

# 建築構造デザインスタジオ 2018 Structural Design Studio 2018

東京大学 環境デザイン統合プログラム 2018  
IEDP Integrated Environmental Design Program, the University of Tokyo, 2018

担当：小島・大霜・宮本・藤本・伊藤

## “羽衣構造 2018：アザミ型” – 壊れても死なない構造 Veiled Tectonics 2018 : Thistle Leaves - preventing death in the event of collapse

世界最薄+最軽量の「天女の羽衣 Super Organza」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、2018年度は「アザミの葉」のような形状が生まれました。

## 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。

4 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 4 mm carbon rods to manipulate the buckling phenomenon, development of polyhedral wireframe model for structural analysis, manual form

## 規模 Scale

大きさ Dimension : 長さ 8 m × 幅 5 m × 高さ 4 m

重量 Weight : 本体 150 kgf + 基礎用オモリ 200 kgf (レンガ)

## 天女の羽衣 Super Organza

AG00Z1N : 5gf / m2, 赤 (No.15)

AG00Z1N : 5gf / m2, ピンク (No.3)

AG771N : 10gf / m2, 2色染め, 茶+白 (No.20-1)

## 端部緩衝玉 Cushoning Ball

スーパーボール : ピンク色 Rubber Ball Pink

固定具 : スチール針金 1mm

## 骨組 Framing

カーボンロッド Carbon Rod φ4mm

## 基礎 Foundation

オモリ用レンガ Bricks

## 安全対策

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) 風速 Wind speed : 38 knots = 20 m/sec

## 設計荷重 Concerning Load

重力 Gravity : 1G = 980 cm/sec<sup>2</sup>

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 : 古市 渉平 (佐藤淳研究室学術支援専門職員, 佐藤淳構造設計事務所所属),

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所属)

## 展示承認

社会文化環境学専攻会議	2018年9月19日 承認済
環境学研究系専攻長会議	2018年9月20日 報告済
環境棟運用WG	2018年10月4日 承認済
新領域アミニティ室会議	2018年10月10日 承認済
柏キャンパス・アミニティ室会議	2018年11月26日 承認済
柏キャンパス・共同学術経営委員会	2018年12月10日 報告済
キャンパス計画室柏地区部会	2018年12月19日 承認済
キャンパス計画室会議	2018年12月21日 報告済

## 緊急連絡

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・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

