

# 紙を主構造にデジタルファブリケーションを活用した Origami Teahouse の製作

Construction of Origami Teahouse with Paper as The Main Structure  
Using Digital Fabrication

○大場 風太\*1, 杉田 宗\*2, 奥川 航大\*3  
Futa OBA\*1, So SUGITA\*2 and Kota OKUGAWA\*3

\*1 広島工業大学環境学部建築デザイン学科 3年

Student, Department of Architectural Design, Hiroshima Institute of Technology,

\*2 広島工業大学環境学部建築デザイン学科 准教授 博士

Associate Professor, Department of Architectural Design, Hiroshima Institute of Technology, Ph.D.

\*3 鹿島建設 建築設計本部

Kajima Corporation

キーワード：デジタルファブリケーション;CNC;パラメトリックデザイン;折り紙;茶室

Keywords: Digital fabrication; cnc; parametric design; origami; teahouse.

## 1. 概要

本稿では、紙を主構造にした「Origami Teahouse」の製作にあたり CNC 加工機を応用したデジタルファブリケーションによって作られた紙スクリーンの強度を上げる手法の提案と、その茶室の製作方法について報告する。

CNC 加工機に通常取り付けている切削用のビットを取り外し、でんぷん糊を垂らすための自作ノズルを取り付けた。ノズルを取り付けた CNC を用いて市販の障子紙に正確に糊を垂らした後、自然乾燥させることで強度が増し、紙のみで自立するスクリーンが出来上がる。

また、茶室の全体モデリングから、必要な紙の大きさや枚数を割り出し、CNC 加工機を操作するための G コードの出力までを Grasshopper 上でを行い、一元化した。

## 2. パビリオン概要

### 2.1. デザイン

「Origami Teahouse」は、2022 年の 9 月に行われた広島工業大学とイギリスのラフバラー大学の合同ワークショップで提案された移動式茶室のデザインを、フルスケールで制作したものである。(図 1)



図 1 パビリオン 会場写真

実際に制作した茶室は、折った紙を自立させた全長約 13m のスクリーンを S 字に配置した形をとる。スクリーンは高さ 1.2m から 2.2m まで緩やかに高くなり、折りの角度も高さが高くなるほど大きくなるデザインになっている。(図 2)

茶室全体を柔軟性のあるスクリーンのみで構成することで、設置場所に合わせて S 字カーブを柔軟に変える事ができ、撤収するときには全てを折り畳んで平積みにし、容易に運搬することが出来る。また、ワークショップ時に提案されたデザインでは柱でスクリーンを建たせる案であったが、製作の段階では組み立ての簡易化を考えて極力補強部材を少なくする方向で検討を重ねた。

### 2.2. 製作上の課題点

この茶室を実現する上で特に検討が必要であった点として、以下の事が挙げられた。

- ①紙の強度を上げ自立させる検討
- ②一日で組み立てられる仕様にする検討
- ③変化する高さや折りの角度を正確に製作する検討
- ④限られた設置スペースで十分な内部空間を作る検討
- ⑤大量のスクリーンを短期間で生産する検討

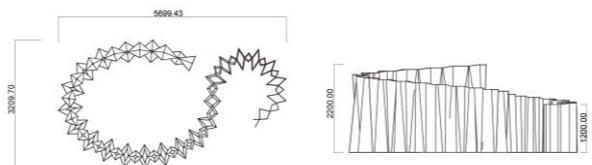


図 2 平面図 立面図

紙を支える部材を極力少なくするためには最大で 2.2m になるスクリーンを紙のみで自立させる事が理想である。そうすることで、組み立てが容易になり、②の課題についても解決することが出来る。③、④については Grasshopper 上のパラメータとして組み込むことで、数理的に解き、解決した。

しかし茶室全体を構成する紙一枚一枚は、全て異なる形や大きさをしており、合計で約 50 枚分を制作する必要があった。これらを全て正確に、かつ短期間で制作するために、デジタルファブリケーションによる自動化で解決を図った。

### 3. 紙の強度を上げる手法

まず、パピリオン全体を構成する紙を選定するにあたり以下の条件を満たす素材を検討した。

- ・茶室の雰囲気にあうもの
- ・安価で手に入りやすいもの
- ・最大で 2.2m の長さをとることができるもの

これらのことからホームセンターなどで簡単に入手できる障子紙を採用した。

次に、障子紙の強度を上げる手法について複数検討を行った。まず、伝統的なうちわの要領で、竹ひごを障子紙二枚で挟み、糊付けする方法を試した。折り線の部分と紙の四辺に竹ひごを配置し、紙全体を糊付けする方法をとった。しかし、糊が乾燥すると収縮する力で竹ごと大きく歪んでしまう結果となった。(図 3)

