建築構造デザインスタジオ 2021
Structual Design Studio 2020

東京大学 環境デザイン統合プログラム 2021
IEDP Integrated Environmental Design Program,the University of Tokyo, 2021
担当：木下、周

“ ディンプル構造 2021：花筏 ” － 壊れても死なない構造
Dimple Tectonics 2021 : 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 develope the morphogenetic design, based on **materials, geometry, dynamics, craftsmanship, site matters, energy consumption, spirit of engineering**.
We also have to learn and develope 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

「銀枯葉(ぎんこよう)」
枯葉…冬の季語、冬になって枯れてしまった葉のこと。
まだ枝に付いているもの落ちたものなどさまざま。

冬の枯葉がひらひらと舞い、積み重なる様子をモチーフとし、ナチュラルな形態のアルミパネルに花模様を施して制作を行いました。

枯葉

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、ひらひらと舞う枯葉の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。

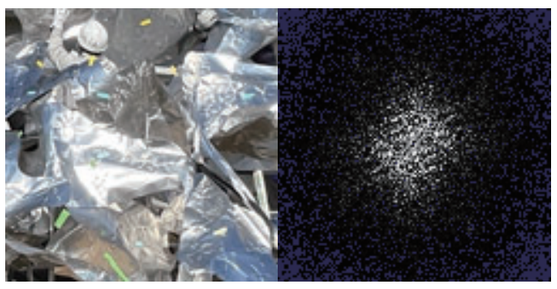
・様々な形状のアルミパネルを組み合わせることで、ランダム性を持たせ、より自然な風貌に仕立てた。

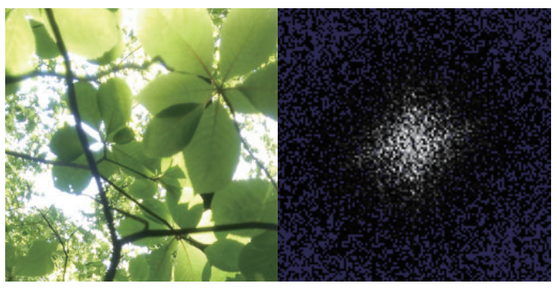
・花模様のディンプルをアルミ板にかたどることで、無機質なアルミに　有機的な表情を持たせた。

・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。

・四本の足を持ち、中央部に人が入り込むことが出来る空間を設ける形状にしたことで、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

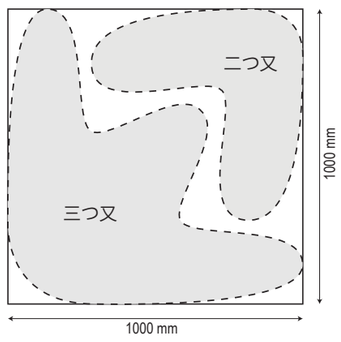

○○の風景とスペクトル


木漏れ日の風景とスペクトル

スタディ
Study

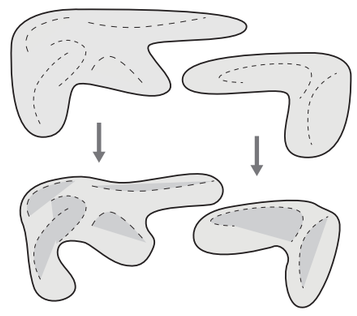
接合部にホッチキスを用いて1/10スケールで紙を主な素材としてパネルの形状、強度、配置の部分スタディを行いました。その結果を参考に全体形状のスタディを行いました。

Shape



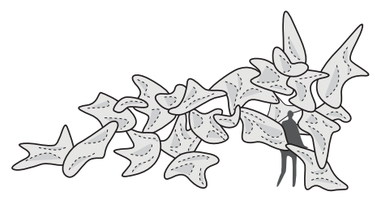
アルミパネルの形状は他のパネルへつながる方向へ手を伸ばしていくアメーバのような形状を意識しました。また一つのパネルから形状の異なる大小二つのパネルを切りだすことでパネルに多様性がうまれ、よりナチュラルな構造へ近づける事につながりました。

