

## “ディンプル構造 2020：花筏” – 壊れても死なない構造

Dimple Tectonics 2020 : Floating Petals – preventing death in the event of collapse

金属薄板に花柄のディンプル加工を施した架構です。軽量で延性ある、災害で壊れても人が死なない、そんな建築構造の可能性を追究しています。風圧を受けにくい形状を追究し、形態解析により形状を最適化し、2次元スペクトル解析によりナチュラルさを分析し、2020年度は「花筏」の様子が生まれました。

### ワークショップスケールの架構に生まれる形態

Experiments : Morphogenesis appearing in workshop scale structures

ワークショップスケールの小規模架構を構築する体験は、**材料特性、幾何学特性、力学、職人の技術、現場環境、消費エネルギーの低減**、に基づいた構造形態を生み出す手法を知る良い機会となります。大自然の全てを知ることはできない中で、簡素な検証で安全性を判断する**エンジニアリングの手法**を学ぶこともできます。実物大でしか体感できない材料特性および空間特性、構造計算との整合性、構築可能性を示すものとなります。そして、「壊れても死なない構造」を追求する活動でもあります。

東京大学柏キャンパスは強い風が吹き抜けます。「木枯らし」「春一番」を想定して、大きく変形しながらも**風速 20 m/sec**に耐える形態を目指しました。

応力分布に応じて濃淡に散りばめた花柄は、日差しを反射して独特の「**ナチュラルさ**」を発揮します。座屈強度を発揮するディンプル形状、格子状に単純化したモデル化、手動形態解析、2次元画像スペクトル解析を経て、形状を決定しました。

Through workshop scale structures, we can learn how to develop the morphogenetic design, based on **materials, geometry, dynamics, craftsmanship, site matters, energy consumption, spirit of engineering**.

We also have to learn and develop the way to run a workshop in a few days or few weeks.

This structure is supposed to resist against the blow called “**Kogarashi**” “**Haru Ichi-ban**”, supposing the wind **speed 20 m/sec**.

Flower dimples that are scattered based on stress distribution would show unique naturalness when they reflect sunlight.

Through experiments to figure out strong dimple shape against buckling phenomenon, simplified grid model for structural analysis, manual form optimization, 2D visual spectrum analysis, the shape was developed.

