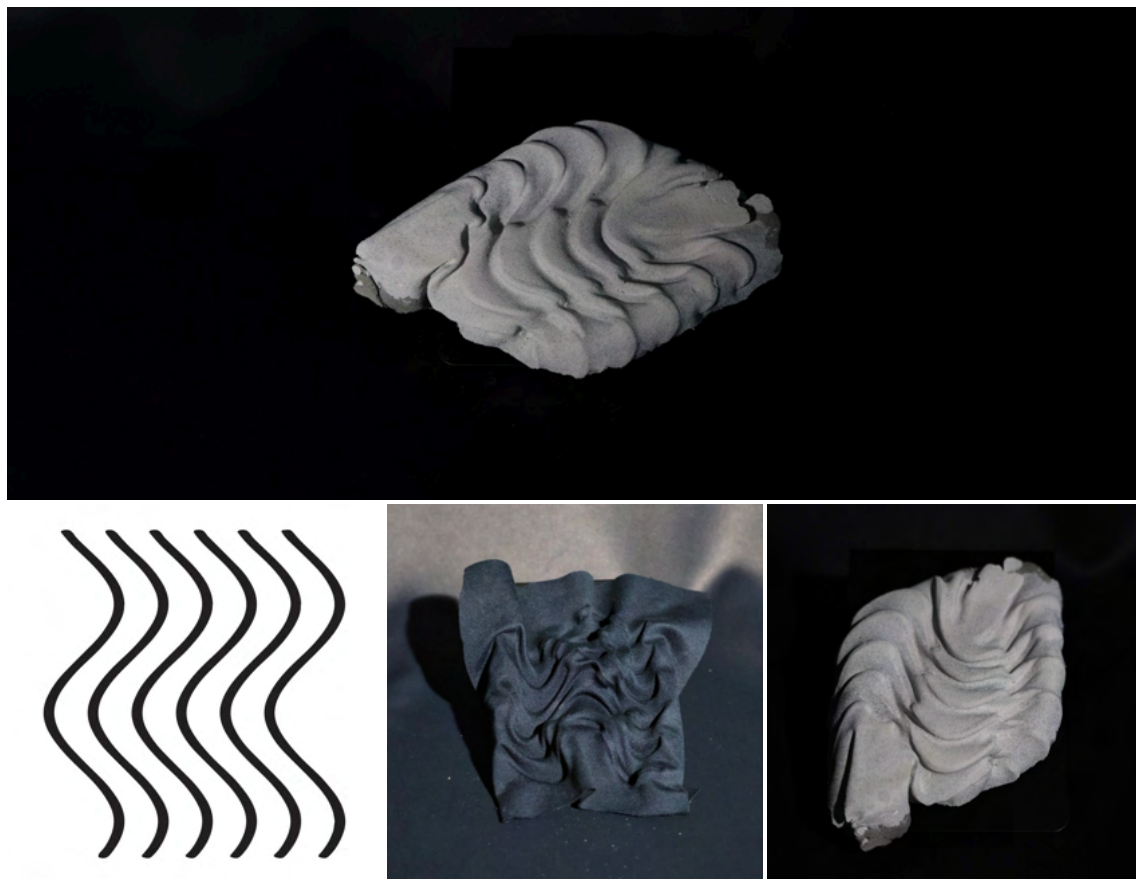


図 62: No.2 波形状布纏材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.2mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 25mm/s, Initial layer: 5mm/s
Model Detail	- Size: 200 x 210mm
	- Line width: 3~5mm, Thickness: 0.6mm

### 描写

一貫して波の形状が精度良く転写された、立体感のある布型枠である。布型枠特有の複雑な造形や、細部にわたるテクスチャを鮮明に観察することができ、布纏材を象徴する形状の一つと言える。

### No.3 斜め破線形状

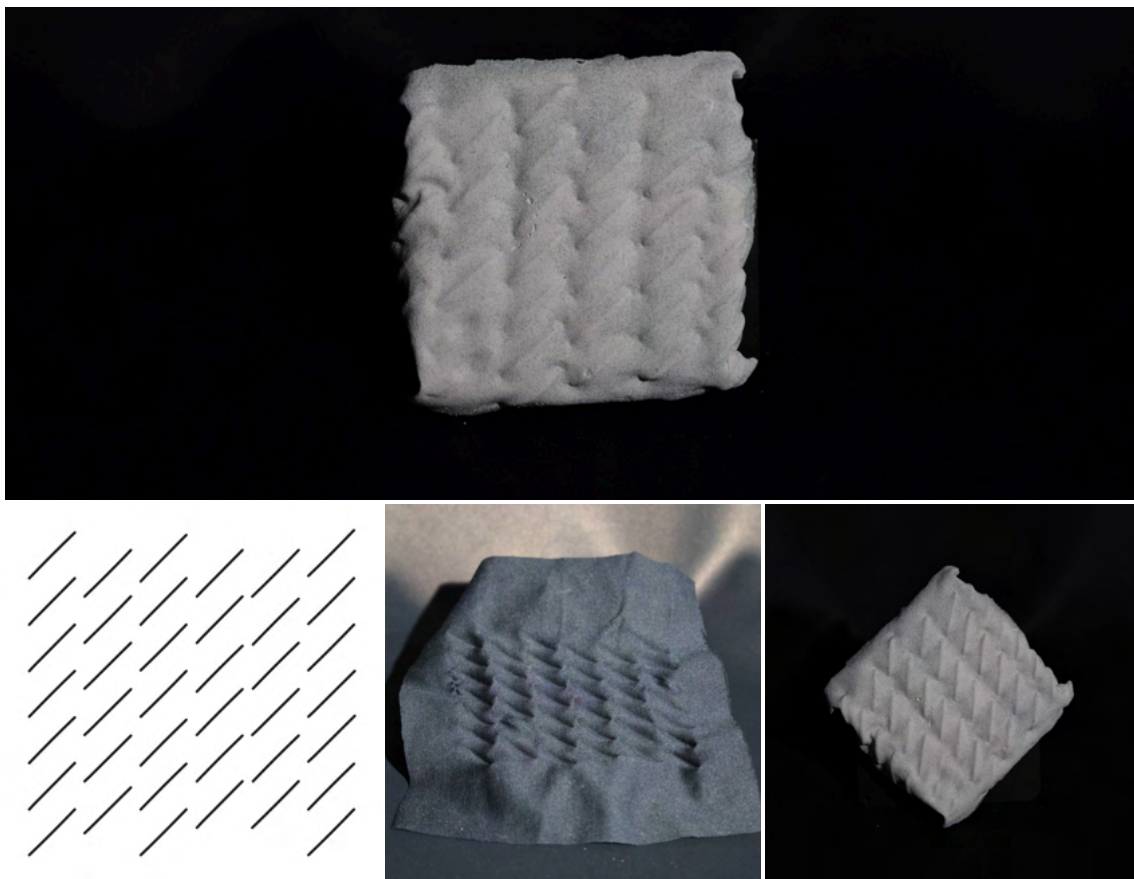


図 63: No.3 斜め破線形状布纏材の制作物

#### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.2mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 25mm/s, Initial layer: 6mm/s
Model Detail	- Size: 176 x 174mm
	- Line width: 2mm, Line length: 35mm, Thickness: 0.6mm

#### 描写

破線を斜めに配置することによって、形成されるアーチ形状がより強調され、自己形成布地がそれらを繋ぐように滑らかな曲線を生成する。布纏材 No.1 の形状と比較して凹凸がより鮮明であり、触覚的・視覚的にもその特徴を容易に判別できる形状となっている。

## No.4 直線交差形状

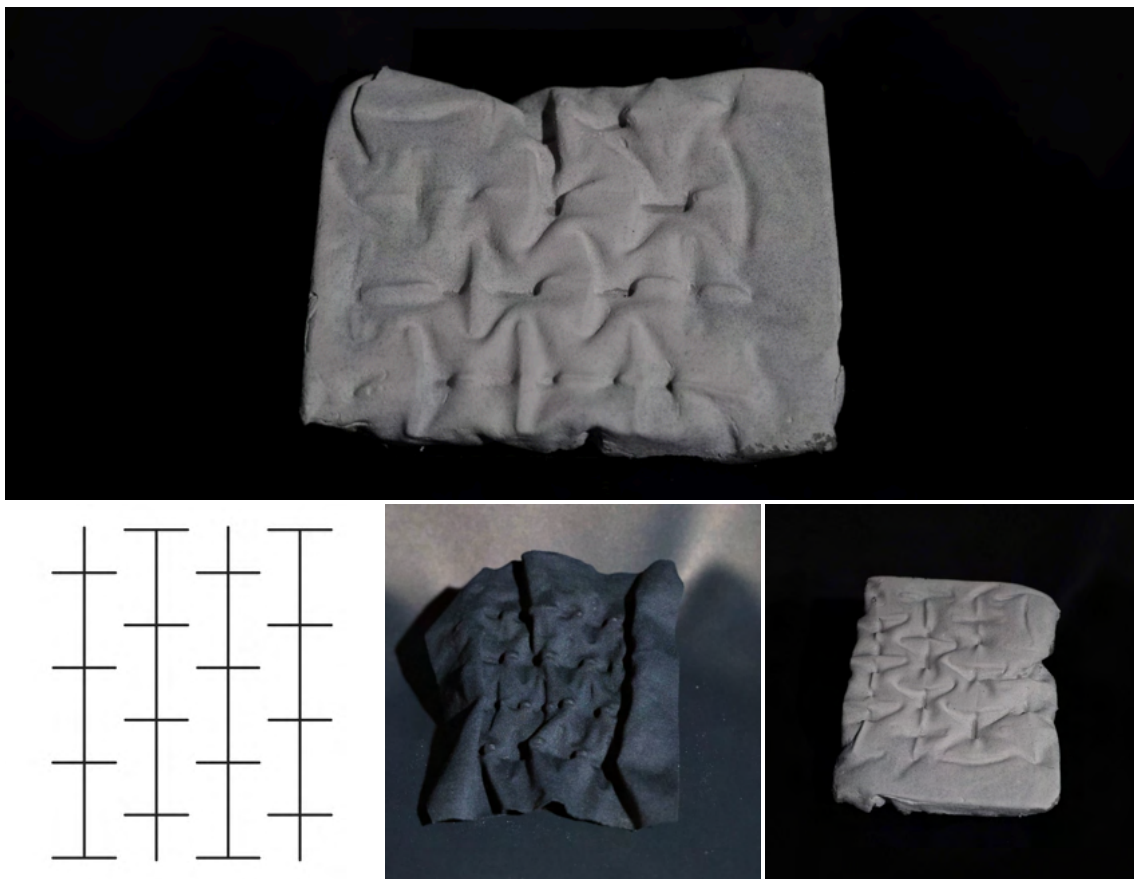


図 64: No.4 直線交差形状布織材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.2mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 25mm/s, Initial layer: 6mm/s
Model Detail	- Size: 180 x 210mm
	- Long line width: 3mm, Line length: 210mm, Thickness: 0.3mm
	- Short line width: 6mm, Line length: 45mm, Thickness: 0.3mm

### 描写

直線形状が重なっているところに起伏する傾向があり、この実験では特にその傾向が見られる。しかし変化が少し堅苦しく感じ、線幅の太さをもっと減少するといい感じになると推測される。

## No.5 波紋形状

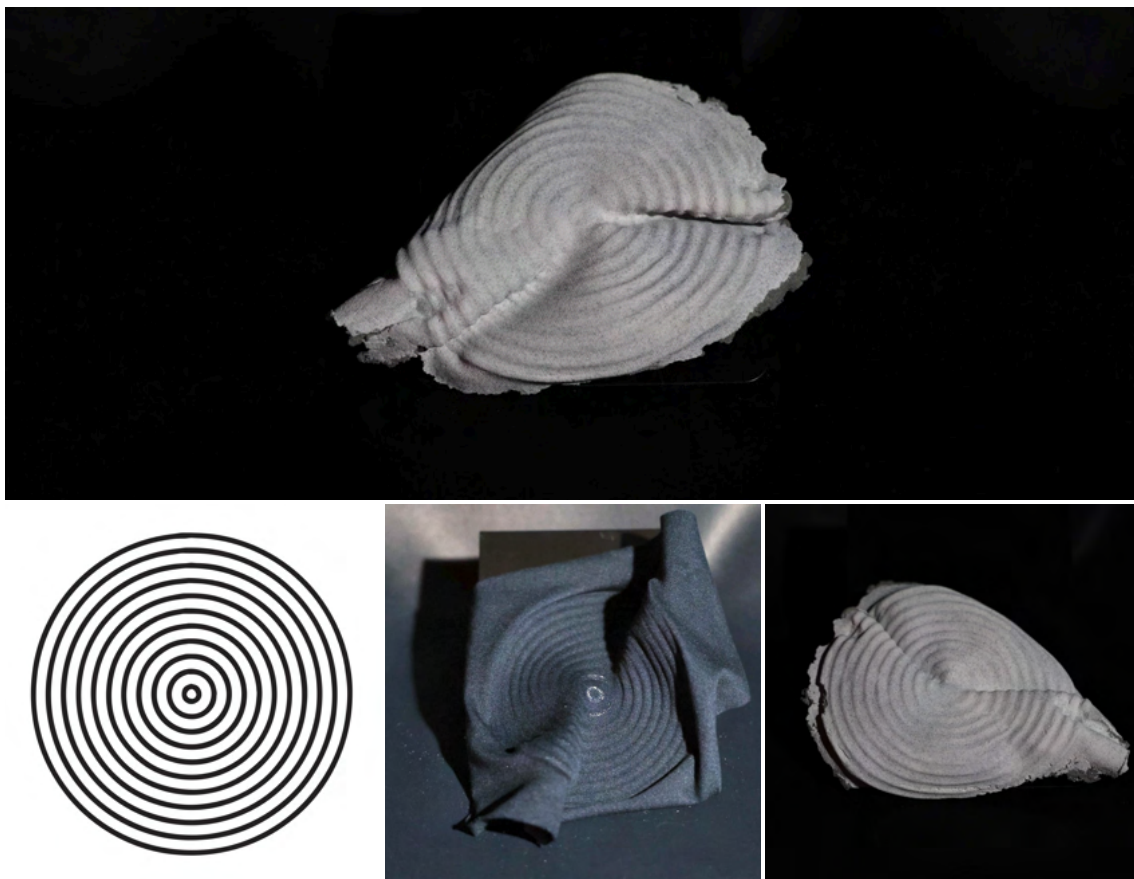


図 65: No.5 波紋形状布纏材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.2mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 25mm/s, Initial layer: 5mm/s
Model Detail	- Size: 180 x 210mm
	- Long line width: 3mm
	- Circle distances: 5.5mm, Thickness: 0.4mm