Strength

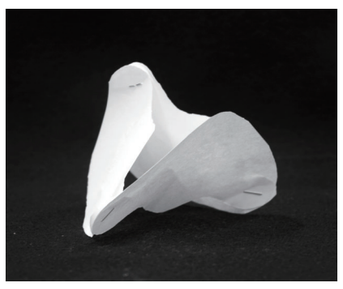


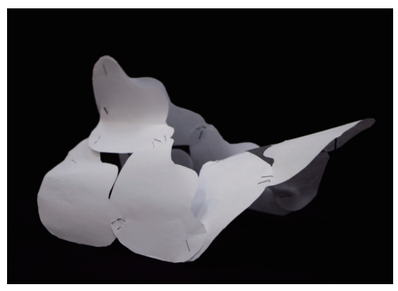
切りだしたパネルに花柄の dimple を施し、さらに葉脈のように複雑かつ緩やかに曲率を与える事で強くしました。三枚のパネルを組み合わせてつなげることで特定方向への力に強いユニットが出来ることも確認しました。

Layout



全体形状の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。また中央部に空間を作り人が入り中から構築物を眺めることが出来るようにしました。





１：三枚組（基本構造）

２：九枚組（巨大化、内部二又パネルでの補強案）

３：三枚組の配置

４：全体形状（ポーラス、高さ、内部空間）

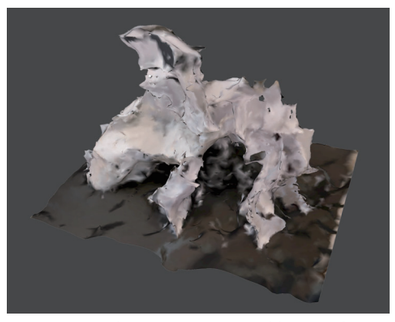
建築構造デザインスタジオ 2020
Structual Design Studio 2020

東京大学 環境デザイン統合プログラム 2020
IEDP Integrated Environmental Design Program,the University of Tokyo, 2020
担当：中村、Martin、松澤、山﨑

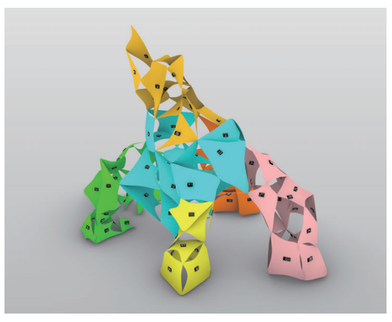
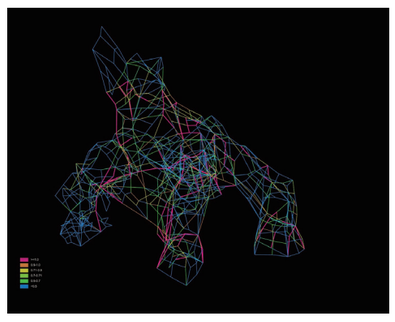
全体の流れ
Overall FIlow

模型による形態の生成

▶


フォトグラメトリを使いデータ化する

▶



モデル化と構造解析を繰り返す

▶

ARを用い、スマホ、タブレットを見ながら施工する

構造物諸元・構造解析概要
General

寸法・重量 Dimension & weight
・幅 Width: 4.3m
・長さ Length: 5.4m
・高さ Height: 3.7m
・重量 Weight: 48kg

材料 Material
・Aluminium(thickness : 0.4mm, dencity : 2.68g/㎤)
・Stainless wire(diameter : 2.0mm)

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

荷重ケース

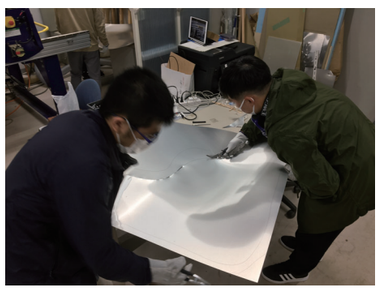
長期荷重 Long term load	G
短期荷重 Short term load	G+W