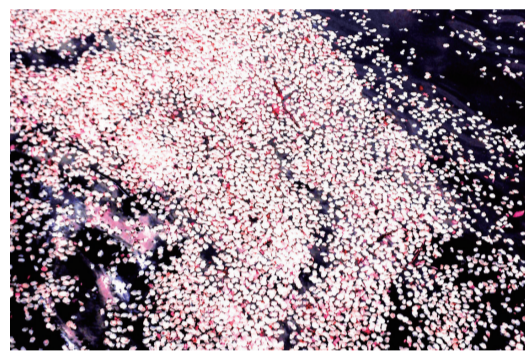
## コンセプト

Concept

「花筏(はないかだ)」

水面に浮かぶ花びらが連なって流れていく様子を筏に見立てた言葉。

“花筏”をモチーフとして、水の流れを連想させるナチュラルな形態のパネルに、大小の花模様を施して制作を行いました。



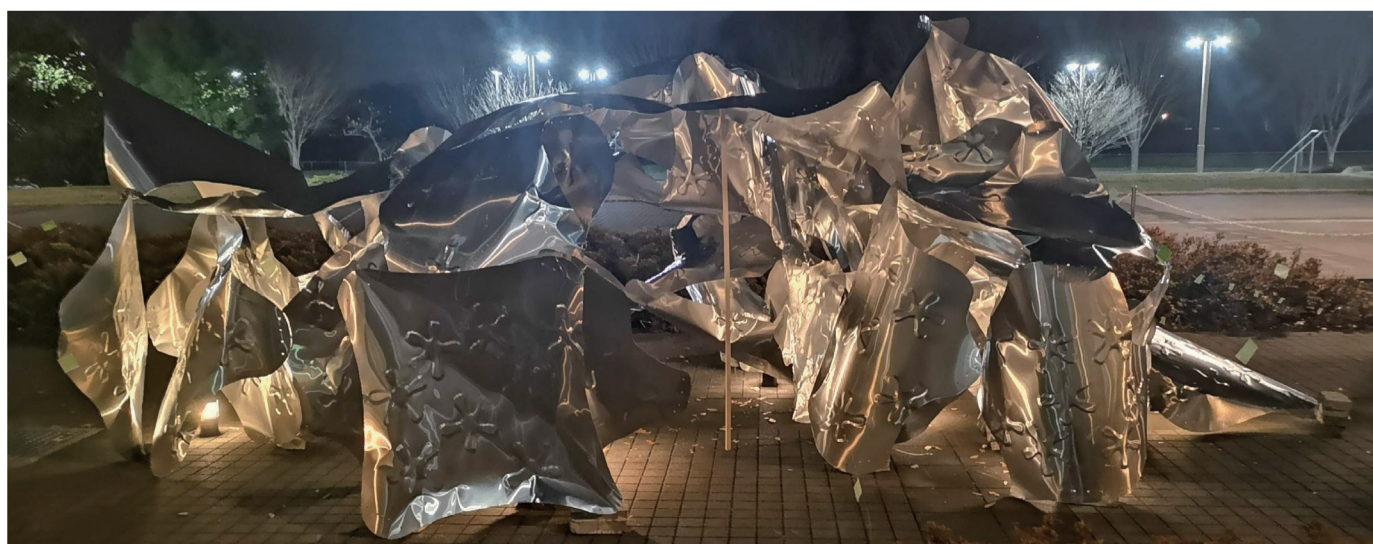
花筏



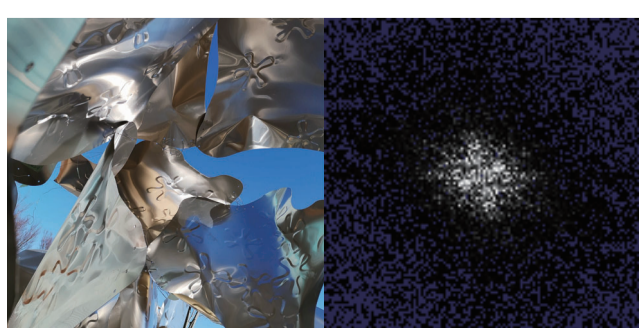
ディンプル構造

広大な敷地と自然環境を持つ柏キャンパスで、川の流れるようにナチュラルでありながら、アルミの重さを感じさせない軽やかな構築物を作りました。人が入り込めるような空間を設けることで構築物越しに空を見上げるなど、多様な空間体験ができるように設計しました。この構築物は以下のような特徴が挙げられます。

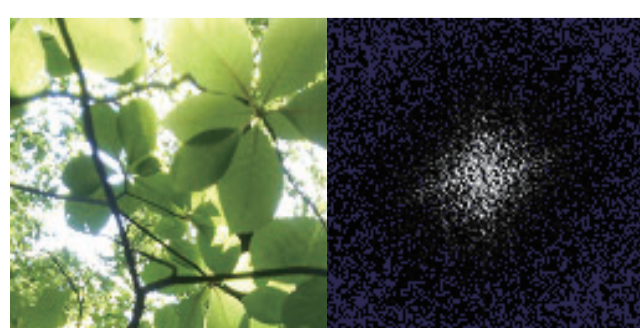
- ・アルミパネルにディンプルをつけて強度を増したことにより、より薄く軽いアルミパネルで成り立ち軽やかな見た目、施工性の向上、材料費の節約につながった。
- ・様々な形状のアルミパネルを組み合わせることで、ランダム性を持たせ、より自然な風貌に仕立てた。
- ・花模様のディンプルをサイズを変えてアルミ板にかたどることで、無機質なアルミに有機的な表情を持たせた。
- ・アルミの高い反射率を活かし、周囲の風景の映り込みや太陽光による拡散光の煌めき、夜間のライトアップが映える作品となった。
- ・全体を不整形なドーム状にして高さを出し、中央部に空間をつくったことで、作品の内側に人が入って木漏れ日と似たスペクトルを持つ風景を楽しむことができる。



夜間のライトアップ



花筏の内部風景とスペクトル



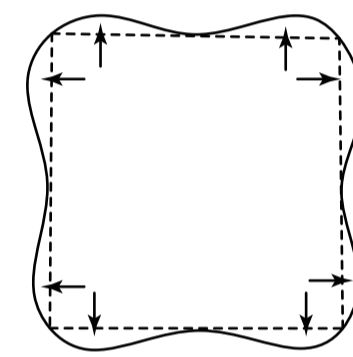
木漏れ日の風景とスペクトル

## スタディ

Study

接合部にホッチキスを用いて1/20スケールで紙を主な素材としてパネルの形状、強度、配置の部分スタディを行いました。その結果を参考に1/10スケールでアルミホイルを主な素材として全体形状をスタディしました。

### Shape

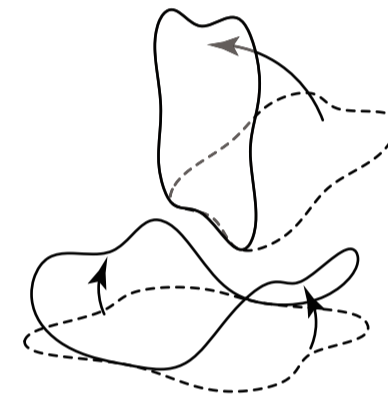


アルミパネルの形状スタディは「blob (プロブ)」を意識しました。「blob」とは輪郭が曲線的で曖昧な、スライム、クラゲ、アメーバのような粘体、液状、半固形、不定形の塊のような形状です。これにより本番では金属でありながらナチュラルな印象を与える構築物とすることができただけでなく、接合の方向性の選択肢が広がり施工性の向上にも繋がりました。



blobなパネル

### Strength

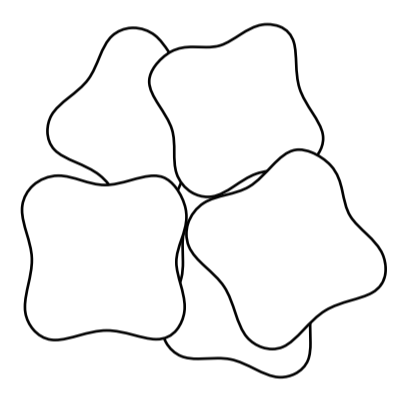


パネルの強度を向上させるために鉛直な体勢で接合することを意識しました。階層が増えると重量が増し強度が必要となるため、足となる部分を制作することとし、2枚のパネルを組み合わせた筒状構造を検討しました。また、パネルを曲げて変形させると強度が増すことが分かり、接合部付近に変形を加えて組み立てました。