### 描写

複数の円形パターンが自己形成布地の張力の影響を受けて変形し、その中心部を貫くような放射状のシワが形成される。離型後のコンクリートでは、そのシワの内部の微細な形状まで忠実に再現されており、布型枠でしか実現し得ない独特の造形となっている。

## No.6 波形状 2

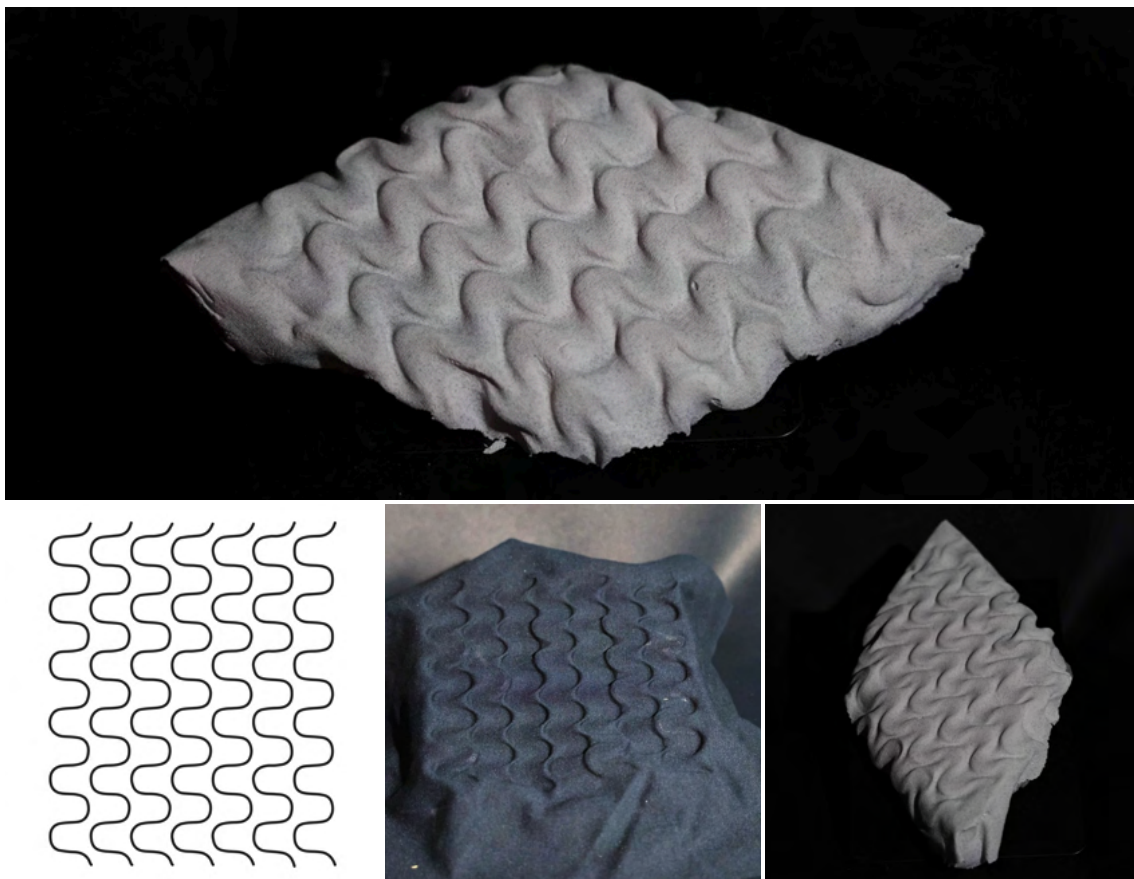


図 66: No.6 波形状 2 布織材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Rectilinear 20%
Initial Layer Height	- 0.1mm
Layer Height	- 0.3mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 40mm/s, Initial layer: 30mm/s
Model Detail	- Size: 178 x 211mm
	- Line width: 3mm, Thickness: 0.4mm

### 描写

布織材 No.2 の波形状よりもさらに微細な自己形成布地を用いることで、優美な仕上がりを実現している。従来のコンクリートでは見ることはできなかった非常に細やかなテクスチャが形成されており、鑑賞者に対して、素材本来の硬質さとは相反する「柔らかさ」という錯覚を与える。

## No.7 直線形状



図 67: No.7 直線形状布織材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Ender3
Filament	- PLA white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- スッキリボンチニット(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.1mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 200°C, Other layers: 200°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1.2
Nozzle Speed	- 60mm/s, Initial layer: 30mm/s
Model Detail	- Size: 203 x 210mm
	- Line width: 3mm - Line Distances: 2mm 4mm 8mm, Thickness: 0.4mm

### 描写

直線という最も単純な形状ゆえに、布の伸縮性によってロール状に巻き込まれてしまう性質があります。しかし、これを型枠として用いることで過度な変形を抑制し、意図的に自然なシワを定着させました。結果として、木目のような表情を持つ、布特有の有機的な造形が形成されています。

## No.8 斜め交差形状

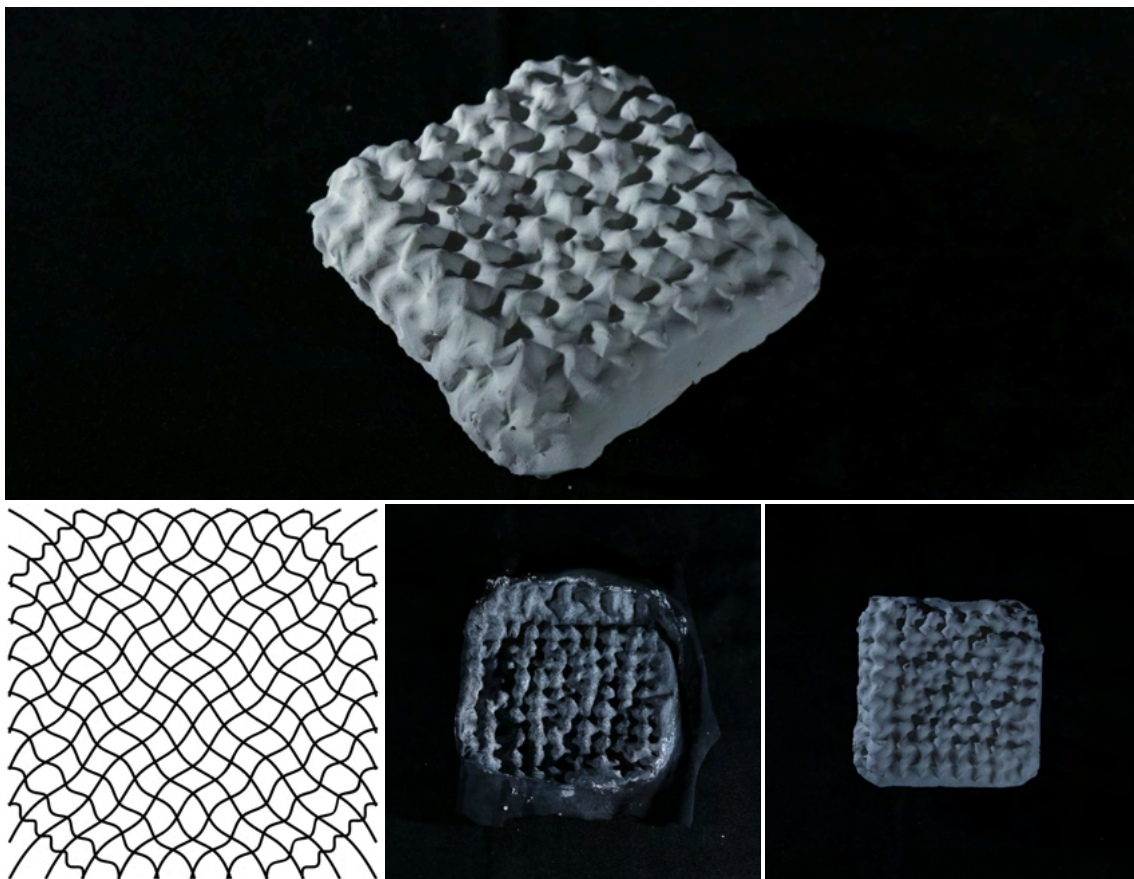


図 68: No.8 斜め交差形状布織材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Bambu Lab P1S
Filament	- TPU white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- ライクラファイバー(Black)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.4mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 240°C, Other layers: 240°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1
Nozzle Speed	- 10mm/s, Initial layer: 7mm/s
Model Detail	- Size: 203 x 210mm
	- Line width: 1.5mm, Thickness: 0.8mm (Overlapping: 0.4mm)

### 描写

岩石のような質感を呈しており、このテクスチャは屋外空間に設置しても周囲の環境と馴染む。プリントした形状が最終的なテクスチャの仕上がりにも大きな影響を与え、より正則な形状を交差させて製作することで、より人為的な意匠を強調できると考える。今は従来のコンクリートには稀な触感であり、天然石と比較しても変わらない質感を備えている。

## No.9 斜め曲線形状

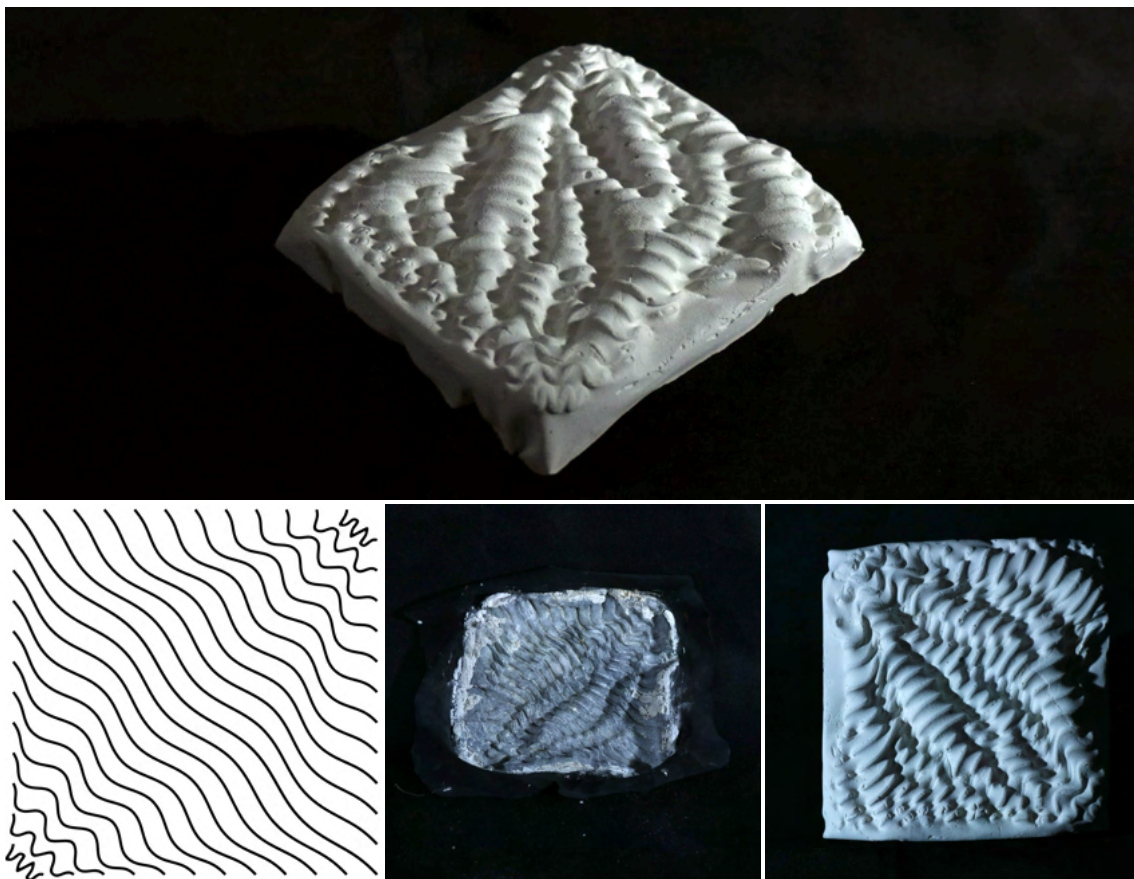


図 69: No.9 斜め曲線形状布織材の制作物

### パラメータ:

3D Printer	- Bambu Lab P1S
Filament	- TPU white (Brand: Overture)
Nozzle	- 0.4mm
Textile	- ライクラファイバー(Black) or ライクラストレッチ (Brown)
Stretching rate	- Omni-directional 150%
Fill Pattern	- Concentric 100%
Initial Layer Height	- 0.4mm
Layer Height	- 0.2mm
Temperature	- First nozzle: 240°C, Other layers: 240°C, Bed: 0°C
Extrusion Multiplier	- 1
Nozzle Speed	- 10mm/s, Initial layer: 7mm/s
Model Detail	- Size: 203 x 210mm
	- Line width: 3mm, Thickness: 0.6mm