次に、竹を使わずに、障子紙に糊を線上に垂らし 2 枚の障子紙を貼り合わせる方法を試行した。ここでは障子紙の横幅を往復するように糊を垂らした。また、糊は入手しやすい以下の三種類を試した。(図 4)

- ・液体のり(ポリビニルアルコールと水)
- ・木工用ボンド(酢酸ビニル樹脂と水)
- ・障子糊(でんぷんと水)



図 3 竹ひごを入れた試作 図 4 異なる糊を使った検証

三種類の糊を試した結果、どれも紙の強度は同程度増すことが分かったが、液体のりと木工用ボンドは皺が目立たない代わりに、乾燥すると糊の線が非常に目立つ結果となった。反対に障子糊は皺が目立つが、水の比率の調整ができることや、障子紙との相性が良いことも分かり、乾燥後も線を目立たなくさせることが出来た。この試行の結果から、でんぷん糊を採用することとした。

また、手で障子紙に糊を塗ったり、糊を垂らしたりするのは、均一に 2 枚を貼り合わせることができない。そこで、CNC 加工機を応用することによって一定の速度で糊を垂らす作業を自動化し、生産の効率化を図ることを決めた。

### 4. CNC 加工機による自動化の手法

#### 4.1. Grasshopper 上でのワークフローの構築

CNC 加工機を用いてすべてのスクリーンの制作を自動化するために、まずはじめに Grasshopper 上で茶室全体をモデリングするプログラムを作成した。また、全体モデルから、それを構成する紙一枚一枚を Grasshopper 上に平置きするように配置した。(図 6)平置きされた紙の形状に合わせて CNC 加工機に取り付けたノズルから糊を垂らすためのパスを生成し、そのパスを CNC 加工機用の G コードとして出力するプログラムも Grasshopper を使って作成した。(図 7)

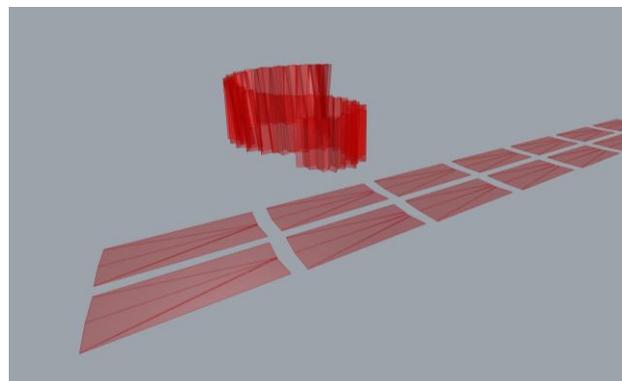


図 6 全体モデルと平面展開

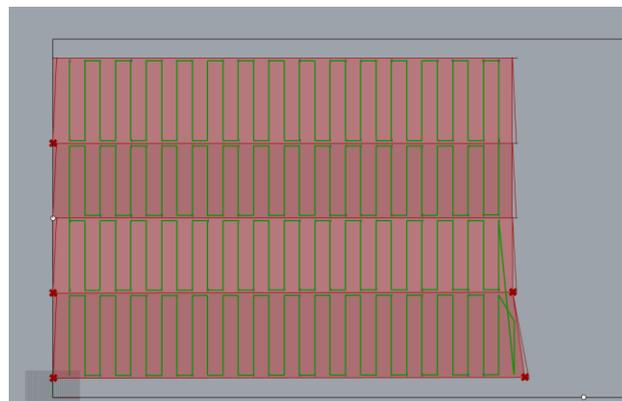


図 7 ノズルのパス生成

これによって、茶室の全体形状をパラメトリックに検討しながら、全ての紙の形状ならびに紙の形状に対応した糊を垂らすパスを CNC 加工機用の G コードを出力する一連の流れを、コンピュータ上に構築することが出来た。