鉛直パネルと曲面パネル

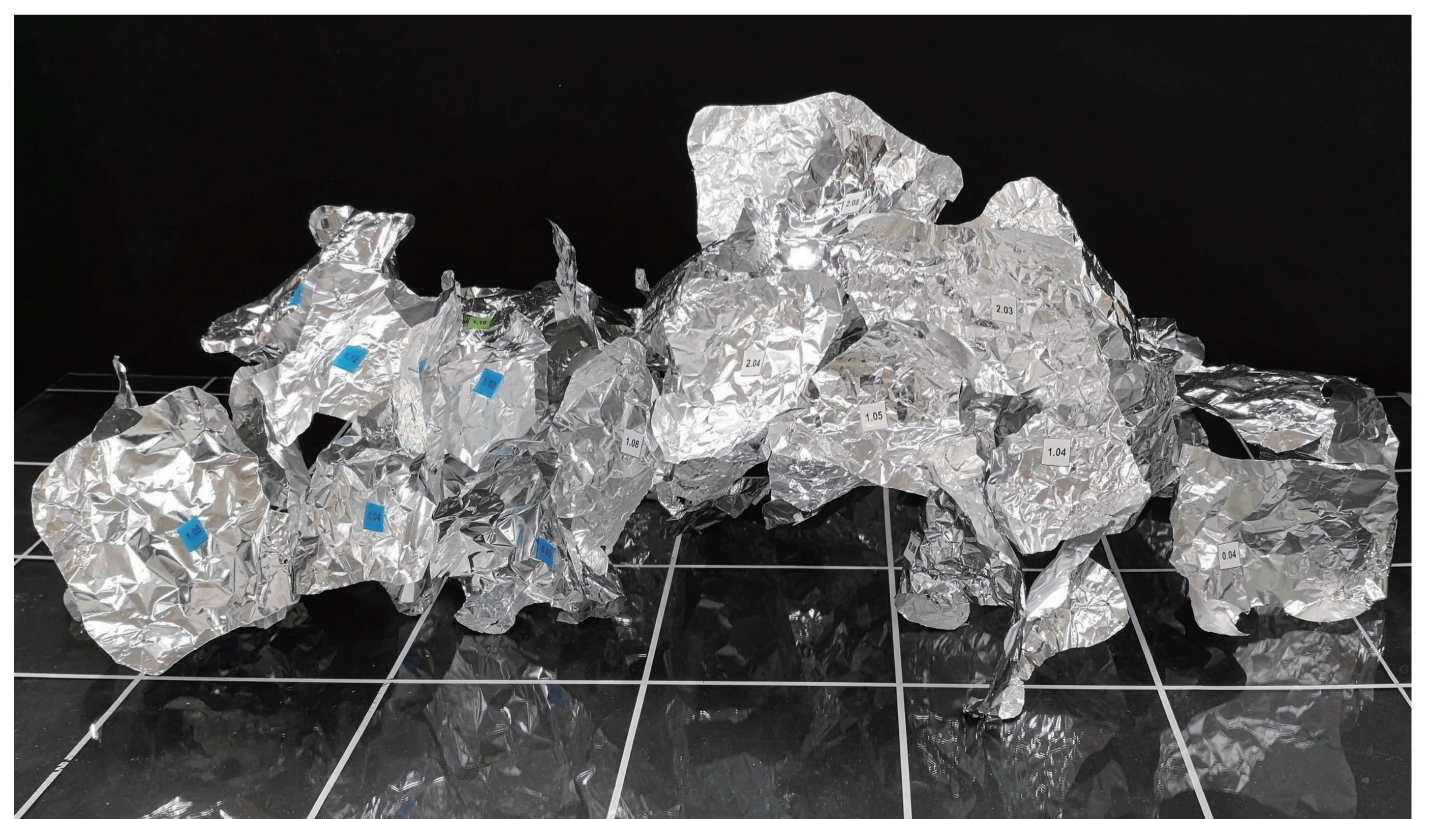
### Layout



配置スタディでは木漏れ日のようなナチュラルさを演出するため、多層構造を検討しました。全体を二層に分けると重量が増し負担が大きいため、二層部分と一層部分の組み合わせとし、頭部と尾部を有する不整形なドーム状の形状を意識して全体配置を検討しました。また人が入ることができるようアーチ状の入口を制作しました。



多層状の配置



全体模型 1/10 スケール

## ■ 構造物諸元・構造解析概要

General

### □ 寸法・重量 Dimension & weight

- ・幅 Width : 4m
- ・長さ Length : 6m
- ・高さ Height : 2m
- ・重量 Weight : 90kg

### □ 材料 Material

- ・Aluminium (thickness : 0.8mm, density : 2.7g/cm<sup>3</sup>)
- ・Stainless wire (diameter : 1.6mm)

荷重ケース Load case

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 長期荷重 Long term load  | G   |
| 短期荷重 Short term load | G+W |

### □ 荷重 Loads

- ・固定荷重 Dead load (G)
- ・風荷重 Wind load (W)