### 描写

三葉虫や珊瑚といった有機的な生命体を彷彿とさせ、とりわけ複雑な起伏を伴う部位は、従来の硬質な型枠手法では成形が極めて困難な領域である。これは、コンクリート固有の流動的特性を最大限に引き出したことにより、初めて到達し得た造形表現であると考えられる。

## 4.4 コンクリートタイルの表面積測定

先行研究である「Cooling Panel」では、表面積を従来比で10%増大させることで、ミストや雨水の蒸散効率を向上させ、都市環境の改善に寄与する手法が示されている。これに準じ、本節では布纏材が、従来の平滑なコンクリート面と比較してどの程度の表面積増大を実現しているかを定量的に評価した。

精緻な表面形状をデジタル化し、その表面積を正確に計測するため、以下の手順にて測定を実施した。

1.3D スキャニング: 布纏材の現物を Revopoint POP3 3D スキャナを用いて計測し、取得した点群データを.ply 形式のポリゴンメッシュへと変換した。

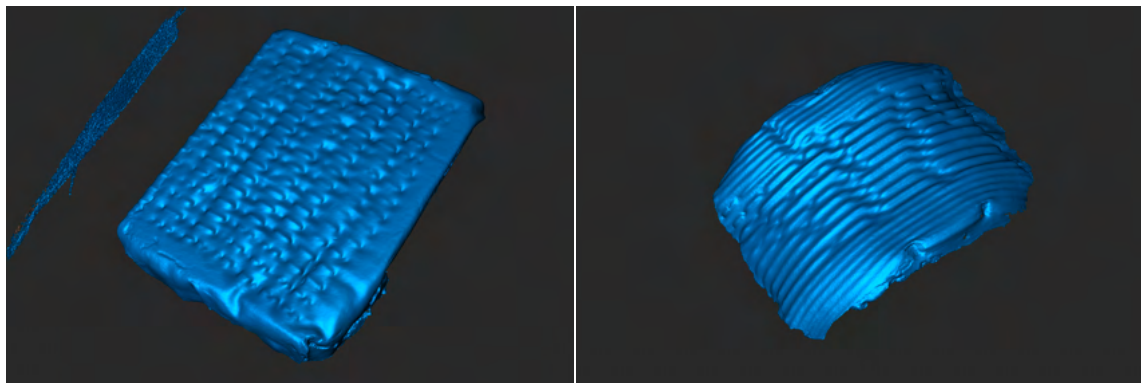


図 70: Revopoint POP3 3D スキャナで撮ったモデル  
(撮影者: 筆者)

2.対照モデルの作成: 3DCGソフト Blender の Sculpting ツールを用い、スキャンデータの表面を平滑化する処理を施した。これにより、体積を維持しつつ表面テクスチャのみを排除した、比較用の幾何学的なフラットモデルを作成した。

3.表面積の算出と比較: 「3D Print Toolbox」アドオンを使用し、両モデルのメッシュ表面積を算出。フラットモデルに対する布纏材の面積増加率を比較した。

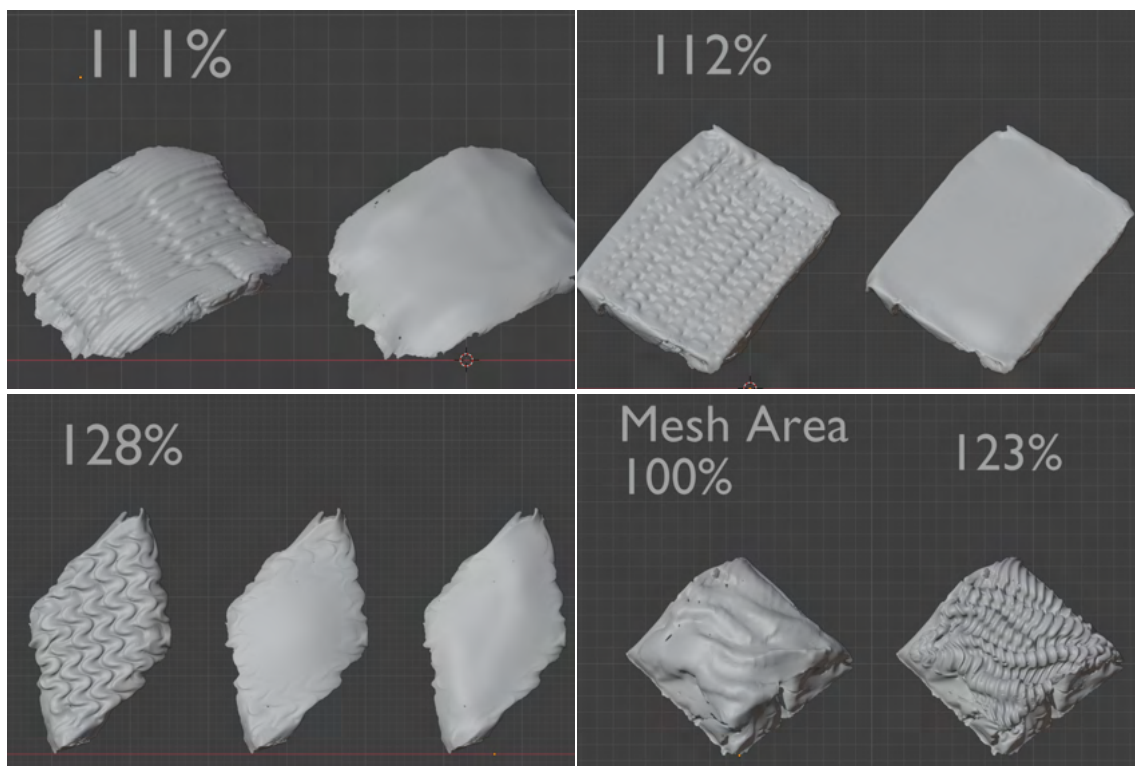


図 71: Blender で表面積を測定する様子  
(撮影者：筆者)

計測の結果、検証した布纏材は、平滑な対照モデルと比較して約 20% の表面積増大を実現していることが確認された。これは、自己形成布地由来の微細な凹凸が、単なる意匠性のみならず、Cooling Panel のような蒸散効率の向上という機能的側面においても有意な効果を持つことを裏付けるものである。

#### 4.4.1 造形成果と考察

本章では、自己形成布地を用いた布型枠の高度化を目的とし、一連コンクリートの型枠実験を行った。

刷毛塗りによる積層塗布法を導入したことで、製作された布纏材は、従来の型枠技術では困難であった自己形成布地特有の有機的な質感およびテクスチャーを、極めて高い忠実度で表現することに成功した。本研究では、既存の自己形成布地に関する先行研究で提案された多様な形状において本手法を試行し、その広範な適用性と転写精度を実証した。

本実験を通じて、コンクリート表面への精緻なテクスチャー転写という意匠的側面については一定の成果を得ることができた。しかし、これらの成果物をどのように社会実装し、実際のプロダクトとして運用していくかという実用性の観点においては、依然として検討の余地が残されているため、次章以降では、本手法で製作した布纏材が持つ多孔質な質感や表面の微細な凹凸に着目する。これを水と組み合わせることで生じる現象や機能性を探求し、具体的なプロダクトとしての実用化に向けた提案を行う。

## 第5章. 布型枠を用いた制作“±2°C Concrete”

### 5.1 概要

本章では、前章までに確立した布纏材の製作手法を用い、実用化に向けたプロトタイプ「±2°C Concrete」の制作プロセスおよび実証実験について述べる。

先行研究の「Cooling Panel」では、表面積を10%増大させることで大阪・関西万博会場における雨水やミストの蒸散を促進し、周囲の熱環境を改善するという機能的側面が重視されている。これに対し、本研究が着目したのは、布纏材がコンクリートにもたらす質感の変容である。筆者が同作品を訪れた際、折悪しく雨が降り始めたが、そこで目にしたのはコンクリート表面を水が流下していく、美しくも涼やかな光景であった。この視覚体験は、鑑賞者に「触れたい」という欲求を抱かせ、ひいては「水に濡れたコンクリートに対し、人はどのような行動をとるのか」という身体的な興味へと繋がった。

テクスチャによる視覚的な揺らぎや、水濡れによる質感の変化は、鑑賞者の接触行動を誘発する。その行動を介してパネル表面の水分が拡散されることで、結果的に周囲の熱環境が制御される。このように、素材に対する身体的な関わりを通じて環境へと介入する、「人と素材の新たな共生モデル」の再定義を目指している。

本章では、「布纏材による微細なテクスチャは、水の流下に伴って涼感をもたらし、人の接触行動を誘発し得るか」という問いをテーマに掲げ、最終制作に取り組んだ。

制作したプロトタイプを用い、東京都港区の「ウォーターズ竹芝」において公開実験を実施した。本章では、実際の屋外環境におけるタイルの挙動に加え、通行者の反応に関する観察結果を含めた実験全体の総括を行う。

### 5.2 水との相互作用による質感の変容

#### 5.2.1 濡れたコンクリート

第1章で述べた通り、コンクリートはその製造プロセスにおいて水を不可欠な要素として含んでおり、歴史的にも水と密接な関係にある。本節では、作製した布纏材が水と接触した際に生じる質感の変化を観察し、それがもたらす意匠的および機能的な成果について総括する。



図 72: 多孔質のコンクリートに濡れると質感の変化  
(撮影者：筆者)

### 5.2.2 触覚を介した環境制御の提案

人の接触という身体的介入を通じた水の拡散と、それに伴う熱環境制御の実現を目的としている。具体的には、水濡れによって生じるテクスチャの質的な変容が、鑑賞者の触れたいという能動的な欲求を誘発する点に着目した。この接触行動を介して水分がパネル表面へと展延され、コンクリート表面における蒸散面積が拡大する。これは、人の行為を環境改善のプロセスに組み込むことで、人とコンクリートの関係を再定義し、能動的な関わりを通じた新たな共生モデルを提示する試みである。