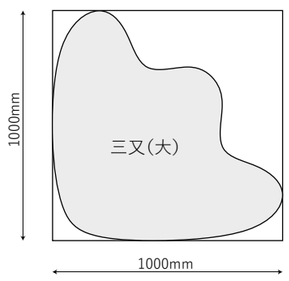
パネルのスタディ
panel

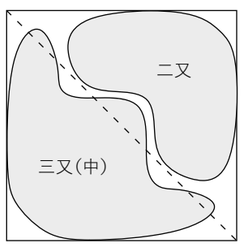
パネルの形状や得られる剛性・強度ををスタディしました。

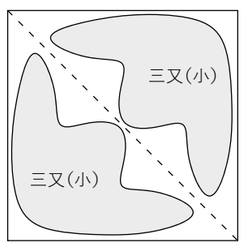
パネルの形状/曲げの検討

実際に用いる厚さ0.4mmのアルミ板からパネルを切り出し、パネルの形状や曲げの配置、与える曲率の大きさ、方向をスタディしました。主な構造材として使う三又パネル三種、構造補強を目的とした二又パネルを作成しました。曲げは山折りと谷折りを絡ませて配置することで強度を向上させました。

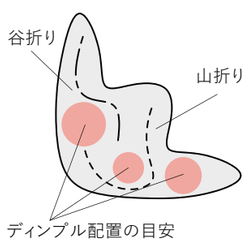








最終パネル形状



曲げ形状/配置

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0.4mm の三又のアルミ板にディンプルを施し、曲率を与え、座屈試験を行いました。ディンプルと曲率を施したパネルは平板（座屈荷重 300g）に比べて、約 50 倍の座屈強度の向上を見込めることが分かりました。

試験体	座屈荷重
アルミ平板	0.3kgf
ディンプル＋曲率	16.4kgf(一回目)
	15.9kgf(二回目)
	16.7kgf(三回目)

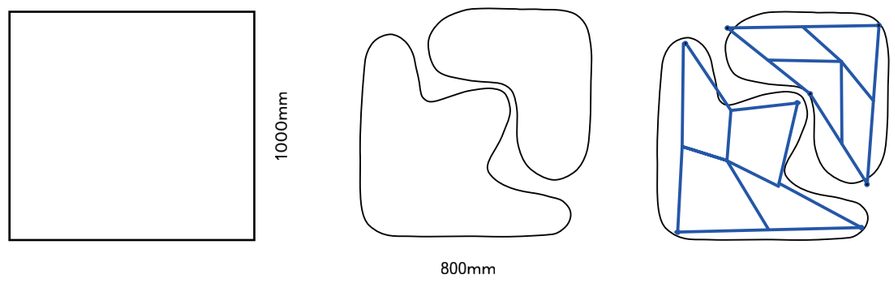
→ 平均して 54.4 倍、座屈強度が向上する
→ 曲げ剛性を 50 倍にして換算する

実験の様子

構造計算
Calculation

モデル化手法

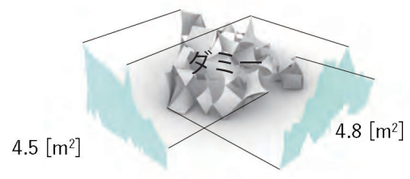
アルミパネルの加工は1枚1mの正方形パネルから三つ股と二股の形状を切り出しdimpleを施した後に曲げて曲率を与える。
この形状を2× 2 のグリッドモデルとしパネルモデルを作成した。部材断面は長方形断面と置換して解析を行っている。



風荷重の設定

風速	20[m/sec]
風圧	35[kgf/ ㎡]
抗力係数	1.0
受圧面積	7.84[㎡]×0.8(開口率 20%)×1.0=6.28[㎡]
風荷重	6.28[㎡]×35[kgf/ ㎡]=219.8[kgf]
自重	2.68×0.04[㎝]×600000[㎤]×100[pcs]=64[kgf]
ベースシア	219.8/64=3.43 wgt48kgf なら 4.6

wgt ファイルによると 48kgf です



安全率計算

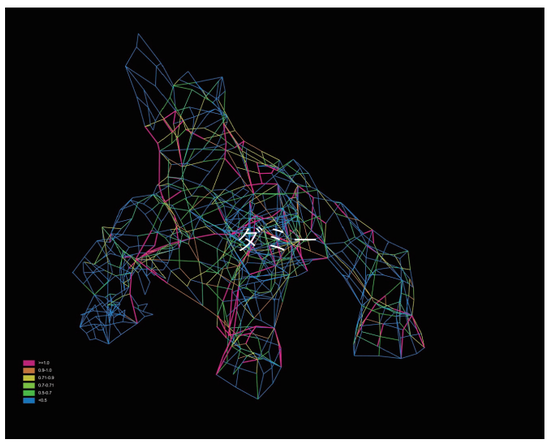
モデルの1要素の断面を厚さ0.4mm、幅200mmの長方形断面とし、曲げ剛性は
弱軸　EI=0.0001067×720=0.0746tf・cm
強軸　EI=26.67×720=19202.4tf・cm