#### 4.2. パラメータの設定

全体形状を決定するパラメータには主に「S 字を作るための基準ポリライン」と「紙の枚数」、「スクリーンの高さ」を組み込んだ。(図 8)設置場所や面積が制作期間直前まで決まらない状況であったため、パラメータを操作しながら打ち合わせを進めることで、柔軟に内部空間や展示場所に合わせた形状を決め、短期間の間に制作へ移行できるワークフローを確立させた。

G コード生成のプログラムのパラメータには、「CNC 加工機の動く速度」と「往復するパスの間隔」を組み込んだ。これらは実際に糊を垂らして試作していく中で最適な値を探るのに役立った。G コードは、制作に使用した ShopBot で読み込める形式である sbp 形式で出力した。

#### 4.3. CNC 加工機の 3D プリンターの応用

CNC の切削用ビットを取り外し、糊を垂らすためのノズルを取り付けることで、コンピュータ数値制御を活かして、3D プリンター的な応用ができるのではないかと考えた。ノズルは市販のドレッシング容器をベースに、ノズルの先端部分は開口の大きさが異なる部品をいくつか 3D プリンターで出力し、糊が垂れる量を検証した。また、ノズルに糊を流しこむ部分は市販のチューブと調理用ボウルを接着で一体化し、3D プリントしたジョイントパーツで CNC 加工機に取り付けた。(図 9)

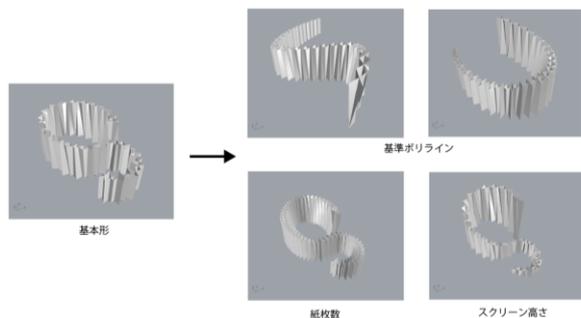


図 8 パラメータ操作によるバリエーション

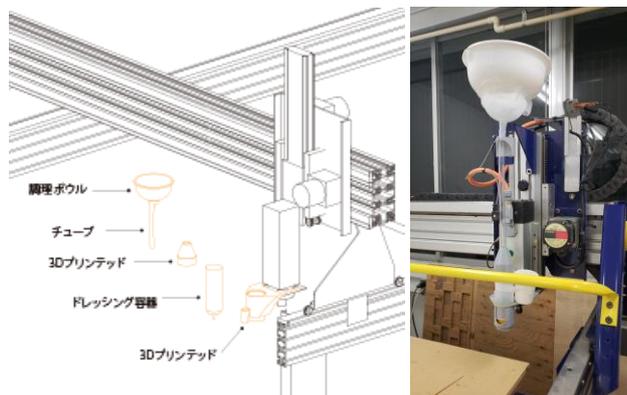


図 9 ノズルの構成



図 10 障子糊のノズルへの投入

糊が乾いた後に紙の端の不要な部分をハサミで切り取る必要があった。そこで、ジョイントパーツにサインペンを取り付ける部分を加えて一体で成形し、トリミングの位置のマーキングも CNC で自動化することとした。

#### 4.4. 糊の粘度の検討

糊の粘度は糊を垂らす作業を自動化する上で非常に重要な点であった。糊が緩すぎると乾いた際の紙の皺がひどくなり、逆に糊が硬すぎるとノズルからスムーズに垂れない。最終的には、市販されている一袋 280g の障子糊に対して 450ml の水を加えた糊を、直径 1.5 mm の開口を持ったノズルで垂らすのが最適であることが分かった。また、作業を連続して行くと糊の塊がノズルに詰まってしまうため、定期的にノズルを洗浄または交換して作業を進めた。

### 5. 生産プロセスから組立まで

#### 5.1 紙スクリーンの生産

紙スクリーンを生産するには、まず CNC の台に障子紙をセットし、トリミングの位置をマーキングする G コードを実行し、紙スクリーンの形状をサインペンで記した。次に糊を垂らす G コードを実行し、障子紙全体に糊を垂らした。(図 11)垂らされた糊を挟むように 2 枚目の障子紙を重ね一晩乾かした。(図 12)乾いた状態で不要な部分をトリミングし、糊が無い部分を折り線として折り畳み、対になるスクリーンと両面テープで接着した。糊が垂らされた障子紙は収縮し、独特のテクスチャーが生まれた。(図 13)