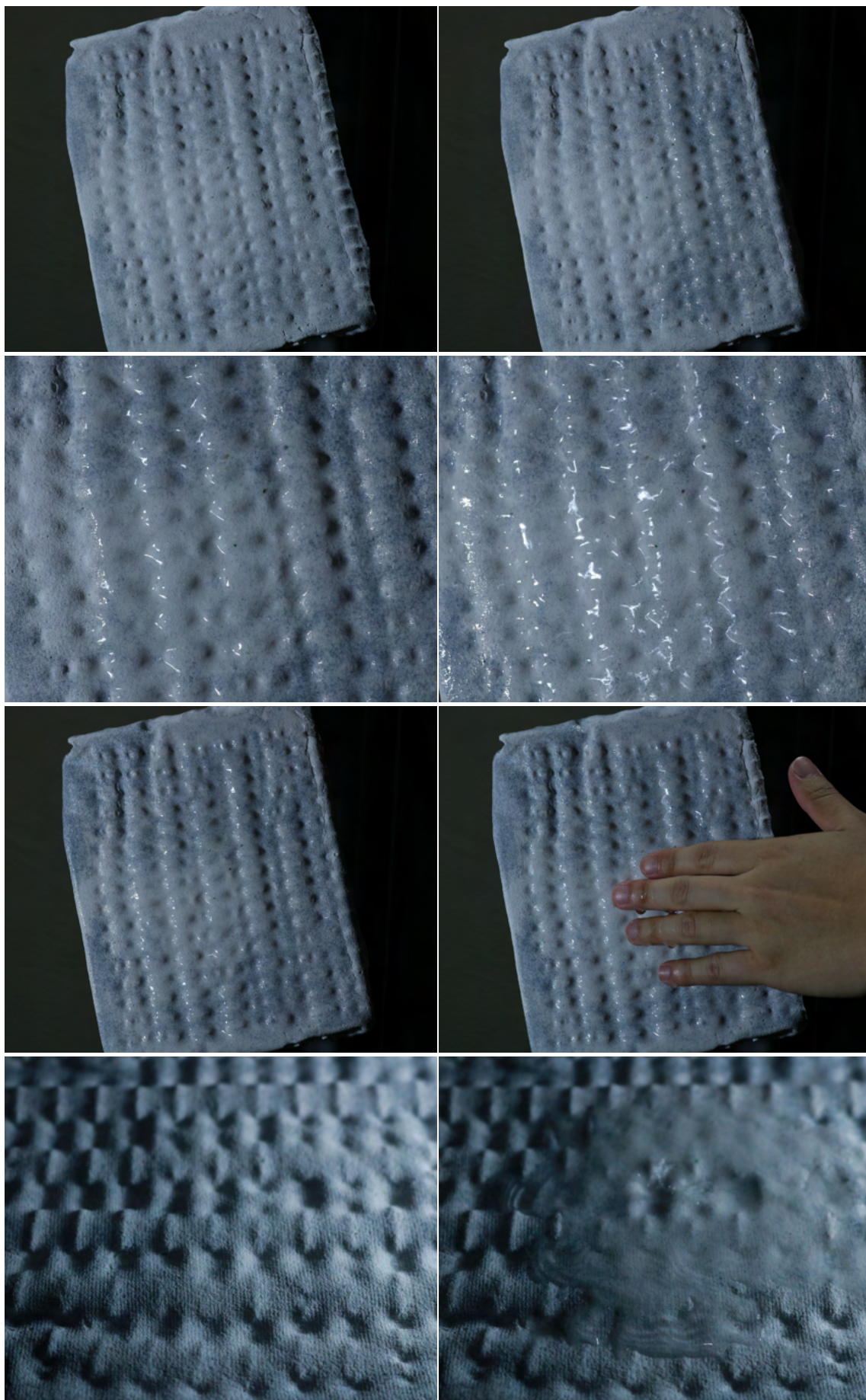


図 73: No.1 破線形状の布纏材が水に濡れた様子  
(撮影者:筆者)

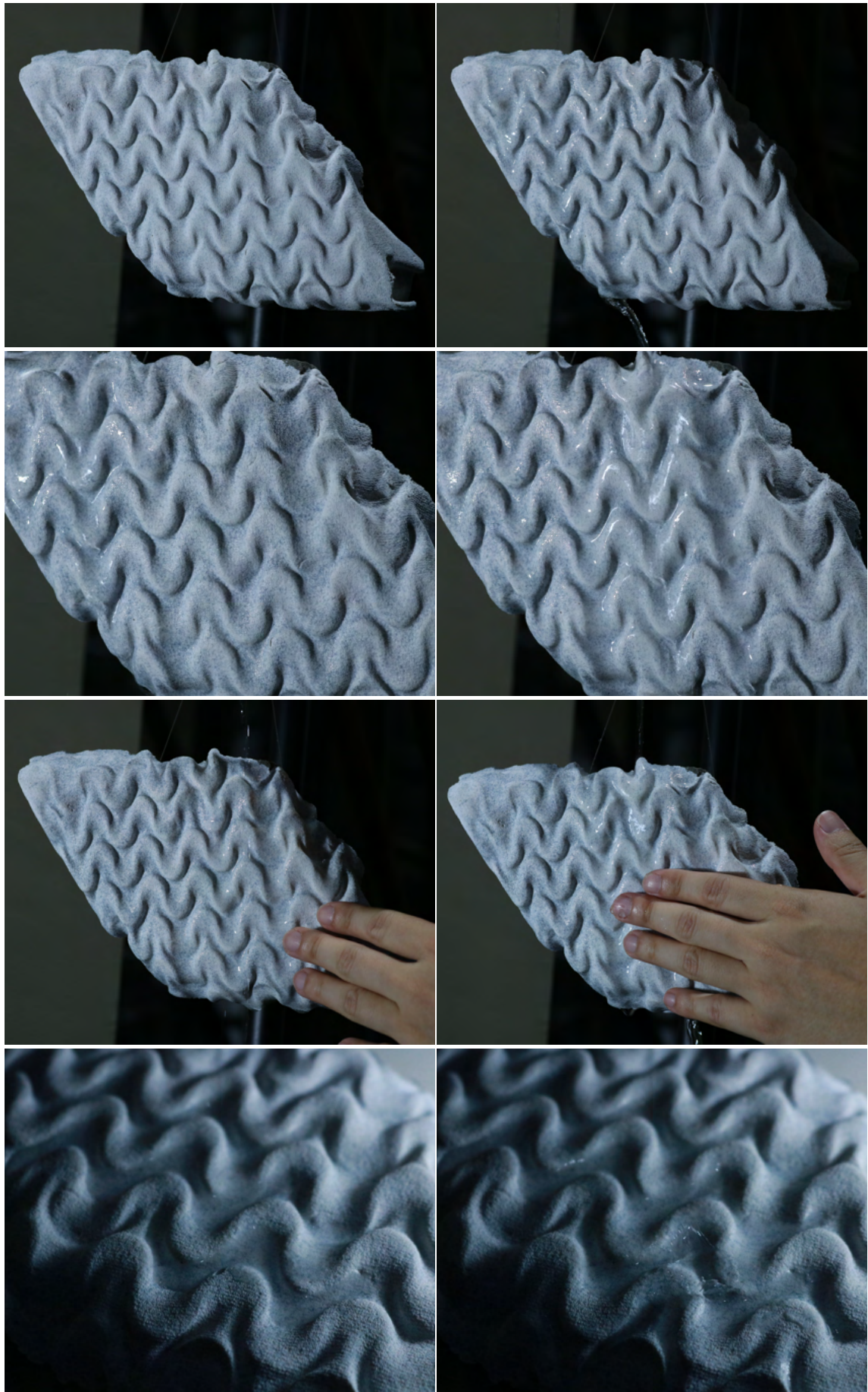


図 74: No.6 波形状 2 の布織材が水に濡れた様子  
(撮影者: 筆者)

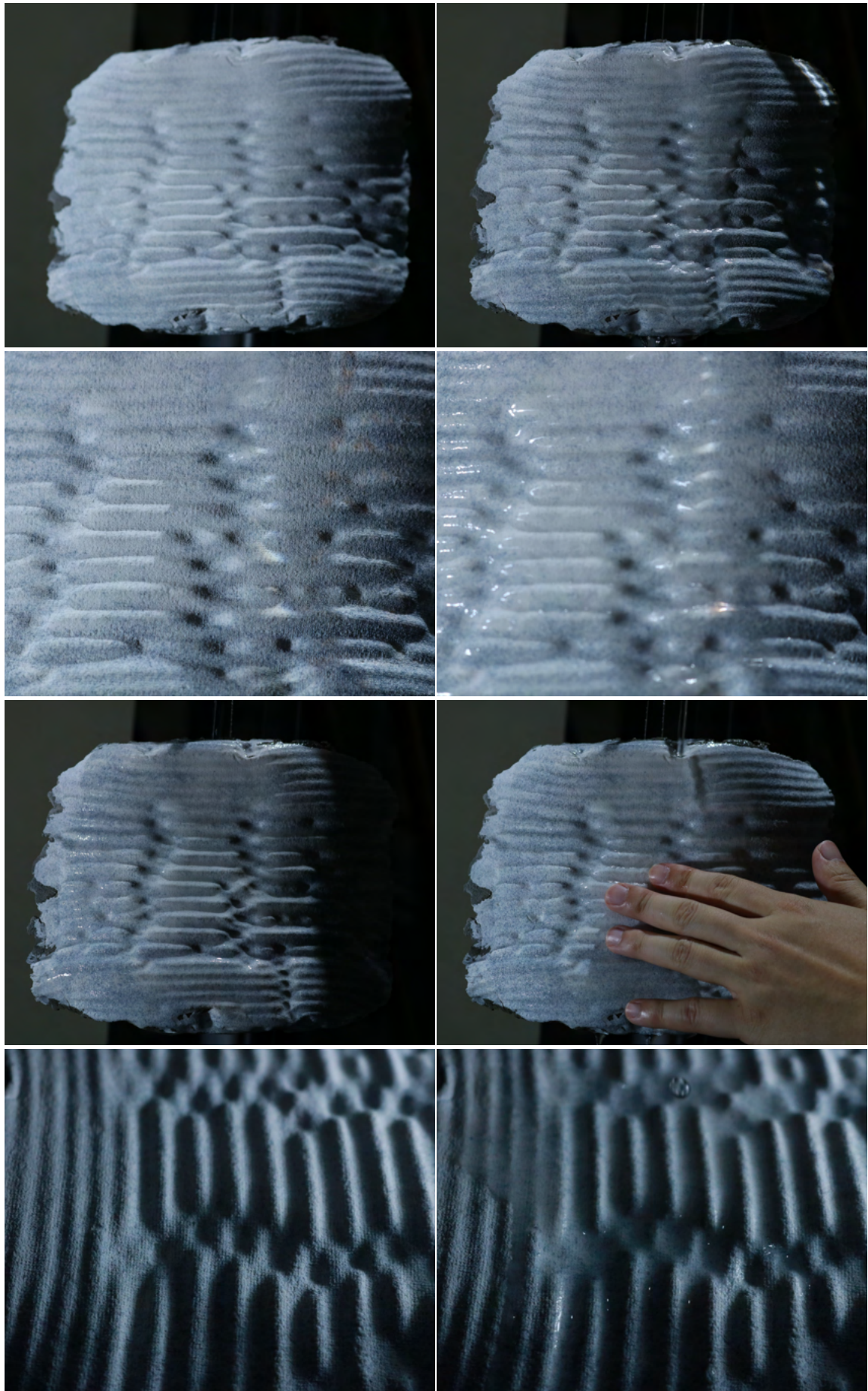


図 75: No.7 直線形状の布纏材が水に濡れた様子  
(撮影者: 筆者)

### 5.2.3 結果

コンクリートタイルを水に濡らす検証を通じて、以下の2つの特性が明らかとなった。

- 水の誘導性: 図 76 のように布型枠によって転写された微細なテクスチャー、水の流れを誘導する。
- 流下遅延: 図 77 のように熱可塑性樹脂のパターンに由来する凹凸が、水流を一時的に遅らせた。

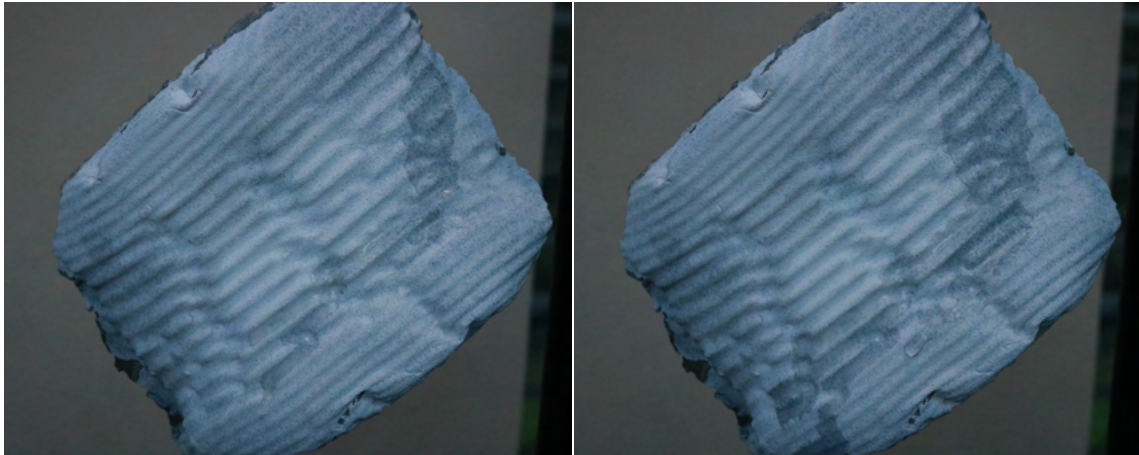


図 76: No.7 直線形状の布纏材が示した水の誘導性  
(撮影者：筆者)