# 材料実験・形態解析

## 1. 材料実験

### 1.1 使用材料

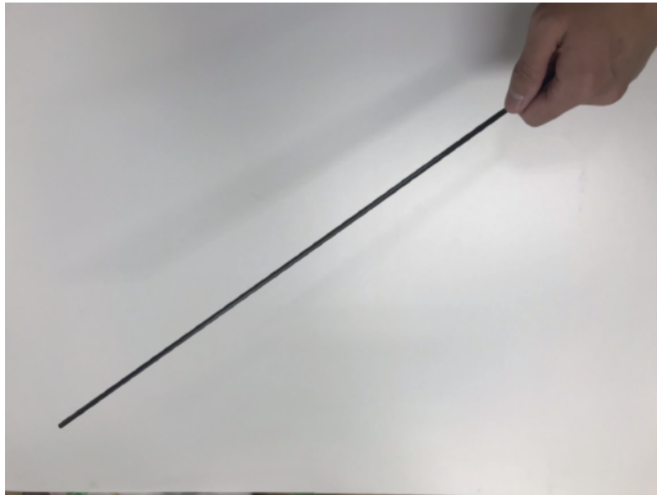


写真. カーボンロッド

カーボンロッド  
素材 : カーボン  
径 : φ4mm  
特長 : 軽量で強靱、弾性率が高い

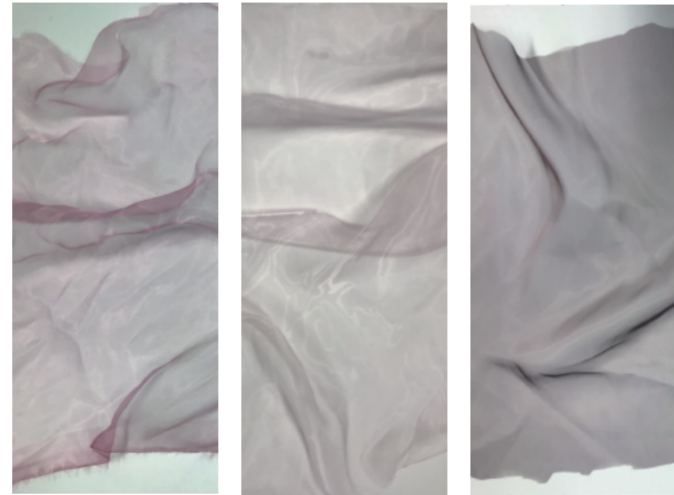


写真. 天女の羽衣 (左から Red, Pink, Brown)

天女の羽衣  
素材 : ポリエステル 100%  
質量 : 5gf/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  
色 : Red (60m)、Pink (40m)、Brown (40m)

### 1.2 座屈試験

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  $P_{cr}$  は以下の式で与えられる。

$$P_{cr} = \pi^2 * E * I / L_k^2 \quad (E: \text{ヤング率}, I: \text{断面二次モーメント}, L_k: \text{座屈長さ})$$

