

“羽衣構造 2019：紅掛空” – 壊れても死なない構造

Veiled Tectonics 2019 : Lilac Sky – preventing death in the event of collapse

世界最薄+最軽量の「天女の羽衣 Super Organza：天池合織株式会社製」を「カーボンロッド」で突っ張ることにより安定する架構です。軽量で柔らかく、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、2019年度は「紅掛空」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。「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。

半透明な薄膜の構造は、折り重なることにより環境に対する「フィルター」としての役割を持ちます。

5 mm のカーボンロッドの座屈を拘束する骨組形状、多面体へのモデル化、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 first blow in early spring called “Haru Ichi-ban”, supposing the wind speed 20 m/sec.

Transparent / translucent mesh structures will work not only against loads but also work as Filter for environmental matters.

Through assemblage of 5 mm carbon rods to manipulate the buckling phenomenon, development of polyhedral wireframe model for structural analysis, manual form optimization, 2D visual spectrum analysis, the shape was developed.

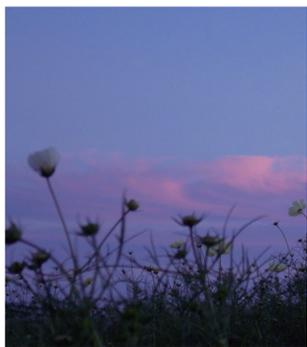
安全対策として、侵入防護柵：ポール、鎖、立入禁止看板・強風対策：スクリューペグ、針金、漁網（強風時）を行っており、本展示は監視カメラにより1日24時間監視しています。

コンセプト

Concept

「紅掛空色（べにかけそらいろ）」…よく晴れた昼と夜の境目に見える、かすかに紅の混じった淡い青い空の色。

この紅掛空を色覚イメージとしつつ、氷筍を思い起こすような鋭い形や、星雲のように幻想的な色の重なりなど、様々なモチーフから着想して制作を行いました。



紅掛空

<https://twitter.com/543life/status/1185533633270034432/photo/2>



氷筍(ヒョウジュン)

[https://www.tif.ne.jp/jp/event/event\\_disp.php?id=5226](https://www.tif.ne.jp/jp/event/event_disp.php?id=5226)



わし星雲「NGC 6611」

[https://soae.info/030201/2017\\_07\\_17\\_wash.html](https://soae.info/030201/2017_07_17_wash.html)



羽衣構造

広大な敷地と豊かな自然環境を持つ柏キャンパスで、生き物のようにナチュラルでありながら、空のように雄大なスケールを体感できるよう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。

- 軽量かつ高強度なカーボンロッドを圧縮材、「天女の羽衣」を引張材とした膜テンセグリティ構造を採用することで、透明感を持ちつつ、壊れるときは少しずつ「ムニュッ」と壊れる「壊れても死なない構造」となる
- 曲げたカーボンで内側から布を突っ張り、布の張力にカーボンの弾性力を負担させることで、ペンディングアクティブを活かした袋状の安定した構造体となる
- 空色の布と、青色と橙色の2色織りの布の2種類を組み合わせることで、各所で異なる布の重なりによって空のように移ろうような表情を持つ
- 全体をアーチ構造にすることで高さ方向にボリュームが生まれ、子供が下に入ることができる構造形態となる
- 布の継ぎ合わせ方、ロッドの入れ方を工夫することでポーラスや角など多様な形状を有する
- 外側だった布が不意に構築物の内側部分に入っていくような視覚的に不思議な部分を持つ

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）、張 耕嘉（佐藤淳研究室学術支援専門職員、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 2019年9月18日 承認済  
環境学研究系専攻会議 2019年9月19日 報告済  
環境横運用WG 2019年10月4日 承認済  
新領域アミニティ室会議 2019年10月9日 承認済  
柏キャンパス・アミニティ室会議 2019年11月18日 承認済  
柏キャンパス・共同学術経営委員会 2019年12月2日 報告済  
キャンパス計画室柏地区部会 2019年12月19日 承認済  
キャンパス計画室会議 2019年12月20日 報告済

緊急連絡先  
佐藤 淳

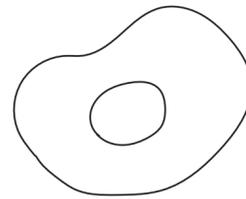
東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻、准教授  
東京大学建築構成材デザイン工学 (AGC 旭硝子) 寄付講座、特任准教授  
佐藤淳構造設計事務所  
携帯：090-2521-4804  
E-mail: junsato@edu.k.u-tokyo.ac.jp  
Jun Sato  
Associate Professor, the University of Tokyo  
Jun Sato Structural Engineers Co., Ltd.