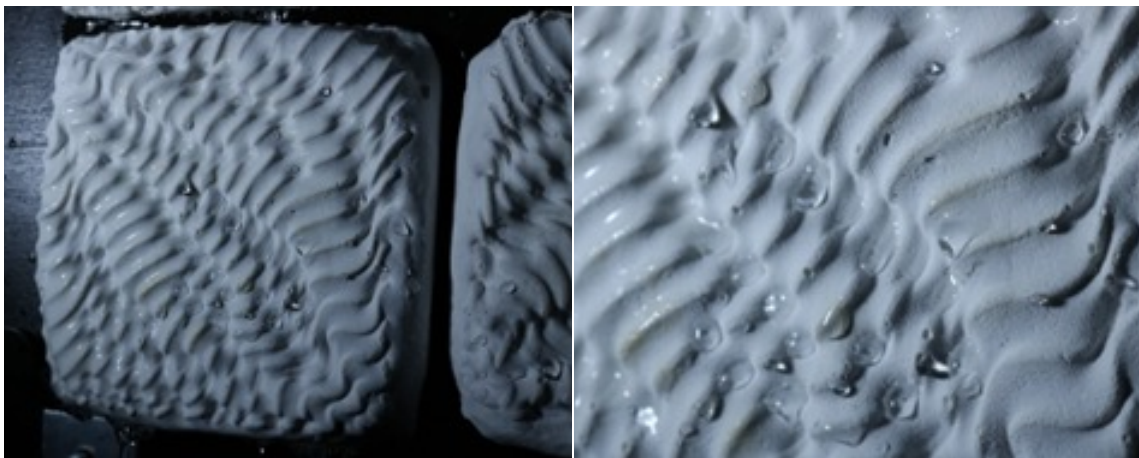


図 77: No.9 斜め曲線形状の布纏材が示した水の流下遅延  
(撮影者：筆者)

これらの特徴は、布纏材が蒸散効果の面で有利であることを示唆している。これは、従来の平滑なコンクリートと比較して、水との接触時間を意図的に延長させることが可能となるためである。以上の評価に基づき、次節ではこれらの特徴を実際の制作物に応用する一連の手順を紹介する。

## 5.3 公開実験「±2°C Concrete」の設計と製作

### 5.3.1 コンセプトと設計要件

本研究では、これまでの実験で得られた知見を統合し、実証実験用プロトタイプ「±2°C Concrete」を制作した。このプロジェクトは、台湾のドキュメンタリー『±2°C』の中に「わずか2°Cの変化が環境を劇的に変える」というコンセプトに基づいている。

布纏材は、その微細な幾何学テクスチャーの表面に、夏期には冷水、冬期には温水を循環させる。この局所的な熱環境の変化を通じて都市の屋外空間に快適性を提供すると同時に、鑑賞者の接触という能動的な介入を介して水が拡散・蒸散する仕組みを構築した。これは、コンクリートと水の新たな関係性を、視覚・触覚の二要素を通じて身体的に体験可能なプロダクトとして結実させる試みである。

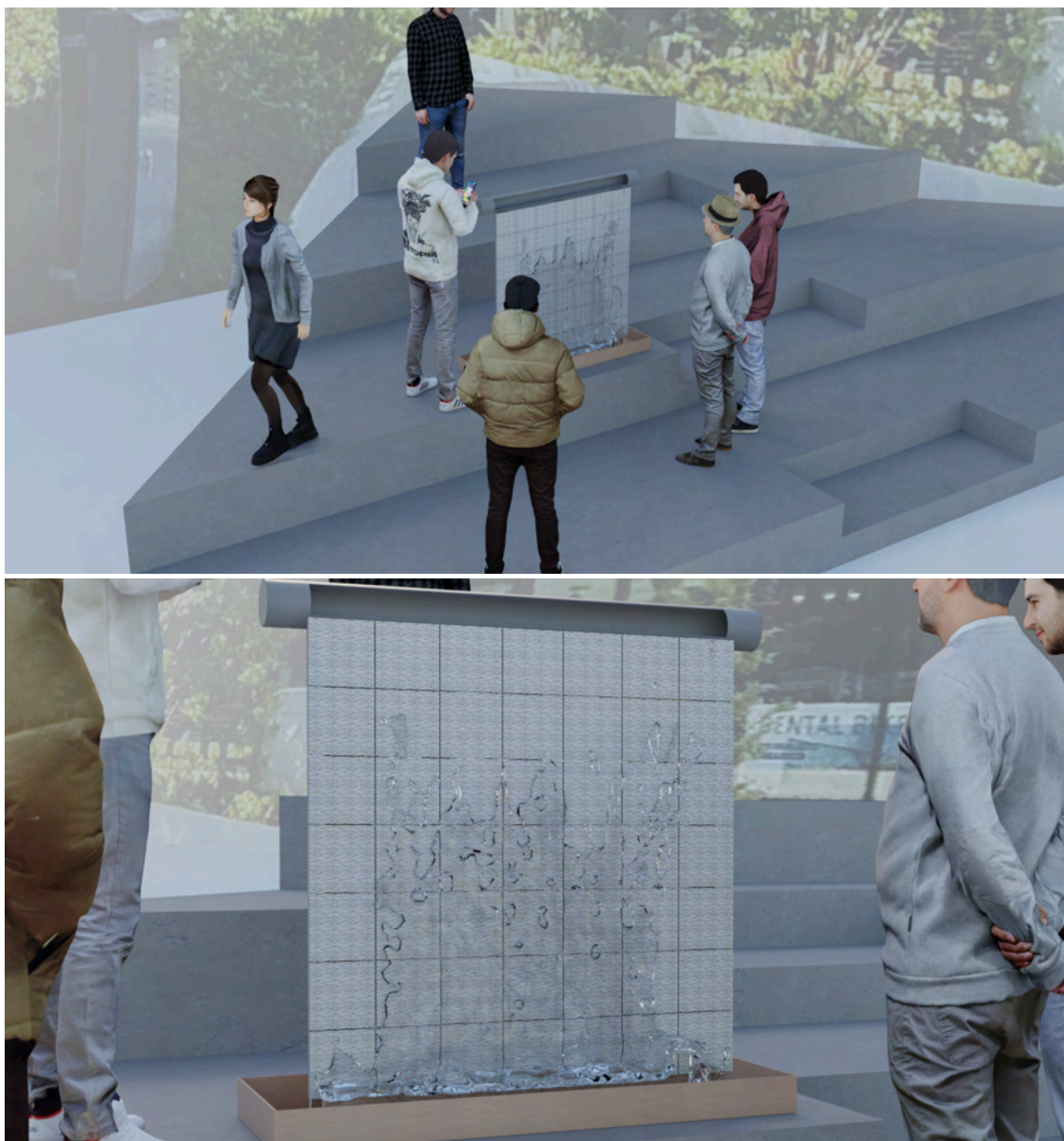


図 78: ±2°C Concrete の設計コンセプト図

以下の3点を主要な要件として設計した。

- 可搬性: 重量のあるコンクリートタイルを室外に移動させるため、安全に輸送するため、分解が可能な構造とする。
- 安定性: 屋外の突風や環境変化に対し、絶対的な構造安定性を確保する。また、長時間の通水や屋外暴露に伴う腐食が生じない塗装をし、高い耐久性を確保した。
- 循環性: 水資源を大切にし、循環水ポンプや投げ込みヒーター等の設備を導入し、水および温水を長時間に循環させるシステムを構築した。

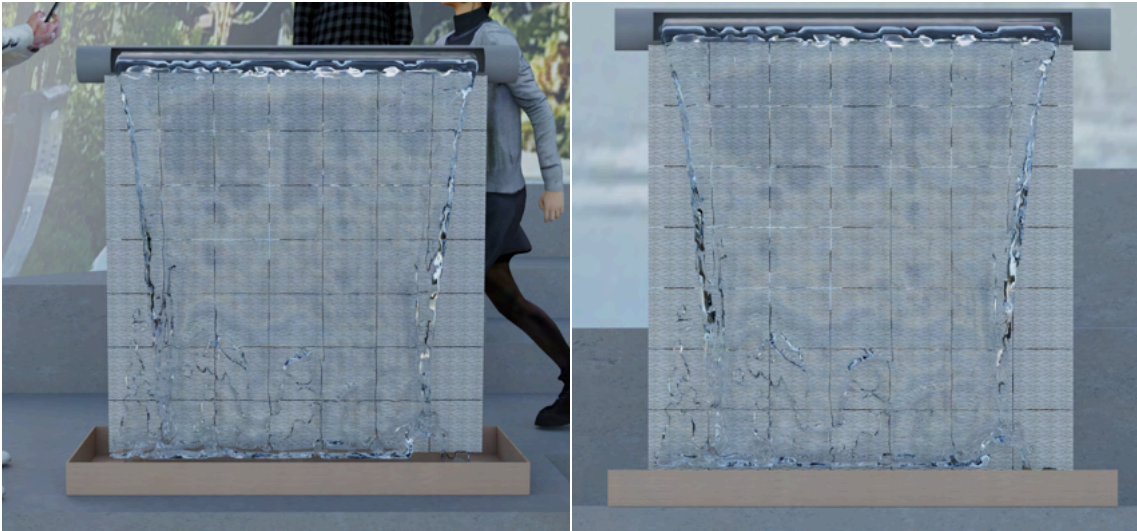


図 79: ±2°C Concrete のコンセプトモデル  
(撮影者: 筆者)

### 5.3.2 支持機構の設計

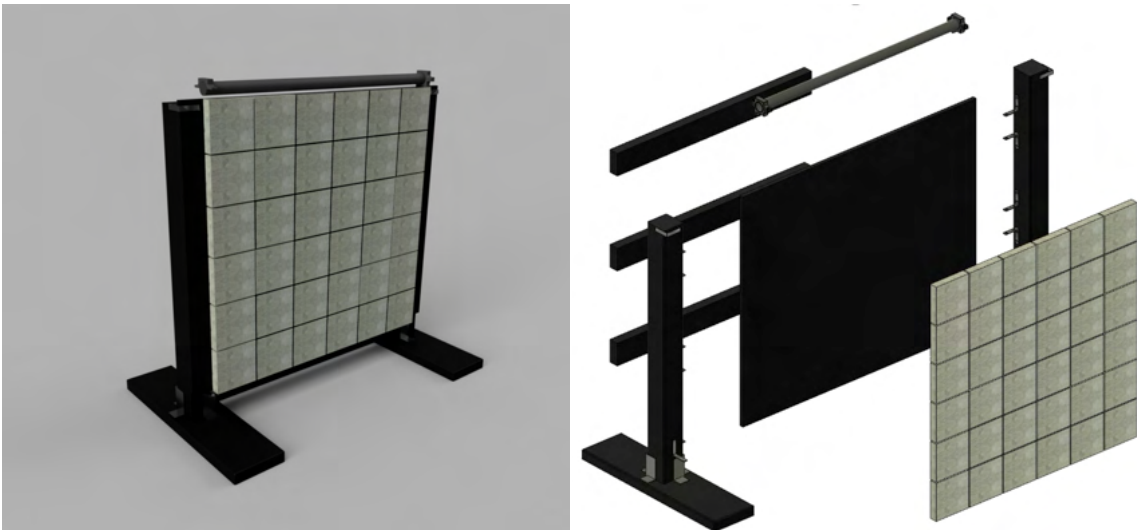


図 80: ±2°C Concrete の 3D モデルと解体図

本プロトタイプは、高さ 1200mm、幅 1000mm の木製垂直パネルを主構造として設計した (図 80)。総重量が 60kg を超える重量物である布纏材を安定して支持しつつ、都市空間での展示における意匠性と可搬性を両立させるため、以下の仕様を採用した。また、本研究の主題である触覚的な体験を促すべく、鑑賞者が直接作品に接触しても安全性が損なわれない堅牢な支持構造を追求した。

### 5.3.3 支持構造の製造

屋外にある公開実験所への輸送および迅速な現場設営を可能にするため、支持構造の設計においては可搬性と長期的な固定強度の両立を最優先事項とした。

木材の主要な接合部には、雌ネジを木体内部に形成する M8 の鬼目ナット（インサートナット）を埋め込んだ。通常の木ネジによる固定とは異なり、ボルト締結による接合を採用することで、展示の度に繰り返される分解・再組立においても木材のネジ山を摩耗させることなく、常に初期状態と同等の高い締結力を維持できる可搬構造を実現した。

布纏材の垂直荷重を確実に地面へと伝達させるため、主柱には 89mm 角の集成材を、接地部には長さ 700mm の自立脚を組み合わせた。特に応力が集中する柱と脚の接合部には、厚さ 3mm の高剛性な L 字アングル材を計 4 枚配した。これにより、重量物の支持だけでなく、屋外展示において懸念される突風などの水平荷重に対しても十分な曲げ剛性と安定性を確保した。

構造材としての木材の寿命を延ばし、展示期間中の雨天時や、循環システムによる長時間の浸水に晒される状況を考慮し、基礎素材に対して徹底した耐候処理を施した。具体的には、耐水性に特化した高耐久塗装で表面を二度仕上げることで、木材内部への水分の浸透による腐食や膨張、強度の低下を抑制した。



図 81: 固定装置の製造と仕上げる様子



図 82: 固定装置のディーテル

### 5.3.4 水循環システム

ウォーターズ竹芝での実証実験が冬季（11月）に行われることを踏まえ、温水を循環させることで周囲に温もりを提供する熱環境制御システムを構築した。

垂直に配置した布纏材の上部に、穴を設けた塩ビパイプを設置した。流下する温水が自己形成布地由来のテクスチャに沿って表面を這うように、パネル全体へ水を拡散させ、再びポンプで吸い上げて流下させる循環システムを設計した。