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。

$$E = 1215 \text{ tf/cm}^2$$

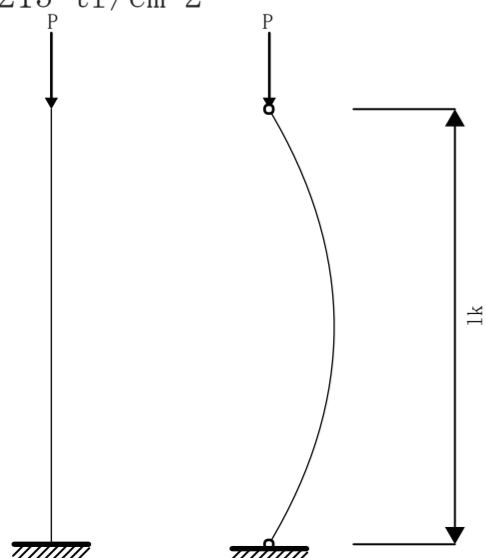


図. 両端ピン支持部材の座屈長さ



写真. 座屈試験の様子

## 1.3 曲げ試験

ある長さのカーボンロッドの中央に荷重を加え、その時のロッドのたわみ  $\delta$  を測定する。たわみ  $\delta$  は以下の式で与えられる。

$$\delta = P * L^3 / (48 * E * I) \quad (P: \text{荷重}, L: \text{部材長さ})$$

数種類の荷重に対するたわみを測定し、上式からヤング率  $E$  を求める。

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



写真. 曲げ試験の様子

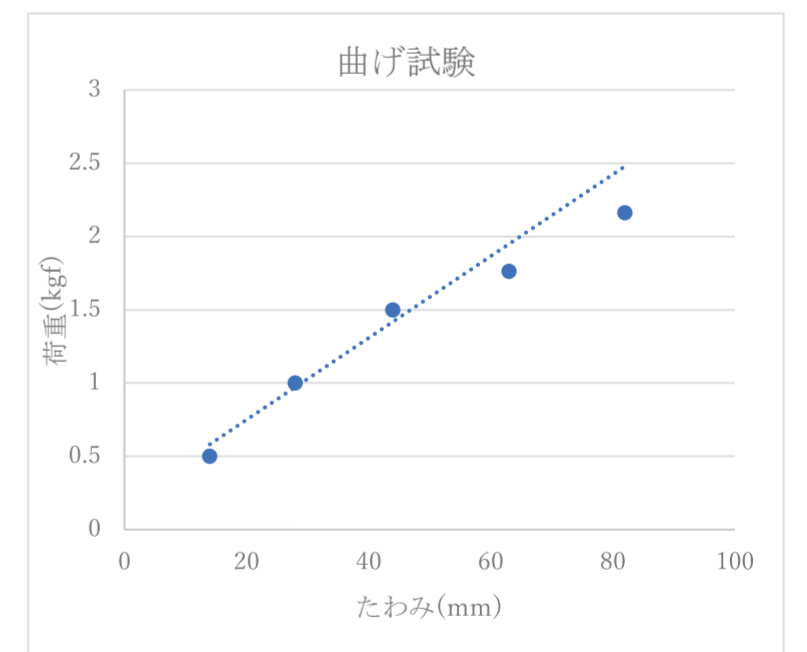


図. 荷重変形曲線

## 2. 形態解析

### 2.1 モデルの作成

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。

部材 1 本は、長さ 60cm 直径 4mm のカーボンロッドと長さ 60cm 幅 40cm の天女の羽衣に相当する。

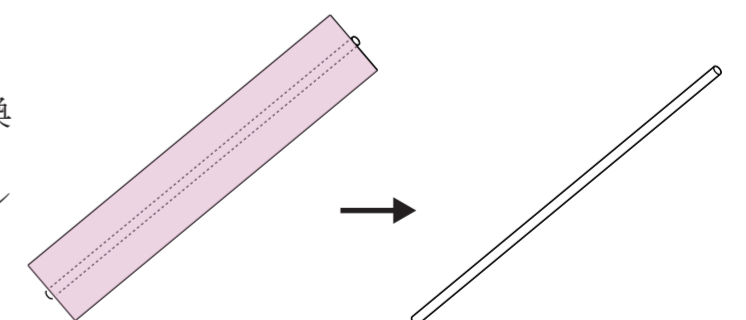


図. モデル化の概念図

### 2.2 材料強度・荷重の設定

モデルの部材の強度が実際のカーボンロッドと天女の羽衣の強度と等しくなるように、部材のヤング率、断面二次モーメント、断面積を設定する。重力に加え、風速 20m/sec の風から受ける圧力を受圧面積から求めて横向き荷重として入力する。