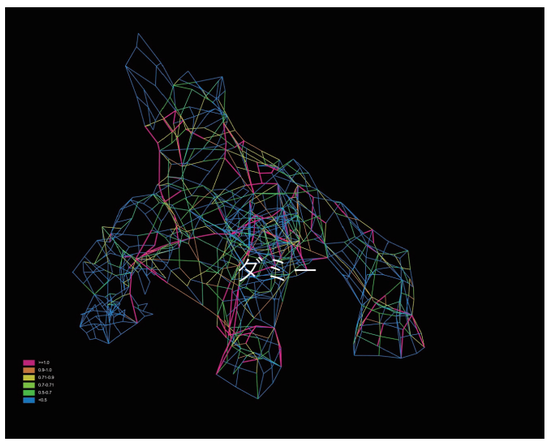
・ディンプルと曲率の効果
50倍の強度の増加を弱軸側のみで見込むと、モデル1要素の曲げ剛性は
弱軸　EI=3.73ｔｆ・cm

鉄の厚さH幅Bのプレートに置換する際、曲げ剛性ＥＩを合わせると
弱軸　2100×（B×H³）/１２=3.73
強軸　2100×（H×B³）/１２=19202.4
H=0.13cm
B=9.43cm
以上より、解析モデルの線材は厚さ1.3mm幅94.3mmのプレートとしてモデル化しました。

構造解析
Structural Analysis

節点を動かす操作、パネルを追加・削除する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。





プレートによる解析でベースシアを減らしたので、赤が現時点で 5 本です。

建築構造デザインスタジオ 2021
Structural Design Studio 2021

東京大学 環境デザイン統合プログラム 2021
IEDP Integrated Environmental Design Program,the University of Tokyo, 2021
担当：猿田、松井、水野、森永

Fastener

Development prosess

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直径4mm 穴を作成し、2mm の針金で作製したファスナーで接合した。