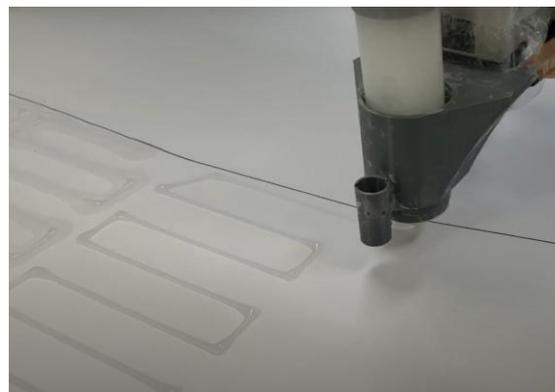


図 11 糊を垂らす作業



図 12 乾燥中の紙スクリーン

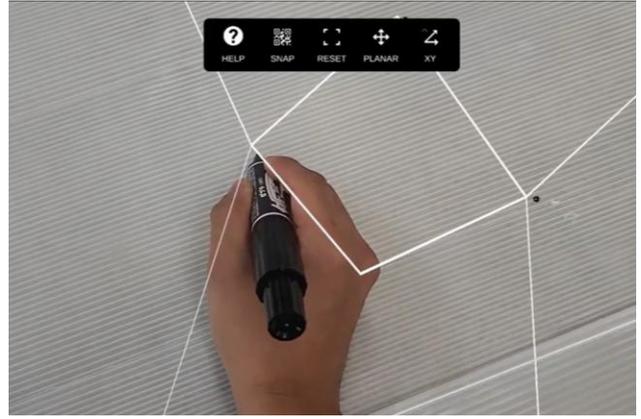


図 14 AR アプリによる投影



図 13 紙スクリーンのテクスチャー



図 15 紙スクリーンをすべて畳んだ状態

また折り線の部分には糊を垂らさないようにプログラムを組んだことで、糊が乾いた後でもどこが折り線なのかが目視でわかる。完成した紙スクリーンはそれ自体で自立する高度を持つが、一番高い 2.2m の部分は転倒する恐れがあったため、対となる 2 枚のスクリーンによって作られる空洞部分に、プラダンで作成した型を差し込むことで安定させた。

## 5.2 茶室の組立

土台は 3D モデルの形状をもとに切り出した合板を使用する予定だったが、紙スクリーン自体が糊の収縮によって大きく縮んでしまっており、3D モデルの寸法とはずれていることが分かった。そこで、パビリオン全体が入るように並べた 9 枚の合板に、AR アプリの「Fologram」を用いて 3D モデルのフットプリントを投影し、紙スクリーンの接合点を、合板にサインペンでプロットしていく方法を取った。(図 14)プロットした位置に空けた穴にダボを挿し、そこに紙スクリーンのつなぎ目を引っかけながら全体を配置することで、理想形に近い S 字を再現した。

設置会場へは、土台となる 24 mm の合板 9 枚と紙スクリーンのみを搬入し、全ての紙スクリーンを約 1 時間半で設置をすることが出来た。また、紙スクリーンはすべて畳んだ状態にすると、2 人で運べる大きさ、重さになるため、移動の容易さも実現された。(図 15)

## 6. まとめ

本稿では、茶室の制作において、CNC 加工機の 3D プリンター的な活用方法によって紙の強度を上げる手法と、Grasshopper 上でのモデリングから G コードの出力までの一元化を提案した。紙に糊を垂らす手法によって、紙ならではの柔軟性と軽さを残しながらも、紙だけで自立する強度を担保できた。搬送の容易さが重視される移動式の茶室において効果的な制作方法であったと考ええる。

本報告書の作成にあたり、ワークショップ時に共に移動茶室のデザインを作り上げた、ラフバラー大学のグループメンバー、Yarden Alloun、Candis Boateng、Kuldip Rohit、に感謝を申し上げます。ありがとうございました。

## 【参考文献】

- 1) 奥川航大、杉田宗、中村瑞貴：デジタルファブリケーション製作での部材管理とデータ作成の簡略化、日本建築学会情報システム技術委員会第 44 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、pp.579-582、2021
- 2) 淡路広喜、権藤智之、林盛：デジタルファブリケーションと合板の現場曲げ加工による自由曲面パビリオンの制作、2021 年度日本建築学会関東支部研究報告集 II、pp.453-456、2022