スタディ

Study

オーガージーとヒノキの1mm角棒を用いて1/5スケールで「ポーラス」、「ブランチ」、「パターン」の部分スタディを行いました。部分スタディの後、全体形状を決め、1/5全体模型を作成しました。全体形状では部分スタディを繰り返した結果、「パターン」のロッドを少なくすることは踏まえつつ、「ポーラス」と「ブランチ」を再現することにしました。また、昨年は独立して閉じた3つのバッグを噛み合わせることで全体形を作りましたが今年は難易度を上げ、複数の布を継ぎ合わせて1つのバッグにしつつ高さ5mに到達する構築物にすることを目標としました。

Porous

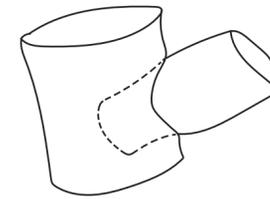


Porous

複雑な全体形状を目指す手法として、穴のある形状を検討しました。布幅が狭くなっている部分で形状を膨らませるのが難しいことを発見したので、十分な布を用いて形状を作ることを意識しました。本番では人が覗いたり入ったりできるような大きなドーナツ状の穴を2つ、小さなトンネル状の穴を1つ制作しました。



Branch



Branch

布の縫い方について、三又や四又にすることでできる形状を模索しました。その結果、1つの袋の中にもう1つの袋が入り込んだような形状を作れることが分かったので、外と中の袋を同時に膨らませることを検討しました。本番では突っ張らずに風にそよがせた方がきれいに見えるとの理由で中の袋を突っ張ることはしませんでした。



Pattern



Pattern

できるだけ少ないカーボンロッドの本数で形が安定するようなロッドの入れ方、見た目の美しいロッドの配置を、ロッドの代わりにヒノキの角棒を用いて検討しました。角の形状を保持できるようなロッドの入れ方やロッドの端点がずれにくいような布の形状、ロッドの本数が少なくなるような頂点の配置の仕方が分かりました。



全体模型 1/5 スケール

## 概要

Technical information

### 規模

Scale  
大きさ Dimensions 長さ 8 m x 幅 4 m x 高さ 5 m 重量 Weight 本体 150 kgf + 基礎用オモリ 200 kgf (レンガ)

### 天女の羽衣

Tenny no Hagoromo : Super Organza  
AG00Z1N: 5gf / m<sup>2</sup>, 空色 (No.12) AG771N: 10gf / m<sup>2</sup>, 2 色染め, 青 + 橙 (No.18-20)

### 骨組

Framing  
カーボンロッド Carbon rod 5 mm

### 端部緩衝玉

Cushioning ball  
スーパーボール: クリア Rubber Ball Clear φ 26 mm  
固定具: スチール針金 Steel wire 1.6 mm



### 基礎

Foundation  
オモリ用レンガ Bricks

### 仮設土台

Temporary protective construction base  
合板 Wooden board 910 mm x 1820 mm x 12 mm

### 設計荷重

Design load  
重力 Gravity : 1G = 980 cm/s<sup>2</sup>  
風速 Wind speed : 38 knots = 20 m/s



## 材料実験

Material experiment

### 使用材料

Components



#### カーボンロッド

素材: カーボン  
径: φ5mm  
特長: 軽量で強靱、弾性率が高い



#### 天女の羽衣

素材: ポリエステル100%  
質量: 5 gf/m<sup>2</sup>  
特徴: 世界最軽量で光沢と透明感があり、柔らかい

### 座屈試験

Buckling test

ある長さのカーボンロッドに対して両端から圧縮力を加えていき、座屈が生じるときの圧縮力を測定する。  
座屈荷重Pcrは以下の式によって与えられる。

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) / L_k^2$$

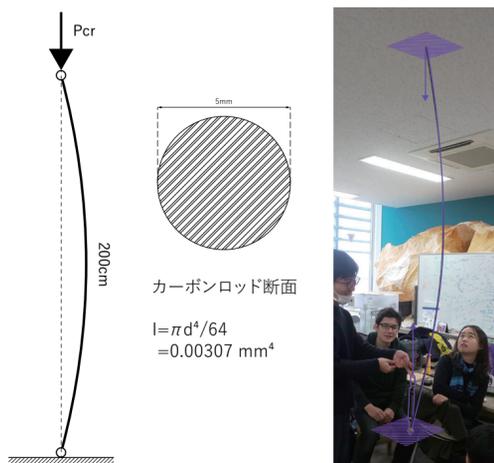
Pcr: 座屈荷重(tf) E: ヤング率(tf/cm<sup>2</sup>)  
I: 断面二次モーメント(cm<sup>4</sup>) Lk: 座屈長さ(cm)  
数種類の長さに対する座屈荷重を測定し、上式からヤング率Eを求める。