### 2.3 安全率の算定

以上の条件で応力解析を行い、部材の応力と許容耐力の比を求める。

解析結果を見てモデル形状を修正し、最終的にすべての部材の応力が許容耐力以下になるよう調整する。

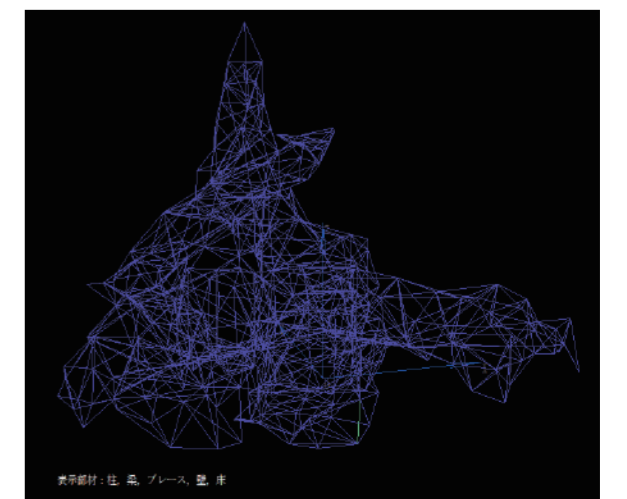
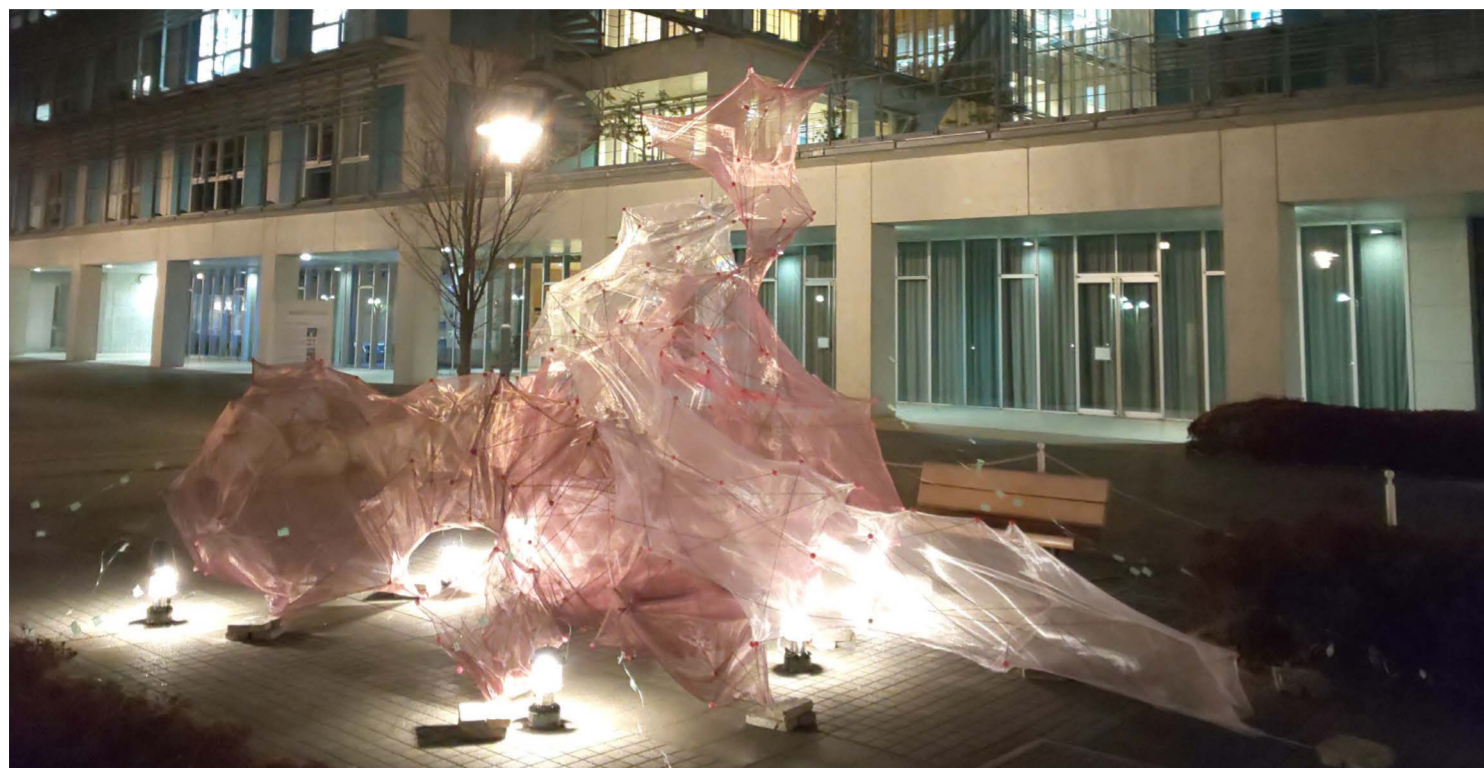