全体図 Overall view

安全対策として、侵入防護柵：ポール、鎖、立入禁止看板

強風対策：スクリューベグ、針金、漁網（強風時）

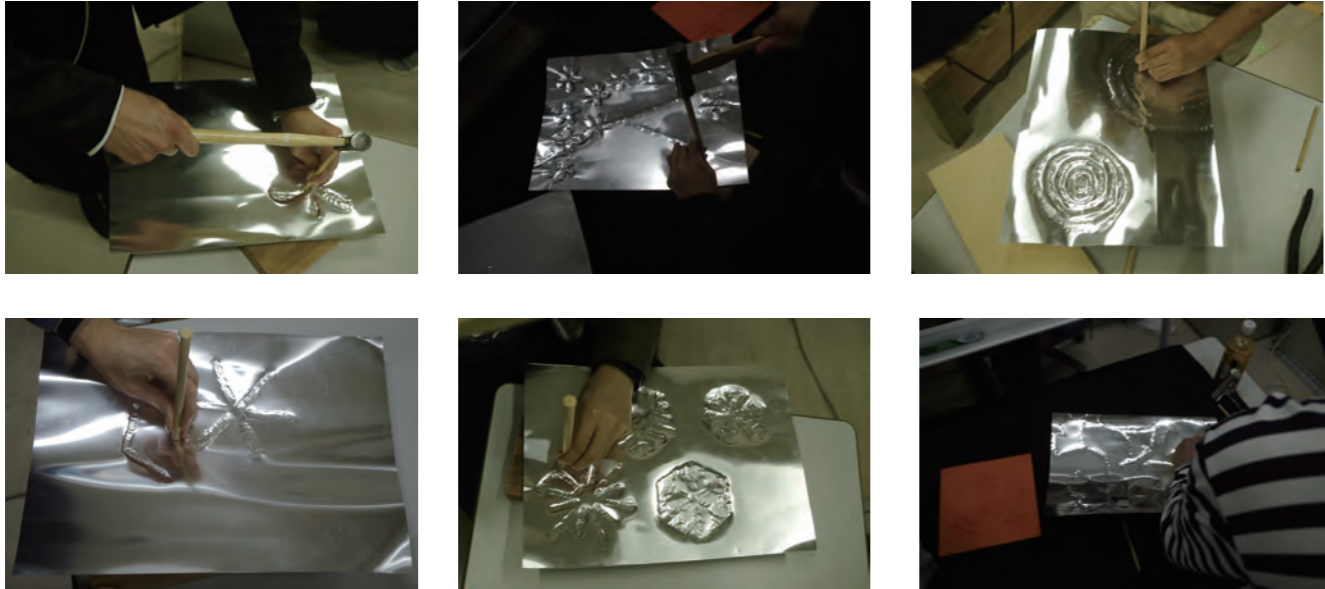
## ■ ディンプルのスタディ

Dimple

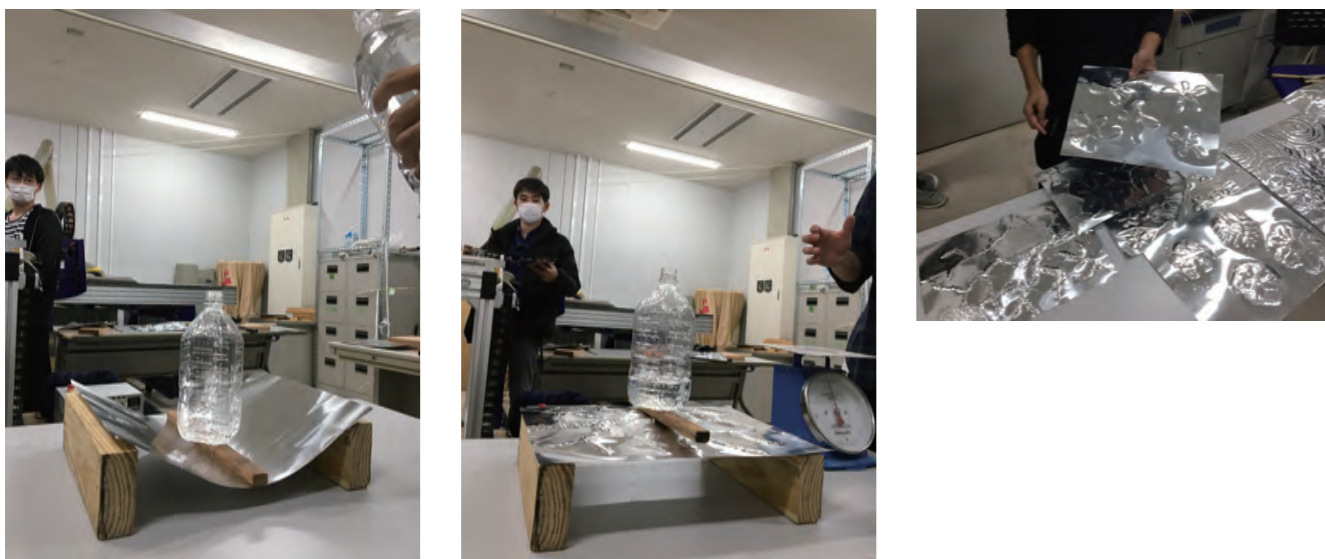
ディンプルの形状や得られる剛性・強度をスタディしました。

### □ ディンプルの形状/配置の検討・曲げ試験

厚さ0.2mmのアルミ板にディンプルを実際に打ちながら、ディンプルの形状や配置をスタディしました。花型や雪の結晶のディンプルを散りばめたものや葉脈状に模様を全体に張り巡らせたものなどが生まれました。