$$P_{cr} = 0.9 \text{ tf}$$

$$I = 0.00307 \text{ cm}^4$$

$$L_k = 200 \text{ cm}$$

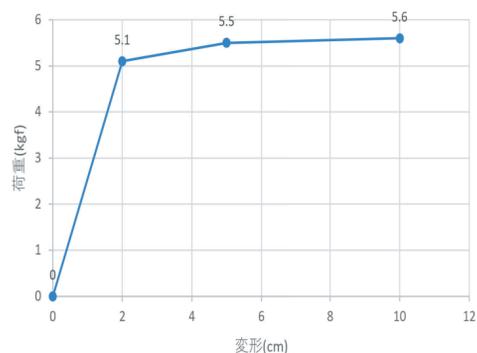
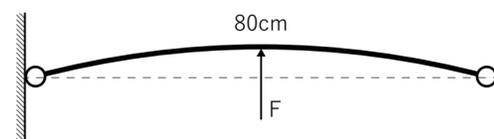
以上より、  
 $E = 1192 \text{ tf/cm}^2$



### 3点曲げ試験

3-points bending test

長さ80cmのカーボンロッドを両端ピン支持で3点曲げ試験を行った。  
荷重が5.6 kgfで曲げ破壊した。



## 形態解析

Morphological analysis

### モデルの作成

Creation of the model

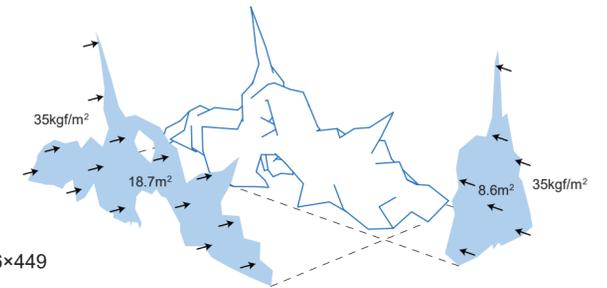
応力解析をするため、目標形状を線材に置き換えて3Dモデルを作成する。1/5の模型を3Dスキャンして、全体形をポリゴンに近似して線材の解析モデルを作成する。



### 風荷重の設定

Wind load setting

柏の風速 20 (m/s)  
風圧 35 (kgf/m<sup>2</sup>)  
抗力係数 0.4  
 $35 \times 0.4 = 14.0 \text{ (kgf/m}^2\text{)}$   
 $14.0 \times 9.8 \approx 140 \text{ (N/m}^2\text{)}$   
受圧面積 18.7(m<sup>2</sup>)  
風荷重  $140 \times 18.7 = 2618 \text{ (N)}$   
部材長さ 449m  
自重  $1.5 \times 10^6 \times 9.8 \times 0.00000016 \times 449 = 107 \text{ (N)}$   
BASE  $2618 / 107 = 24.46 \rightarrow 25.0$   
Hogan にベースシア係数として入力



### 構造解析

Structure analysis

各部材の安全率を求めるために、その基準強度を考える。  
座屈実験からロッドのカーボンのヤング率は

$$E = 1200 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

構築物の座屈長さを80cmと設定すると、座屈荷重は  
 $P_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) / L_k^2 = 5.6 \text{ (kgf)}$