底部の貯水槽に投げ込みヒーターを設置し、水温を常時 35°C 前後に保持した。水中ポンプによる完全クローズドな循環システムを採用することで、都市空間において温かな蒸気が立ち上り、コンクリートと水が織りなす触覚的な温もりを体験できる環境を創出した。

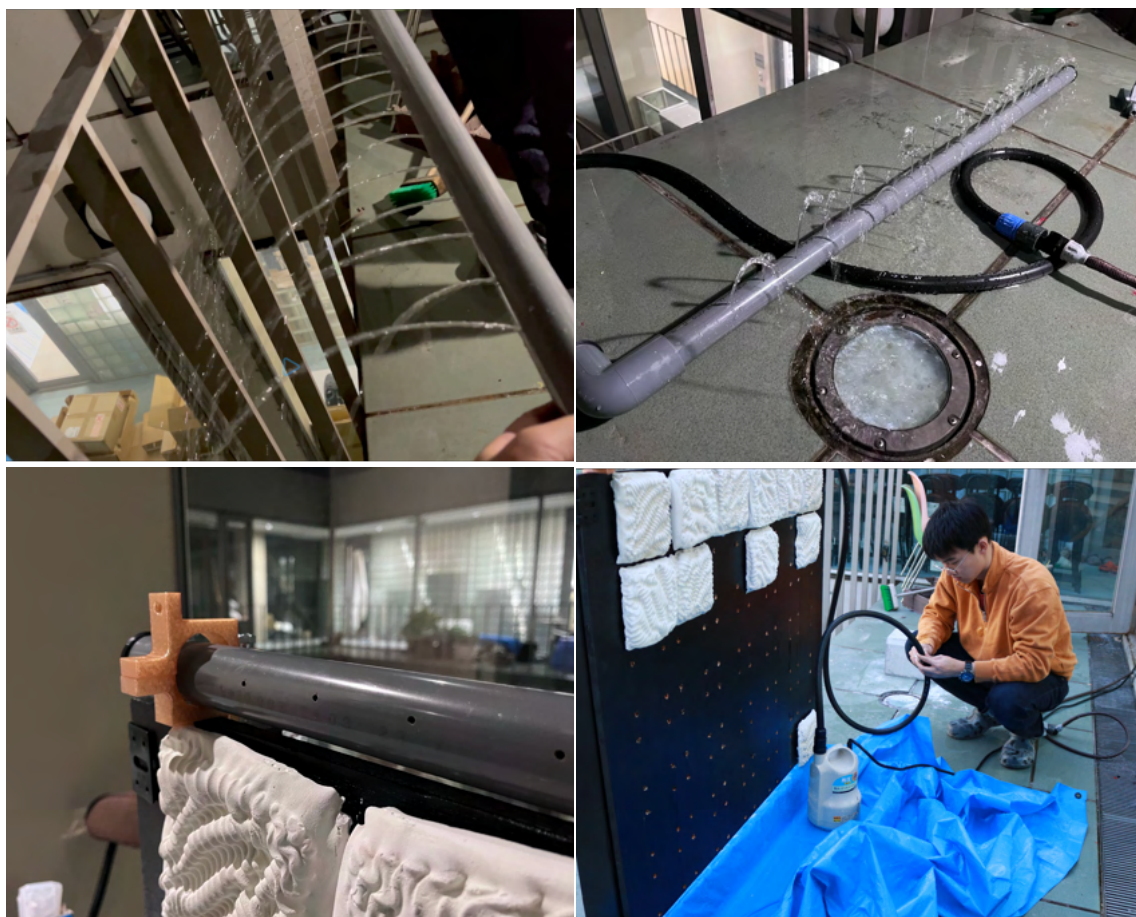


図 83: 水循環システムの設計様子  
(撮影者：筆者)

### 5.3.5 布纏材の量産

本研究で確立した刷毛塗布法を用い、展示に必要となる布纏材の量産を行った。効率的な制作体制を構築するため、初回のコンクリート塗布と中空部への充填作業を並行して実施した。量産の過程で、布纏材は破損することなく7回以上の再利用が可能であることを検証した。これにより、型枠を作り直す時間を短縮することができ、予備を含めた40個のコンクリートタイルを5日間で制作した。

布纏材を木製パネルへ垂直かつ正確に固定するため、自作の固定装置を用いてステンレス製ボルトを垂直に保持した状態で打設を行った。これにより、パネル貫通時の位置精度を高め、六角ナットによる強固な締結を確実にした。



図 84: 布纏材の量産の様子



図 85: 量産した布纏材

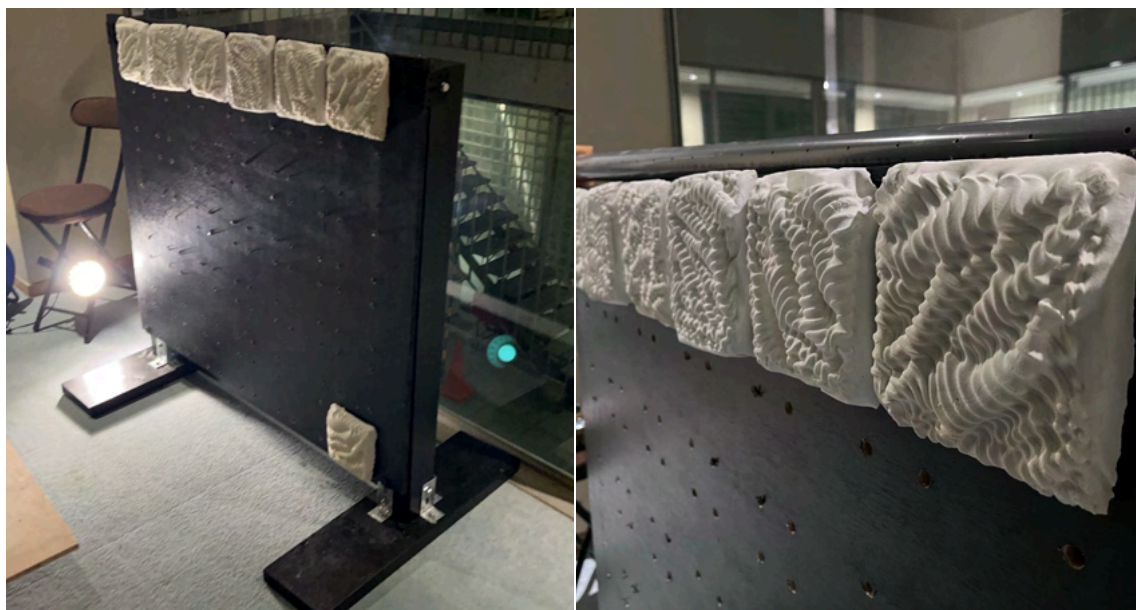


図 86: 量産した布纏材を固定装置に設定した様子

### 5.3.6 技術まとめ

本プロトタイプの製作を通じて、以下の技術的成果を得ることができた。

設計した支持機構は、屋外の風圧やコンクリートの自重、水の循環といった複合的な負荷に対し、十分な耐久性と安定性を示した。

冬季の屋外環境においても、循環水の温度を 35°C 前後の適温に維持し、コンクリート表面を通じた熱伝達を安定的に継続させることができた。

最後に、今回の量産プロセスにおいて、一つの布型枠を最大 7 回再利用することに成功した。これは、1 回限りの使用が一般的である従来の使い捨て型枠や、破損しやすい複雑な形状の型枠と比較して、極めて高い経済性と環境性能を持つことを意味する。本研究の手法は、少なくとも 7 回の連続使用に耐えうる堅牢な型枠システムであることを実証した。



图 87: SFC Open Research Forum 2025 “ $\pm 2^{\circ}\text{Concrete}$ ”  
(摄影者: 笔者)



図 88: SFC Open Research Forum 2025 “±2°Concrete” 情報基盤センターにて  
(撮影者：筆者)

## 5.4 ウォーターズ竹芝 ”±2°Concrete“

### 5.4.1 実施当日の状況



図 89: ±2°Concrete の設置場所(左). 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025 ポスター(右)  
(Google Earth pro より引用)

2025年11月8日(土)・9日(日)の2日間、各日11時から17時までの6時間、東京都港区のウォーターズ竹芝においてプロトタイプ「±2°C Concrete」を用いた公開実験を実施した。

両日の平均気温は13度であった。1日目は北西から2.3m/sの風が吹き、海辺という立地もあり体感温度は低かった。2日目は設営開始直後から雨が降り始め、散歩に訪れる人数は減少したものの、降雨による気温低下の影響で、温水の暖かさを求めて制作物に触れに来る人の数は1日目とほぼ変わらない状況であった。

公開実験では、解説記事とポスター、および最低限のサインを掲示するにとどめた。そのような状況下で、通行人が本制作物に対してどのような関心を示し、いかに関与するかという行動観察を行った。

## 5.4.2 温度観察

制作物の表面温度は、スマートフォン接続型サーモグラフィ「FLIR ONE」を用いて測定した。左の写真は1日目の13時06分に撮影したもので、制作した36個のコンクリートを対象範囲として設定している(図90)。その結果、最高温度32度、最低温度19度、平均値25.7度を記録した。実際に、温まったコンクリートに片手でしばらく触れて比較したところ、図91のように、手の温度が約5度上昇した。この温度条件において公開実験を行い、観察した。

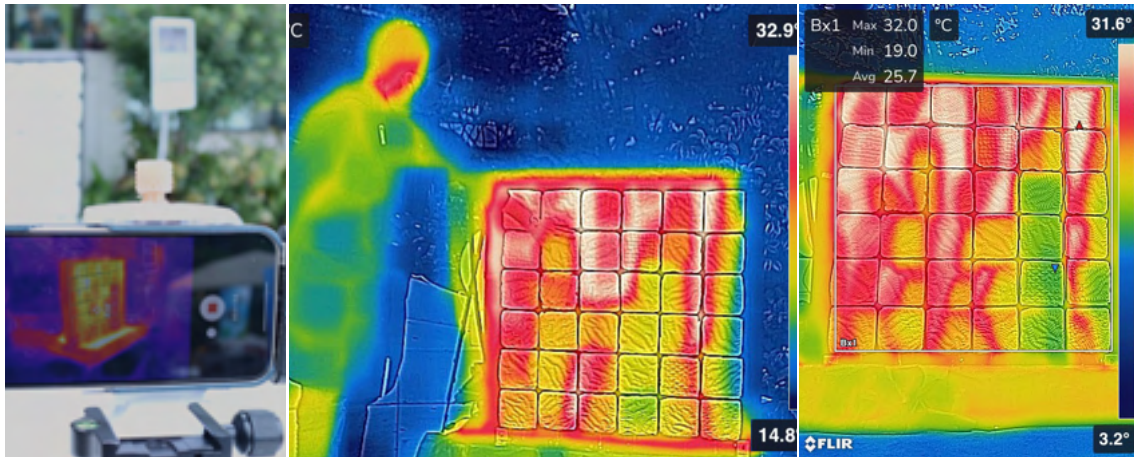


図 90: サーモグラフィーカメラで撮った±2°Concrete の写真

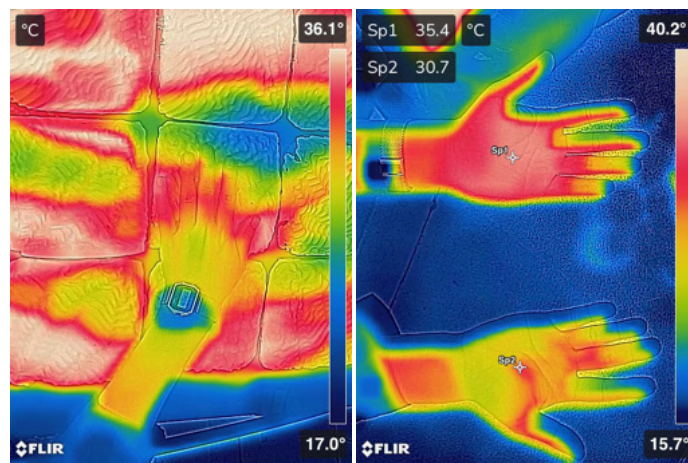


図 91: サーモグラフィーカメラで撮った両手の写真

### 5.4.3 人との関わり方



図 92: 「みらい作庭記」ウォータース竹芝 2025、±2°Concrete 実験様子  
(筆者撮影)

観察の結果、布型枠由来の複雑なテクスチャにより、流下する水滴が表面に保持される様子が確認された。これは、刷毛塗布法によって表面形状が精度高く再現されたことで、表面張力による保水および誘導効果が期待通りに発揮されたことを示している。