ディンプルを施したアルミ板に三点曲げ試験を行い、ディンプルの効果で曲げ剛性・強度が飛躍的に向上することを確かめました。



### □ 座屈試験

アルミ薄板で作られる構築物においては座屈現象が支配的になります。実際に用いる厚さ0.8mmのアルミ板にディンプルを施し、座屈試験を行いました。ディンプルを施したパネルは平板（座屈荷重1kgf）に比べて7倍、曲率を施したことでさらに2.5倍の座屈強度の向上を見込めることがわかりました。

| 試験体             | 座屈荷重   |
|-----------------|--------|
| アルミ平板           | 1 kgf  |
| ディンプルのみ         | 7 kgf  |
| ディンプル+曲率        | 20 kgf |
| ディンプル+曲率(ねじれ拘束) | 52 kgf |

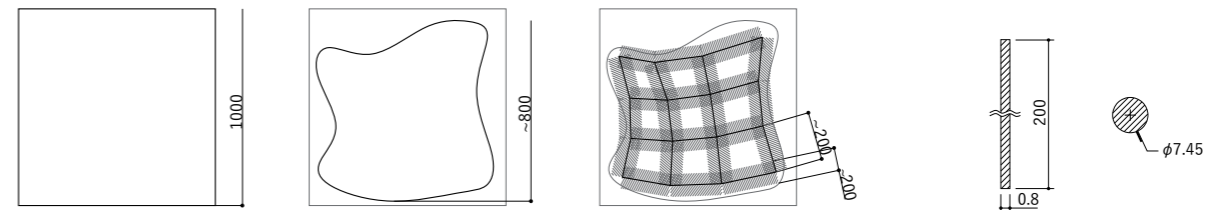


## ■ 構造計算

Calculation

### □ モデル化手法

アルミパネルの加工は、1枚1mの正方形パネルからBlobな形状を切り出し、dimpleを施して曲面状に整理する、という手順を経ます。この形状を制御点9個、次数3の四角形NURBS曲面に置換し、UV座標を用いて3×3のグリッドモデルを作成しました。簡単のため部材断面は長方形断面から円形断面に置換している。座屈が支配的であると仮定しアルミパネル全断面の弱軸曲げ剛性と等価な曲げ剛性となるように置換を行いました。

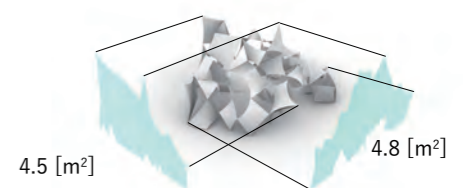


アルミパネルのモデル化の手順

部材断面の置換

### □ 風荷重の設定

- 風速 20[m/s]
- 風圧 35[kgf/m<sup>2</sup>]
- 効力係数 0.8
- 受圧面積 4.8[m<sup>2</sup>] × 0.7(開口率30%) × 1.2 = 4.0[m<sup>2</sup>]
- 風荷重 0.8 × 35 × 9.8 × 4.0 = 1097[kN]
- 自重 1.68 × 53 × 9.8 = 872[kN]
- ベースシア 1097/872 = 1.26



### □ 安全率計算

各部材の安全率を求めるために、その基準強度を考えます。

加工前のアルミパネルの座屈荷重はモデルの一要素あたり断面が200mm、厚さ0.8mmの長方形で座屈長さは90cmとし、座屈荷重、曲げ剛性は

$$P_{cr} = (\pi^2 EI) / L_k^2 = 0.727 \text{ kgf}, EI = 0.000853 \times 700 = 0.597 \text{ tcm}^2$$