解析モデルの各部材はカーボンロッド6本分であるとする。  
そこで、これと同等の性能を持つ丸型鋼管の断面を求めて解析モデルに入力することを考える。  
カーボンロッド 6本分の座屈荷重を風圧時の短期許容荷重Nasとして

$$N_{as} = 5.6 \times 6 = 33.6 \text{ (kgf)}$$

長期許容荷重Nalは

$$N_{al} = N_{as} / 1.5 = 33.6 / 1.5 = 22.4 \text{ (kgf)}$$

鋼構造基準より座屈荷重Pcrを求めると、

$$P_{cr} = 2.17 \times N_{al} = 48.6 \text{ (kgf)}$$

この座屈荷重から、部材の丸断面直径を求めると

$$P_{cr} = (\pi \times E \times I) / L_k$$

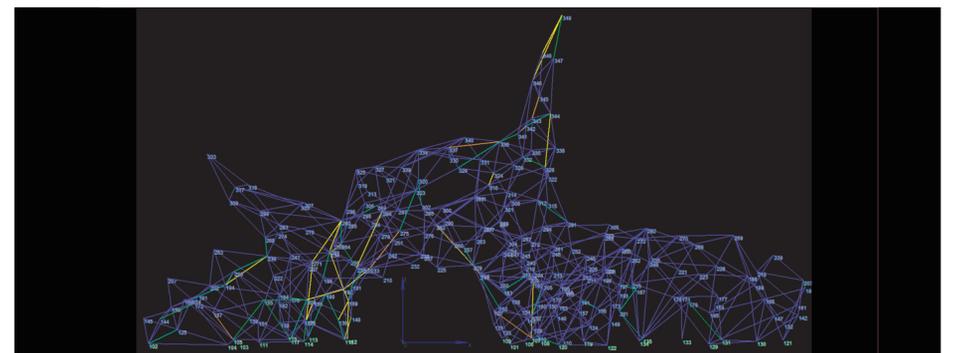
$$I = \pi \times D^4 / 64$$

$$D = 0.7436 \text{ (cm)}$$

### 形状最適化

Shape optimization

節点を動かす操作によって全体形状を最適化する。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う。



作業工程

Work and Installation Process

後期タームにおける全体のスケジュール。全体作業時間は150時間以上に及んだ。  
まず1mm角のヒノキ棒と布を用いた試作を繰り返し膜がびんと張る形を見つけた。次にそれらの形の組み合わせから成る全体形状を5分の1模型を通して考案した。そしてそれを5倍に拡大しモックアップ用の布を切り出し、同時に構造解析を通して形状の最適化を行った。最後にその最適形状になるよう布を縫い合わせロッドを入れてモックアップを組み立て、設計アイデアの実現可能性と構造性能をテストした。プロセス全体が最初から最後まで革新的であり、問題はその過程において解決されている。以下にその詳細を述べる。

作業タイムテーブル

Work time table



型紙

Sewing Pattern

5分の1模型を構成するそれぞれの布の形状を紙にうつしとり、それをさらに1500mm幅のロール紙に5倍拡大したものを転写した。  
これを型紙とし、天女の羽衣を裁断した。組み上げ後外側となる部分にマスキングテープを貼り、そこに各頂点の番号を書き込むことにより、それぞれの布がどのように接続しているかを確認しやすくなり、のちの縫製作業を容易にすることができる。

縫製

Sewing of the membrane

使うパーツが大変多いため、部材と端点ごとの番号の対応表を作成することで施工のための情報を共有できるようにした。  
全てを縫い合わせてしまうと、後述のロッドが入れにくくなってしまい逆にロッドを入れないと膨らまず、全体の形状が作りにくくなってしまいうため、先にミシン縫いによって大きなパーツを作成し、ロッドを挿入する作業とハンドミシンや手縫いによる縫製作業を並行しながら全体形状を作っていた。

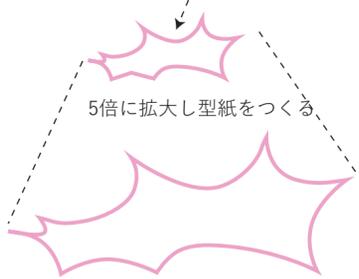
カーボンロッド

Carbon rod

カーボンロッドと天女の羽衣の接合部は、無色透明のスーパーボールとファスナー（鉄針金）を用いる。  
スーパーボールは、カーボンにより天女の羽衣が傷むのを防ぐ役割を持つ。直径は26mmとし、電動ドリルで4.8mmの穴をあけカーボンを差し込む。スーパーボールの穴あけ作業に際して、3Dプリンターで治具を製作し、作業の効率化を図った。  
ファスナーは、スーパーボールと天女の羽衣を固定する役割を持つ。鉄針金を曲げて作るが、写真のように加工することで強固に固定可能でありながら、取り外ししやすい機構となっている。