図 93: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、「±2°Concrete」公開実験写真



図 94: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、±2°Concrete 公開実験写真 2

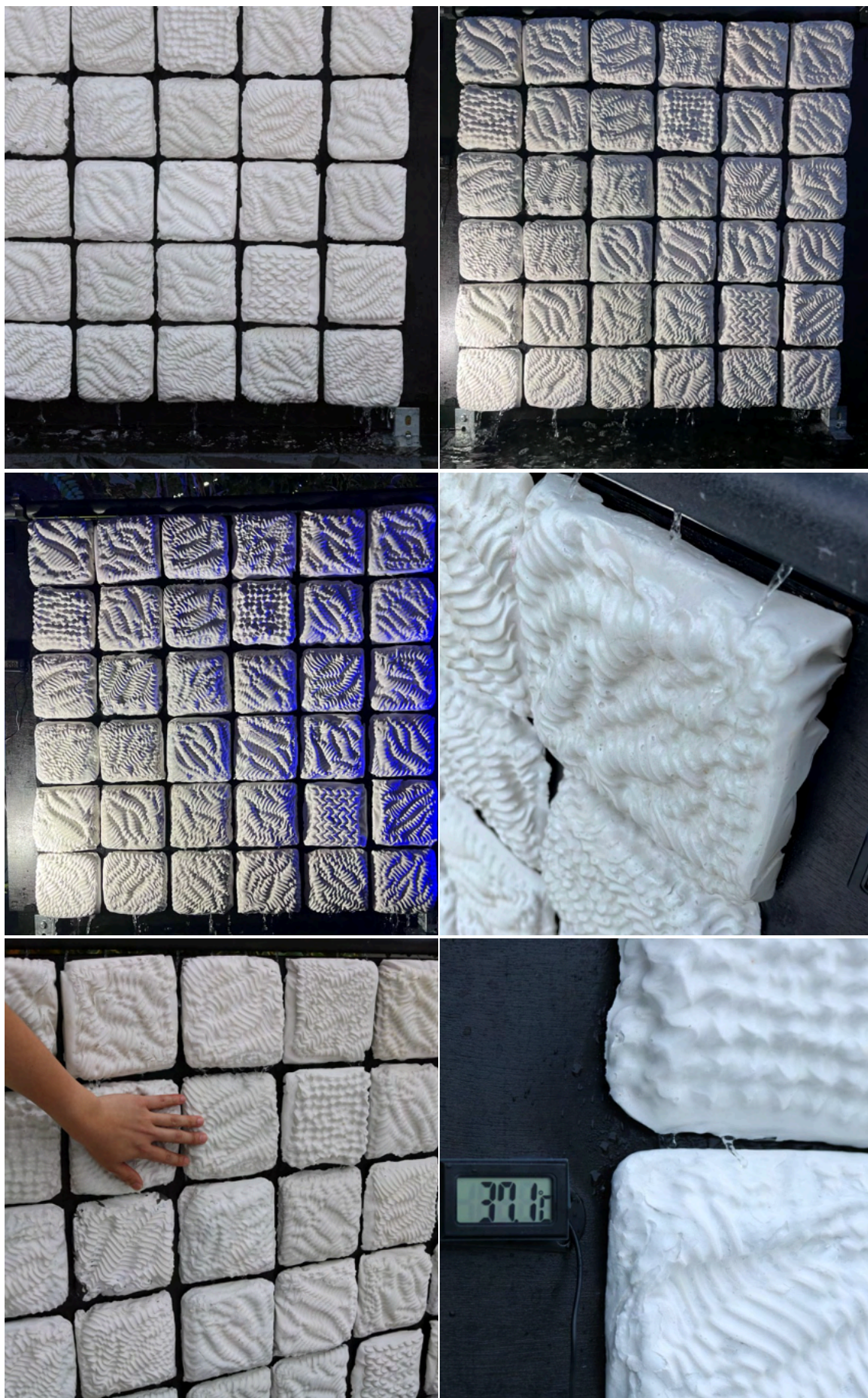


図 95: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、±2°Concrete 公開実験写真 3

水と光の干渉によってコンクリートの質感が時々刻々と変化し、その視覚的な揺らぎが、見る人の触れてみたいという行為を強く促す様子が観察された。

濡れた状態の布纏材が放つ特有の風合いと、有機的な曲面が織りなす陰影は、通行人にコンクリートという素材に対する新鮮な違和感を抱かせることに成功した。このように、視覚的な違和感が触覚体験の入り口となり、触れることで打ち水のような水の拡散に寄与するという本研究のコンセプトが、都市空間におけるコンクリートの機能として実証された。



図 96: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、±2°Concrete と人の関わり 1



図 97: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、±2°Concrete と子供の関わり

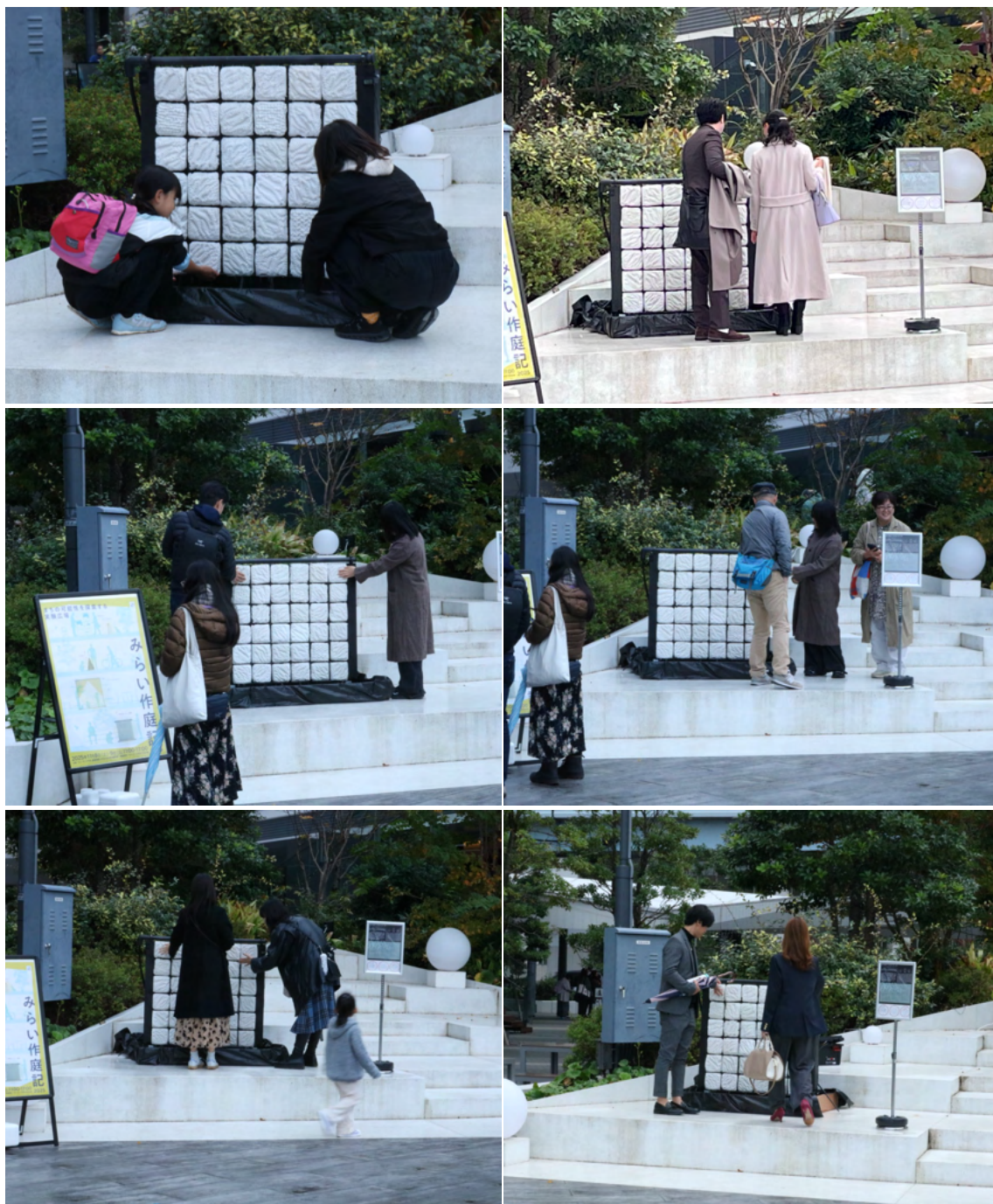


図 98: 「みらい作庭記」ウォーターズ竹芝 2025、±2°C Concrete と人の関わり 2

## 5.5 考察

本実証実験を通じて、プロトタイプ「±2°C Concrete」が通行人の身体的スケールにおいて多層的なアフォーダンスを提供していることが明らかとなった。

観察の結果、鑑賞者の身長によって制作物に対する関与の仕方が自然に分かれる様子が確認された。大人の来場者は、自身の目線の高さに配置されたコンクリートタイルのテクスチャーに違和感を覚え、その微細な凹凸や水濡れによる質感の変化を指先で確認する傾向があった。対して、背の低い子供たちは、構造下部の水受けへと意識が向き、そこに溜まった水を汲んで注ぎ込むといった行動を優先的に行っていた。

今回、冬季の実験に合わせて供給した温水（約35℃）は、当初、子供たちが手先を浸して暖を取るという環境享受の対象であった。しかし、この行為は時間の経過とともに、貯水槽内に沈めた硬貨を分類する遊びへと発展する様子も観察された。

温水が流れるコンクリートタイルに触れた来場者からは、「コンクリートなのに柔らかい触感がする」といった、素材の知覚が根本から変容したというフィードバックが得られた。これは、硬質で冷淡なイメージを持つコンクリートという素材に対する認識の変化を象徴している。

布纏材によって転写された有機的なテクスチャーと、流下する温水の熱的刺激が相乗効果を生み、鑑賞者の脳内で「硬いもの」という既成概念が「柔らかいもの」へと書き換えられたことが推察される。物理的な硬度は変わらずとも、視覚的な揺らぎと温かな触感の統合によって心理的な軟質化が引き起こされたこの現象は、本研究における予想外の感性価値として実証された。

以上のように、本制作物は単なる建築部材ではなく、水・熱・触感という複数の情報を統合し、人々の行動を引き出すメディアとして機能した。布纏材の表面で起きる水の誘導や蒸気という物理現象が、人々の好奇心と接触行動を介することで、都市空間における局所的な熱環境の改善と、コンクリートという素材に対する親密な体験を同時に創出したと言える。

## 第6章. まとめ

本論文では、自己形成布地を起点としたコンクリートの触覚表現に関する一連の研究プロセスを詳述した。本研究によって得られた主要な知見を以下の通り総括する。

### 6.1 本研究の成果

本研究では、布、3D プリンタ、型枠を組み合わせ、コンクリートの新しい触覚表現に応用できる制作物とその技法を開発することを目的とした。

通常のコンクリートと比較して表面積を約20%増大させ、微細なテクスチャの付与を可能にする布型枠「布纏材」の手法を確立した。この手法は7回以上のリユース性を備えており、意匠性と実用性を両立させている。

その技法をもとに制作したプロトタイプ「 $\pm 2^{\circ}\text{C}$  Concrete」は、水に濡らすことで人々の接触行動を促し、それによる水の拡散を実証した。また、布纏材に温水を流下させた際、本来は硬質であるはずのコンクリートを「柔らかく感じる」という証言が得られた。これは、本研究における予想外の感性価値であった。

### 6.2 今後の課題

公開実験から得られたフィードバックに基づき、本研究の今後の展望を以下の3点にまとめた。

1. 今回の実験時とは異なる夏季において、視覚的な清涼感がいかに接触行動を促すかについての検証を行う。
2. 大型 3D プリンタを活用し、布纏材およびコンクリートタイルの制作・大型化を試みる。
3. 今回の実験で得られた「硬いコンクリートを柔らかく感じる」という証言を踏まえ、今後はテクスチャのパターンを変えることでコントロールできる要素を明確にする。

### 6.3 社会的意義

本研究で提案した布纏材は、無機的なコンクリートという素材に対し、布のしなやかさとデジタル制御による精緻なテクスチャーを付与するものである。これは、単なる視覚的装飾の枠を超え、冷淡で硬質なイメージを持つ都市のインフラストラクチャを、人々の身体的感覚に訴えかける触覚的なインターフェースへと再定義する意義を持つ。

特筆すべきは、テクスチャーがもたらす視覚的な揺らぎと温かな触感が、鑑賞者の触れたいという能動的な好奇心を誘発し、硬い素材であるコンクリートを心理的に柔らかいと知覚させるまでに素材の存在感を変容させた点である。この知覚の変容は、人々が都市の構造物に対して抱く心理的距離を劇的に縮め、主体的かつ情緒的な接触を促す。

その結果として生じる水の拡散は、機能を一方的に享受する従来の環境制御システムとは異なり、人々の触れるという行為を起点として都市環境が改善される、新たな環境共生のモデルを提示している。

## 6.4 結びに代えて

本研究の結論と今後の展望は、以下の3点に集約されます。

デジタルと物質の調和による新たな表現 デジタル技術と物理的特性(布のたわみや歪み)を融合させ、それらを「誤差」ではなく「表現の源泉」として捉え直すことで、触覚を通じた対話を生む独自のテクスチャー表現を確立した。