- ・ディンプルの効果 7倍
- ・曲率を与える効果 2.5倍 (パネルの座屈荷重: 52kgf相当)
- ・接合部の拘束による座屈荷重の向上 3倍

の強度の増加を見込むと、モデル一要素の座屈荷重、曲げ剛性は

$$P_{cr} = 55 \text{ kgf}, EI = 31.34 \text{ tcm}^2$$

鉄の丸鋼に置換する際、曲げ剛性EIを合わせると

$$2100 \times (\pi D^4) / 64 = 31.34$$

$$D = 0.745 \text{ cm}$$

そこで、解析モデルの線材はφ7.45mmの丸鋼としてモデル化しました。

## ■ 構造解析

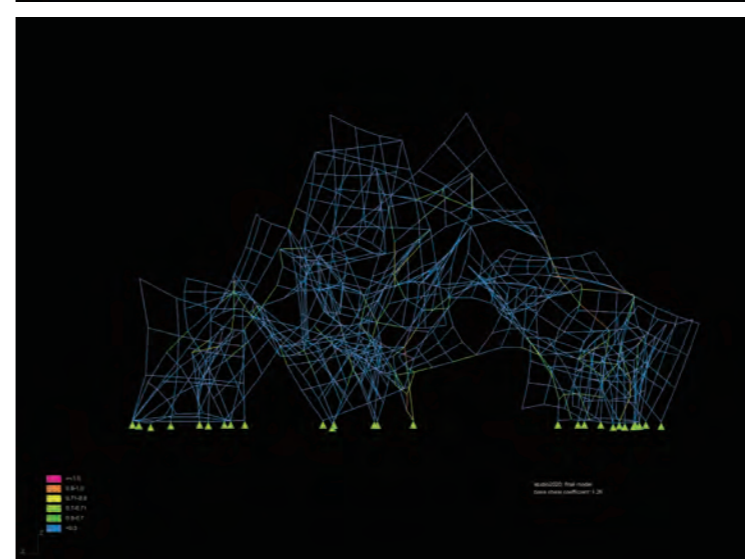
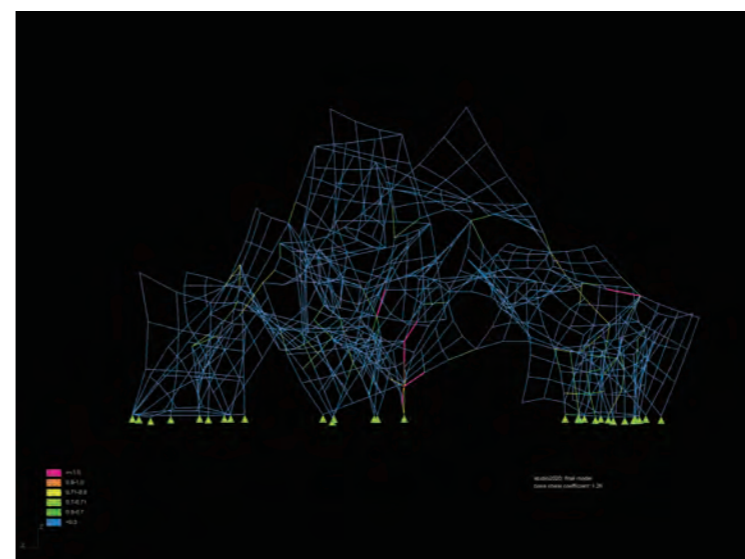
Structure analysis

節点を動かす操作によって全体形状を最適化します。

赤色の部材は安全率1を超えているので無くすように形状操作を行います。



初期形状



最適化操作後

## Fastener

Development process

アルミパネルを現場で接合する方法を模索した。

アルミパネルの端部に5cmごと直径6.5mm穴を作成し、1.6mmの針金を用いて接合した。

パネルをうまく重ねることができる部分では留めつけるような方法を、うまく重ねられない部分は縫い付けるような方法を目指し制作を行った。

### □スタディの過程

#### 【ステッチ】

布を縫合するイメージでパネルを寄せながら穴に針金を通す。離れたパネル同士でも寄せながら縫い合わせられる。

#### 【シューレース】

靴紐を連想し、直線とXの組み合わせた形。二列の穴が完全に重なると作成できない。

#### 【Xクリップ】

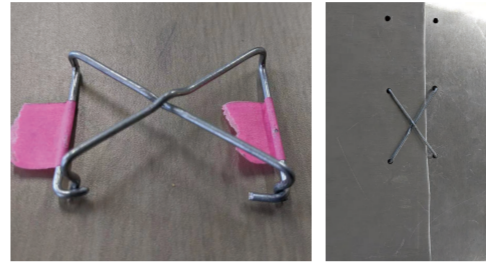
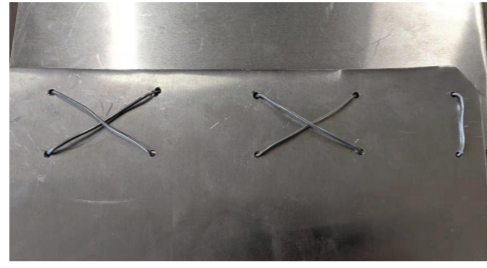
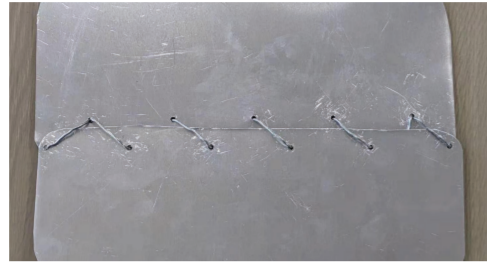
シューレースのX部分を参考に、取り外しが簡単にできるようなクリップ型を作成。引っ張りに強いが、圧縮と曲げに弱い。ため不採用。

#### 【シングルクリップ】

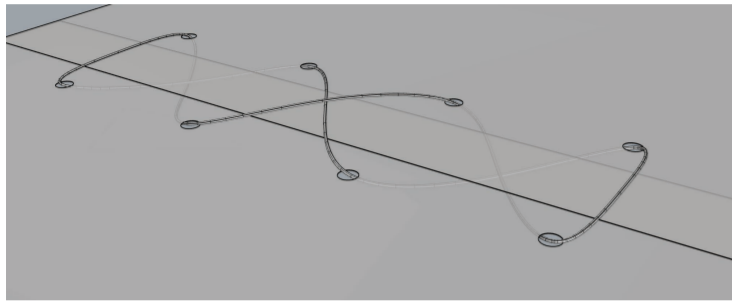
装着しやすさを追求して、片側から押すだけでパネル同士を固定できるシングルクリップ。