模型の型紙  
Cutting sewing pattern according to the 1:5 scale physical model



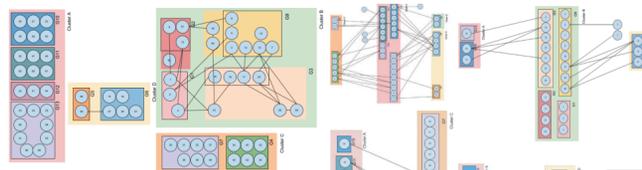
5倍に拡大し型紙をつくる



Transferring the 1:5 scaled cutting pattern to the cloth roll, using grid for enlargement



Patterns on graph paper



Pieces of cloth and their linking hierarchy: Pattern > Group > Cluster



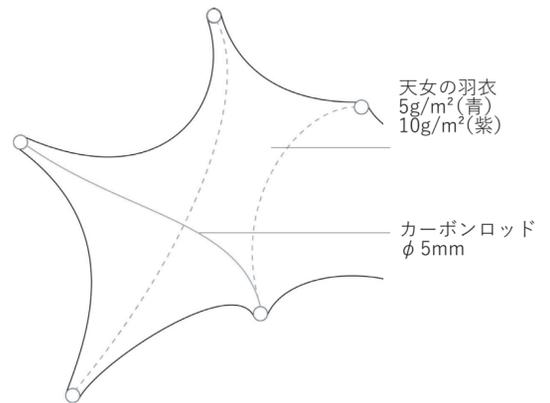
Pieces of cloth forming a local group



Sewing process

カーボンロッドを組み込む

Insertion of carbon rods

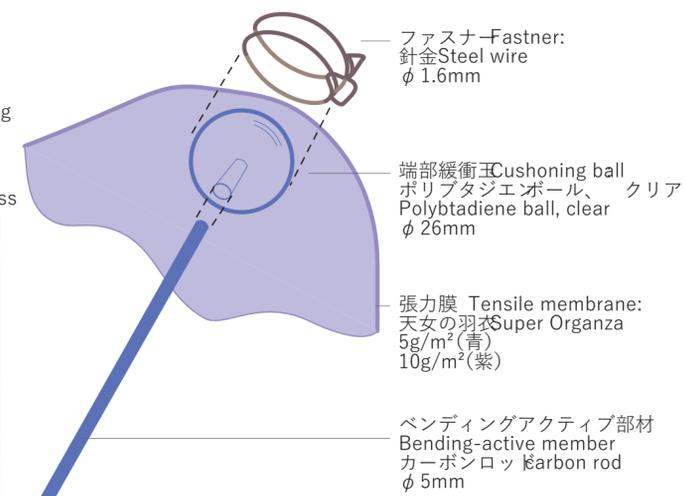


天女の羽衣  
5g/m<sup>2</sup>(青)  
10g/m<sup>2</sup>(紫)

カーボンロッド  
φ 5mm

天女の羽衣とロッドのつながる方法

Connection organza to rod



ファスナー-Fastener:  
針金Steel wire  
φ 1.6mm

端部緩衝玉Cushoning ball  
ポリブタジエンボール、クリア  
Polybutadiene ball, clear  
φ 26mm

張力膜 Tensile membrane:  
天女の羽衣Super Organza  
5g/m<sup>2</sup>(青)  
10g/m<sup>2</sup>(紫)

ベンディングアクティブ部材  
Bending-active member  
カーボンロッドCarbon rod  
φ 5mm

組み合わせ

Final installation process

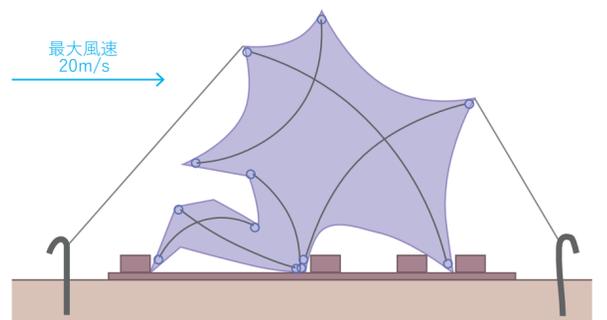


布同士に隙間を残し、カーボンロッドを挿入することで「天女の羽衣」を繰り返すことにより、構造体を徐々に立ててゆく。



「天女の羽衣」の極薄膜にロッドを挿入するにあたり、布が張られることで張力が均等に分散されるような端部を選んでいく必要がある。張力によって布が破けてしまわないよう、うまく応力を分散できるように端部をずらす。

地面のベグからワイヤーを張り、また接地点で固定することにより、横荷重による移動を防ぐ。



最大風速  
20m/s