片手で簡単に止められるようなファスナーを考案した。また、大量に生産するための治具を３Ｄプリンターを用いて作製した。

スタディの過程

【絞り付き閂 _ カンヌキ】
２つ穴をあけ、閂のように針金を通し、中央の丸い部分絞ることで固定する。２つの穴を同時に通すことが困難なため不採用。

【スプリング】
ばねの弾性によりパネルを固定。一つの穴同士で固定できるため施工性がよい。この案を元に更に発展。

【スプリング＋引張】
スプリングに加えて、最後に引っ張ることで抜けにくくした形。解体時に抜けにくいため、不採用。

【スプリング】

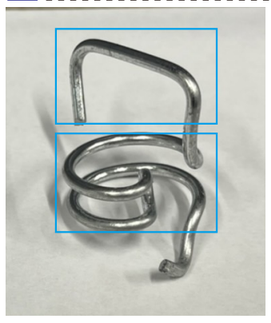
素手でも施工ができるようにするため、取っ手を作製。

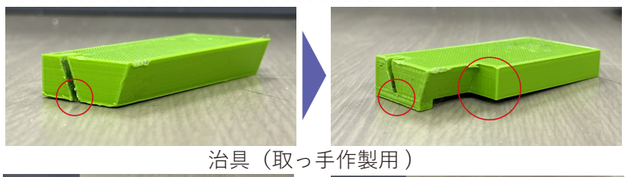
しっぽが穴に入りやすい、かつ、安全になるように改良。

取り付けた時、途中で止まることのできる形にした。

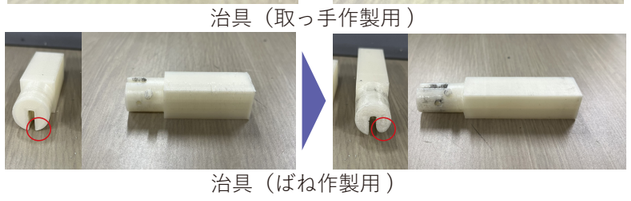
治具の開発

Jig development process





治具（取っ手作製用）

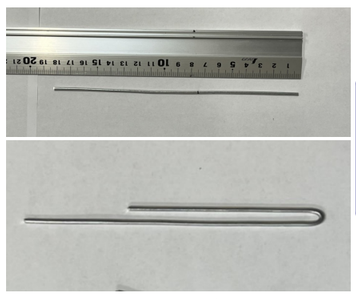


治具（ばね作製用）

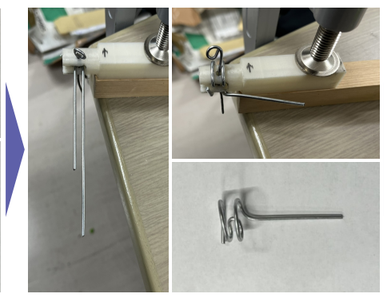
治具の作製により、製作時間を大幅に短縮することができ、合計 700 個以上生産した。

製作過程

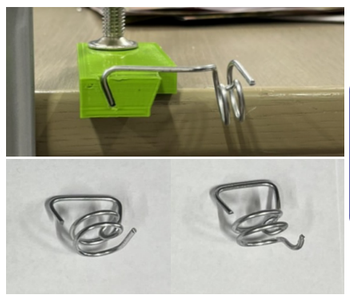
Production process



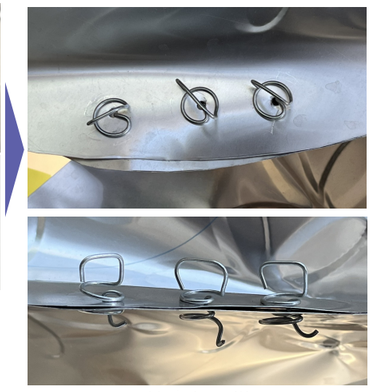
φ 2mm の針金を 18cm にカットし、端から 7.5mm の位置で折り曲げる。



巻きつけることによって、中央のばね部分を作製。



取っ手の部分は治具で、しっぽの部分はペンチで曲げて作製。



接合部の様子

ディンプル製作

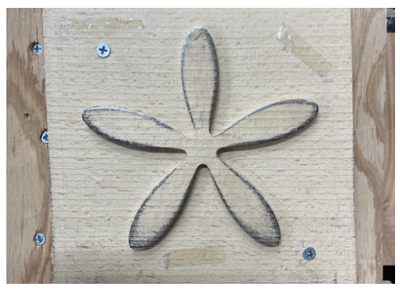
Dimple making

3 軸切削機

Shopbot

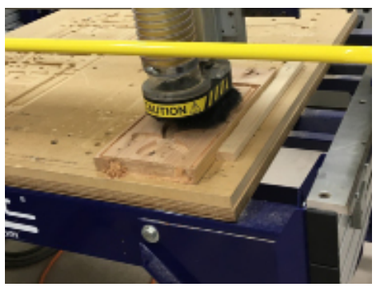
Shopbot（3axis CNC）を用いて花柄のディンプルの型を製作した。

200mm 四方の型に凸凹をつくり、深さを凸側で 7mm、凹で 9mm とした。また凹側は 5mm オフセットさせフィレットを施し、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