#### 【門\_カンヌキ】

門（カンヌキ）を連想し、作成したゲートと留め具でパネル同士を止める。装着しづらく不採用。

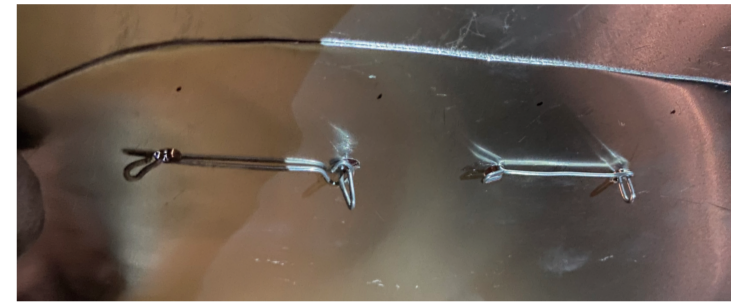
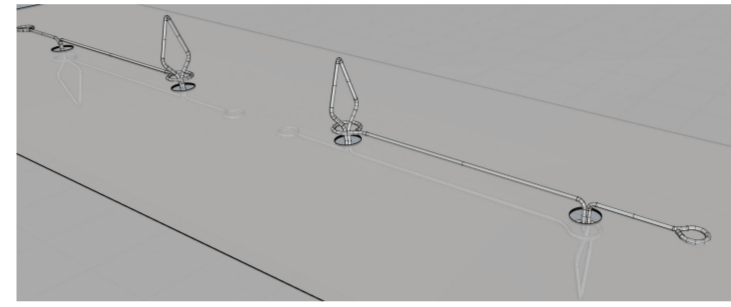


### □X型



〈ステッチ〉〈シューレース〉のスタディを経て完成したモデル。〈ステッチ〉のパネル同士が重ならない留め方である点、〈シューレース〉の裏表どちらにもXが現れる点を抽出してXモデルが完成した。パネル同士が重なりにくい際に用いた。パネル同士の距離によらない柔軟な接合方法。

### □クリップ



〈Xクリップ〉からクリップの概念を導入後、〈シングルクリップ〉〈門\_かんぬき〉を組み合わせ完成したモデル。パーツ同士を同じ形状にすることができ、クリップ形状であるので、止付けることが容易である。パネル同士が重なり合う部分に有効で、3枚が重なり合う部分などで使用。接合後外せるよう工夫したが、実際には抜けを防止するため先端を折り曲げた。

## ディンプル製作

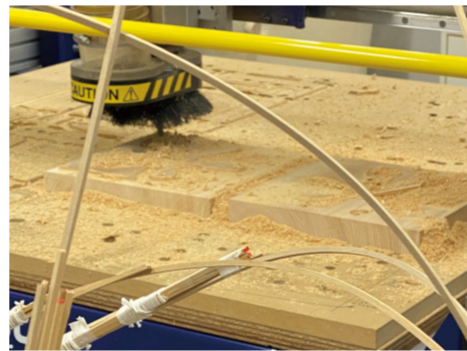
Dimple making

### □3軸切削機

Shopbot

Shopbot (3axis CNC) を用いて花柄のディンプルの型を製作した。

195mmと175mm四方の大小の型に凸凹をつくり、深さを凸側で10mm、凹で12mmとした。また凹側はそれぞれ10mm、8mmオフセットさせ、施工時に型がかみ合いやすくなるように工夫を施した。



型(凸)

型(凹)

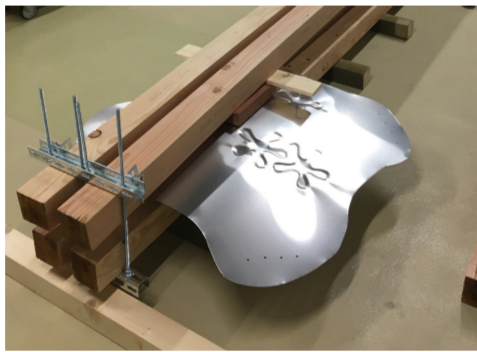
Shopbot 可動の様子

### □ディンプル装置

Dimple maker

てこの原理を利用して、人力でアルミパネルにディンプル加工を施した。

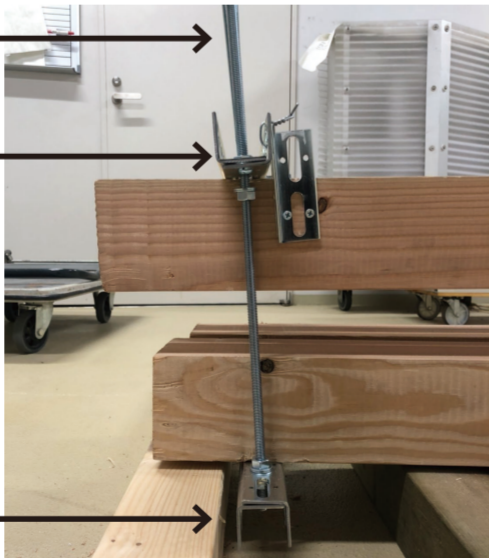
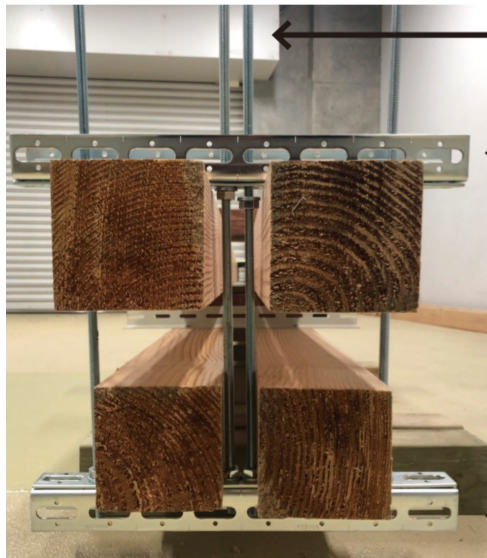
長さ4mの角材で上下からディンプルの型とアルミパネルを挟み込み、角材の上に乗ることで加力した。支点から型までを0.6m、荷重の重心を2.4mとし、合計500kgfで加力することでディンプルが2tfの力で押される。