定量的解析と実証実験の継続 今後は、各テクスチャーの表面積に基づいた冷却効果(蒸散効率)の数値化を進める。また、江の島などの屋外空間において、雨水や海水を活用しながら、人々の接触行動を誘発する実証調査を継続する。

次世代建築インターフェースへの期待 微細な熱環境調整を通じて、快適な屋外空間を自律的に創出する新たな建築インターフェースとしての技術確立を目指す。



图 99:  $\pm 2^{\circ}\text{Concrete}$   
(摄影者: 笔者)

## 参考文献・出典

- [1] Iris van Herpen, Daniel Widrig, Stephen Jones. "Escapism". Iris van Herpen. <https://www.irisvanherpen.com/DOCS/IVH-Escapism.pdf>. (2011).
- [2] "Kinematics Dress". Nervous System. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/sets/kinematics-dress/>. (参照日: 2025-12-12).
- [3] Jack Forman, Mustafa Doga Dogan, Hamilton Forsythe. "DefeXtiles: 3D Printing Quasi-Woven Fabric via Under-Extrusion". UIST '20 (ACM Symposium on User Interface Software and Technology). <https://doi.org/10.1145/3379337.3415876>. (2020).
- [4] "Active Shoes". Christophe Guberan, Carlo Clopath, MIT Self-Assembly Lab. <http://www.christopheguberan.ch/active-shoes/>. (参照日: 2025-12-12).
- [5] "Self Forming Structures: An Exploration into 3D Printing on Pre-stretched Fabric". Gabe Fields. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=8011>. (参照日: 2025-12-12).
- [6] "SELF-SHAPING TEXTILES: Form-finding of tensile surface structures through 3D printing on pre-stressed fabric". Agata Kycia. <https://agatakycia.com/2018/09/10/3d-printing-on-textiles-as-means-of-material-informed-design-strategy-for-performative-building-envelopes/>. (参照日: 2025-12-12).
- [7] "The emergence of 4D printing". Skylar Tibbits. [https://www.ted.com/talks/skylar\\_tibbits\\_the\\_emergence\\_of\\_4d\\_printing](https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing). (参照日: 2025-12-12).
- [8] Jesús Rodríguez, Miguel Otaduy, Bernhard Thomaszewski. "Computational Design and Automated Fabrication of Kirchhoff-Plateau Surfaces". ACM SIGGRAPH 2017. <https://la.disneyresearch.com/publication/kirchhoff-plateau-surfaces/>. (2017).
- [9] Göksal Erdem, Timo Grothe, Andrea Ehrmann. "Adhesion of new thermoplastic materials printed on textile fabrics". Tekstilec. [https://www.researchgate.net/publication/370658948\\_Adhesion\\_of\\_new\\_thermoplastic\\_materials\\_printed\\_on\\_textile\\_fabrics](https://www.researchgate.net/publication/370658948_Adhesion_of_new_thermoplastic_materials_printed_on_textile_fabrics). (2023).
- [10] "Fireproof Ceiling (United States Patent No. 619,769)". Louis Wilhelm Gustav Lilienthal. <https://lilienthal-museum.museumnet.eu/sites/lilienthal-museum.museumnet.eu/files/archivalie/digitalisatpublic/13940.pdf>. (参照日: 2026-01-02).
- [11] "KnitCandela". Zaha Hadid Architects, Block Research Group, Architecture Extrapolated. <https://www.zaha-hadid.com/design/knitcandela/>. (参照日: 2025-12-12).
- [12] 浅井一彦, 国枝稔, 犬飼利嗣. "透水性型枠によるコンクリートの品質改善". コンクリート工学年次論文集. [https://data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/26/026-01-1052.pdf](https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/26/026-01-1052.pdf). (2004).

- [13] 渡邊悟士, 黒岩秀介. "不織布張付け型枠によるコンクリートの表面気泡低減技術の開発". コンクリート工学年次論文集. [https://www.data.jci-net.or.jp/data\\_pdf/42/042-01-1192.pdf](https://www.data.jci-net.or.jp/data_pdf/42/042-01-1192.pdf). (2020).
- [14] "The Fabric Formwork Book: Methods for Shaping Concrete with Flexible Molds". Mark West. <https://www.routledge.com/The-Fabric-Formwork-Book-Methods-for-Shaping-Concrete-with-Flexible-Molds/West/p/book/9780415748858>. (参照日: 2025-12-12).
- [15] J. J. Orr, A. P. Darby, T. J. Ibell. "Design and optimisation of fabric-formed concrete beams". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. <https://doi.org/10.1680/stbu.10.00017>. (2011).
- [16] E. Gallego, C. González-Montellano, A. Ramírez. "A simplified analytical procedure for assessing the worst patch load location on circular steel silos with corrugated walls". Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.032>. (2011).
- [17] "米テキサス州で100棟の3Dプリント住宅コミュニティを建設中…モデルハウスを見てみよう". Brittany Chang, 仲田文子, 井上俊彦. <https://www.businessinsider.jp/article/272975/>. (参照日: 2025-12-12).
- [18] "子どものための屋外遊具「WhiteLoop (ホワイトループ)」". DigitalArchi. [https://www.digital-archi.com/2025/07/25/works-whiteloop\\_jpn/](https://www.digital-archi.com/2025/07/25/works-whiteloop_jpn/). (参照日: 2026-01-02).
- [19] Alexander Curth, Ashley Hartwell, Caitlin Mueller. "Parametric waffle slabs: Optimal geometry materialized with additive construction". International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). [https://www.researchgate.net/publication/364152892\\_Parametric\\_waffle\\_slabs\\_Optimal\\_geometry\\_materialized\\_with\\_additive\\_construction](https://www.researchgate.net/publication/364152892_Parametric_waffle_slabs_Optimal_geometry_materialized_with_additive_construction). (2022).
- [20] "Paul Rudolph (architect)". Wikipedia contributors. [https://en.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Rudolph\\_\(architect\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Rudolph_(architect)). (参照日: 2025-12-30).
- [21] R.Pommer. "The A&A Building at Yale, Once Again". Burlington Magazine. (1972).
- [22] "Andrea Deplazes". Architectuul. <https://architectuul.com/architect/andrea-deplazes>. (参照日: 2025-12-30).
- [23] A.Deplazes. Xonstrucing Architecture: Materials, Processes, Structures, a Handbook. (2008).
- [24] Albert.Kahn. "Reinforced Concrete these Past Twenty Years". Proceedings of the American Concrete Institute,XX. (1924).
- [25] Onderdonk. Progressive Architecture, XLVII. (1966).
- [26] エイドリアン. フォーディ、天内大樹. "メディアとしてのコンクリート". 鹿島出版会. <https://www.repre.org/repre/vol28/books/03/01.php>. (2016).

- [27] "Le Corbusier". Wikipedia contributors. [https://en.wikipedia.org/wiki/Le\\_Corbusier](https://en.wikipedia.org/wiki/Le_Corbusier). (参照日: 2025-12-30).
- [28] "On Weathering: The Life of Buildings in Time". Mohsen Mostafavi, David Leatherbarrow. <https://mitpress.mit.edu/9780262631440/on-weathering/>. (参照日: 2025-12-30).
- [29] Agata Kycia, Anton Tetov Johansson. "Self- Shaping Textiles, Form-Finding of Tensile Surface Structures through 3D Printing on Pre-stressed Fabric". Technischen Universität Berlin. <https://depositonce.tu-berlin.de/items/e6a31320-76e3-4116-8f0f-d0ed71434e82>. (2022).
- [30] Amelia Vey Henry, Anton Tetov Johansson, David Andréen. "4D Printing Architectural Textiles". LTH - Faculty of Engineering Department of Architecture and Built Environment. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9151708&fileId=9151709>. (2024).
- [31] Annie Locke Scherer. "CONCRETE FORM[ing]WORK: Design,Fabrication,Simulation and Correlation of Parametrically Patterned Flexible Formwork and Concrete". Kth Royal Institute of Technology. [https://www.researchgate.net/publication/324693199\\_Concrete\\_Formingwork\\_Integrating\\_patterns\\_in\\_flexible\\_formwork\\_for\\_cast\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/324693199_Concrete_Formingwork_Integrating_patterns_in_flexible_formwork_for_cast_concrete). (2021).
- [32] "Hydrotex Filter". M&R Geotechnical Services. <https://www.mrgeo.net/fabricformedconcrete>. (参照日: 2025-12-12).
- [33] Daria KOVALEVA, Ivan TOMOVIC, Lucio BLANDINI. "Structural design and analysis of Marinaressa Coral Tree". International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). [https://app.iass2024.org/files/IASS\\_2024\\_Paper\\_460.pdf](https://app.iass2024.org/files/IASS_2024_Paper_460.pdf). (2023).
- [34] "小野寺匠吾建築設計事務所による、大阪・関西万博の「いのちめぐり冒険(河森正治館)」。環境問題や廃棄解体問題も主題に計画。建築の循環プロセスの可視化を目指し、海運規格の輸送性の高い鉄骨フレーム、大阪湾の海水100%のコンクリート、分解や再構築の効率が高い構造システム、で造る建築を考案". 小野寺匠吾, 上原裕, 河野祐輝. <https://architecturephoto.net/237942/>. (参照日: 2025-12-12).
- [35] "ゆざわや". . <https://www.yuzawaya.shop/>. (参照日: 2025-12-12).
- [36] "キャラヌノ". . <https://charanuno.com/>. (参照日: 2025-12-12).
- [37] Daria KOVALEVA. "Self-shaping textiles Form-finding of tensile surface structures through 3D printing on pre-stressed fabric". Technischen Universität Berlin. <https://depositonce.tu-berlin.de/bitstreams/91d42e0c-3866-4d64-a53b-27a091d3522f/download>. (2022).

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご支援いただいたことを深く感謝いたします。

指導教授の田中浩也先生には2年間にわたり、ご指導をいただき、心より感謝を申し上げます。今までは何度も言葉の壁による行き違いが生じた際にも、常に根強く、温かく教えてくださいました。研究が生き詰まった折には、先生の斬新な視点からアドバイスに何度も救われました。おかげさまで、自分が触覚に対する強い関心を再認識し、研究を最後まで完成することができました。

副査を引き受けてくださった鳴川肇先生、石川初先生には、日頃から大変お世話になりました。鳴川先生には、レビューに制作物の際に制作物へ触っていただき、常に深い関心を持って数多くの貴重な助言やコメントをいただきました。先生との対話を通じて研究を深められたことに、心より感謝しております。石川先生はいつも多角的な視野からご指摘をいただき、細部まで研究の内容を添削してくださったおかげで、自分が納得する論文へと仕上げることができました。

(株) DigitalArchi の松岡康友さんには、毎週の面談を通じて、3D プリント型枠分野にける先駆者として多大なる技術的な指導をくださいました。プロトタイプの実現性向上や展示手法についてもご相談に乗っていただき、そのおかげで、現在の成果へと発展させることができました。

(株) studio infinite の木内洸雲先生には、大学院への入学以前より研究の相談に乗っていただきました。ランドスケープデザインの魅力や建築に関する広い範囲の知識をご教示くださり、先生のご指導があったからこそ、制作物を完成させることができました。

研究室の先輩方、後輩方からは、本来であれば全員のお名前を記したいほど、日々多くの刺激をいただきました。日常的なアイデアの共有や、時には共に息抜きをしながら、研究を遂行する上で欠かせない支えをいただいたことに深く感謝いたします。

特に、プロジェクトメンバーである河合慈英氏には、制作物の水回りシステムの設計においてたくさんのご協力をいただきました。水に関する想像力豊かなアイデアを数多く共有し、共に議論を重ねた時間は、非常に貴重な糧となりました。

同期の谷口朝洋さんと矢田美涼さんには、同じ外部生として共に入学して以来、3D プリンティングについて日々熱く語り合い、ものづくりの楽しさを分かち合えたことに感謝します。留学生である私の研究内容の添削や発表練習にも、何度も付き合ってくれました。今後はそれぞれの道を歩みこととなりますが、これからも 3D プリントを架け橋としてお互い刺激し合い、自作キーボードやドライブ旅行など楽しめるながら活ってください。

感謝羅小姐與李女士在我還在準備考研究所的期間就慷慨地提供研究空間，並在我感到低潮時給予暖心的鼓勵。因為有兩位陪伴與協助，我才能順利完成考上研究所並且完成這篇論文，並度過一段既充實又愉快的碩士時光。對於這份恩情，我由衷表達感謝。未來我也會持續精進，期許自己能回報兩位，並且成為你們的依靠。

感謝身在台灣一直守護著我的父親，母親，哥哥和全部的家人們。謝謝你們總是不遺餘力地支持我的學業，並在電話中時刻掛念著我的身體健康。每當我回台灣時，即便在忙碌之中，你們總會特地前往機場接機，並帶我去品嚐各種美食。此外，你們還經常郵寄各種

生活必需品到日本, 在生活上給予我無微不至的照顧與支持。為了將來能成為家人的依靠, 我會繼續努力, 希望能盡我所能回報你們的辛勞與愛。

2026年1月11日

江明靖