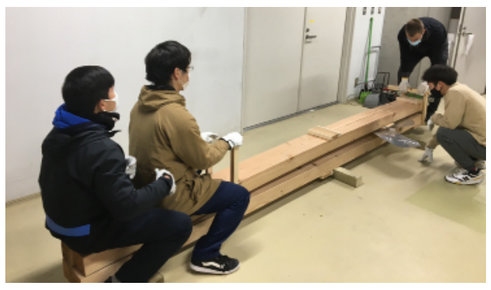
Dimple maker

てこの原理を利用し、人力でアルミパネルにディンプル加工を施した。

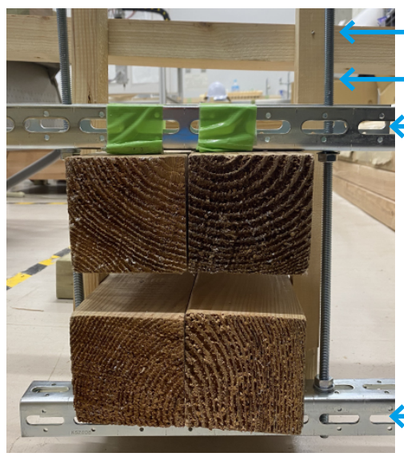
長さ 4m の角材で上下からディンプルの型とアルミパネルを挟み込み、角材の上に乗ることで加力した。支点から型までを 0.6m、荷重の重心を 2.4m とし、合計 150kgf で加力することでディンプルが 600kgf の力で押される。また、6 回程バウンドさせることで、深く型を付けた。

支点部分（型合わせ時）

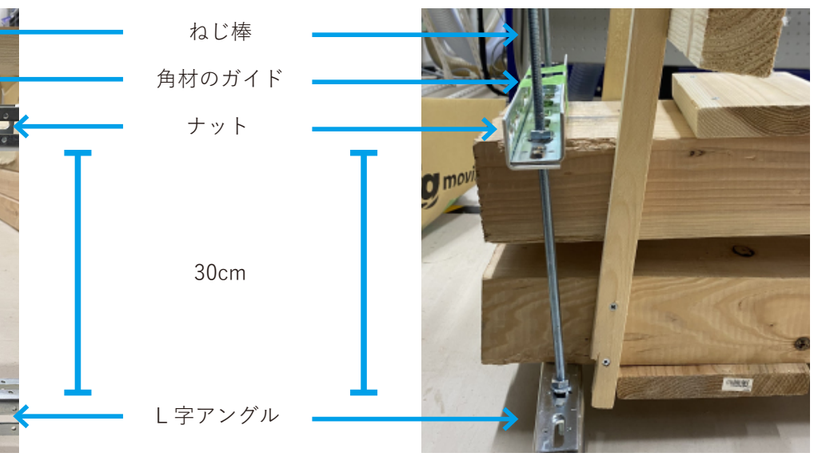
支点部分（設置完了時）



荷重時の様子



スペーサー詳細（正面）



スペーサー詳細（横面）

角材に L 字アングルで組み上げたスペーサを固定し、型にあらかじめ目印となる線を引き、前後左右のずれを小さくすることで、安定したディンプル加工が可能となった。また、下側の角材にガイドとなる角材を付けることで、左右のずれを生じにくくし、作業の効率化を図った。

組み上げ

Final installation process

制作途中の様子

接合部の様子

ディンプルを施したパネルを現場に運び、3D モデルを iPad で確認しながら、適切なサイズ（大・中・小）と形（二又・三又）、のパネルに曲率を与え、接合した。

最上部の接合

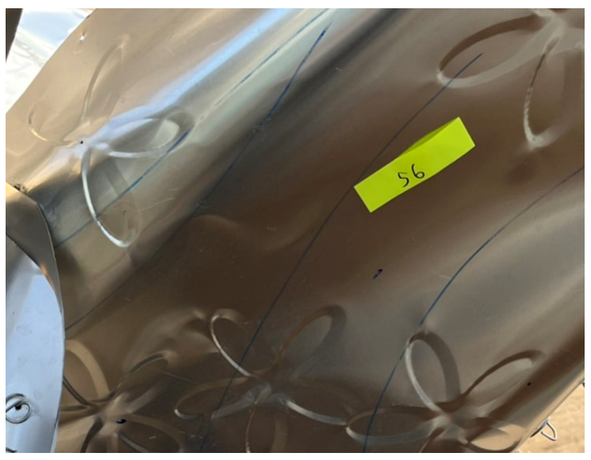
最上部の作成

また、予めパネルの接合部に穴をあけ、現場での接合の手間の軽減を図った。

最上部には先に組み立てたてた 2 層分をリフトアップすることで、全体で高さ 3.7m を実現した。

接地点にはレンガを結わえることで固定した。

3D モデル



パネルのラベリング

3D モデルの全体形状を５つのレイヤーに分け、各パネルを色･番号でラベリングすることで、現場での施工を効率良く行うことができた。

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

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研究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。