支点部分(型合わせ時)

支点部分(設置完了時)

荷重時の様子



スペーサー詳細(正面)

スペーサー詳細(横面)

上側の角材にL字アングルで組み上げたスペーサーを固定し、型にあらかじめ目印となる線を引くことで、安定したディンプル加工が可能となった。装置を2台用いることで作業の効率化を図りながら、大小のディンプルをランダムに散りばめた。

指導教員：佐藤 淳 (東京大学准教授, 佐藤淳構造設計事務所)

協力：石井 ひろみ (佐藤淳研究室特任研究員, 佐藤淳構造設計事務所)

展示承認

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| 社会文化環境学専攻会議      | 2020年9月16日 承認済  |
| 環境学研究系専攻長会議      | 2020年9月17日 報告済  |
| 環境棟運用WG          | 2020年10月9日 承認済  |
| 新領域アメニティ室会議      | 2020年11月上旬 承認済  |
| 柏キャンパス・アメニティ室会議  | 2020年11月24日 承認済 |
| 柏キャンパス・共同学術経営委員会 | 2020年12月7日 報告済  |
| キャンパス計画室柏地区部会    | 2020年11月中旬 承認済  |
| キャンパス計画室会議       | 2020年11月27日 報告済 |

## 組み上げ

Final installation process



制作途中の様子



パネルのラベリング

ディンプルを施したパネルを運び、現地でモデル図を確認しながらパネルに曲率を与えた。パネルの接合部分をラベリングすることで施工しやすくなった。



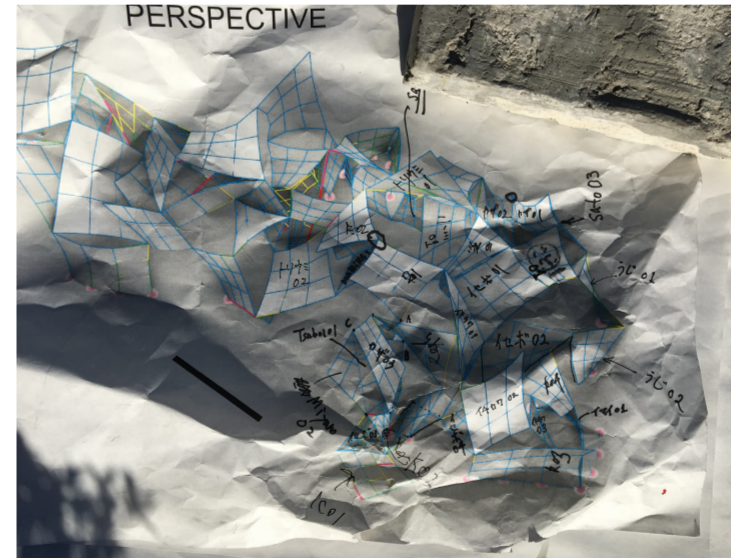
曲げ剛強の例(足部分)



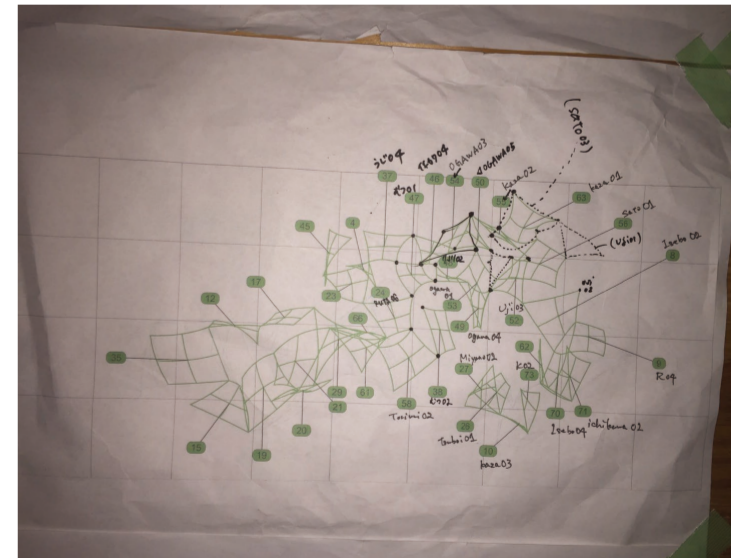
最終調整とタイロッド

パネルの接合部を曲げ剛強にした。接地点にはレンガを結わえることで固定した。

最後にタイロッドで設置点同士を結び、ペグからワイヤーを張り横荷重による移動を防いだ。



パネル配置図①



パネル配置図②

モデル図をもとに全体の位置関係を把握する。全体形状を3つのレイヤーに分けたモデル図や接続リストを用いることで、パネルの立体的な配置を把握しやすくなった。

また、製作したパネルには名前をつけることで、効率よく施工することができた。

緊急連絡先

佐藤 淳

東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学系社会文化環境学専攻, 准教授  
東京大学建築構成材デザイン工学 (AGC 旭硝子) 寄付講座, 特任准教授  
佐藤淳構造設計事務所  
携帯 : 090-2521-4804

E-mail : junsato@edu.k.u-tokyo.ac.jp

Jun Sato

Associate Professor, the University of Tokyo

Jun Sato Structural Engineers Co., Ltd.

本展示は監視カメラにより1日24時間監視しています。