図. 解析結果

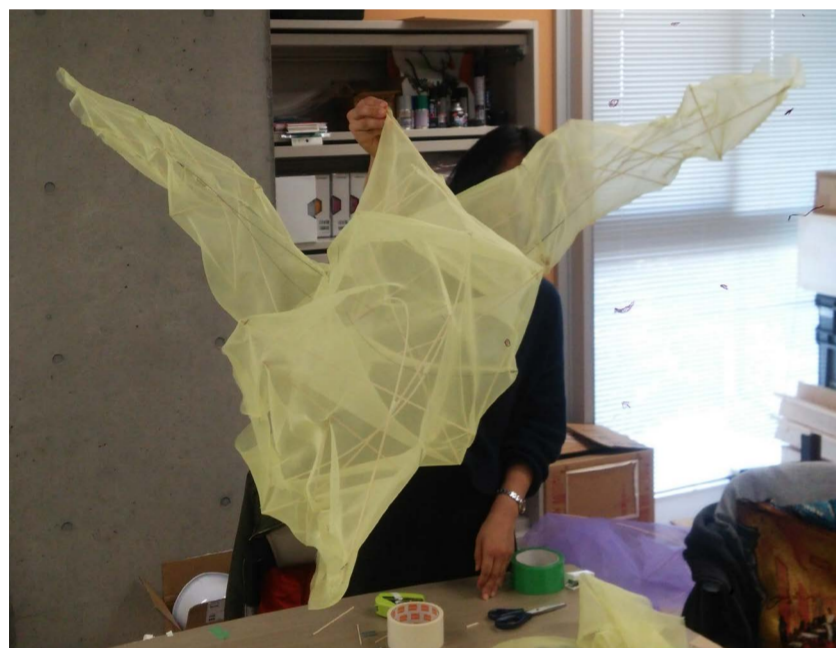


### コンセプト

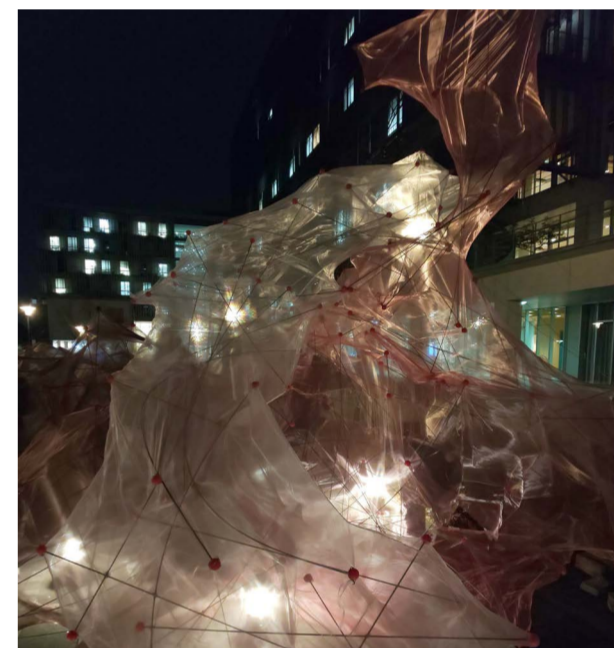
広大な柏キャンパスの外部空間に、人のいることができる空間を作りたいと考えました。  
自然豊かな柏に住む大きな生き物のようでありながら、光の漏れる木漏れ日のような落ち着きを生む場所を目指しました。



世界一薄い布“天女の羽衣”を引張材、軽量ながらも高強度なカーボンロッドを圧縮材として用いたテンセグリティ構造を採用することで、大きなボリュームながらも軽やかな構造を目指した。



曲げたカーボンの端点と布をつなぐことで、カーボンの弾性力により布に張力が発生する。この圧縮力を担うカーボンと張力を担う布を組み合わせることで、テンセグリティ構造により各モジュールで安定した形を作った。このカーボン一本に対して異なる方向のカーボンが二本交差する事で強度が増す。また、交差している部分は固定する事により補強している。



トゲトゲの形に切断した複数枚の布を縫い合わせ個々のモジュールを作ること、形状が複雑になりモジュール同士の端点接合を容易にした。カーボンの端点をトゲ部分に配置し、構造体として強度をもたせた。

半透明の構造体は互いに色が重なる。同色相だが明度・彩度の異なる紫色、薄桜色、桃色のオーガンジーを用い、豊かな視覚体験を創出している。

### スタディ

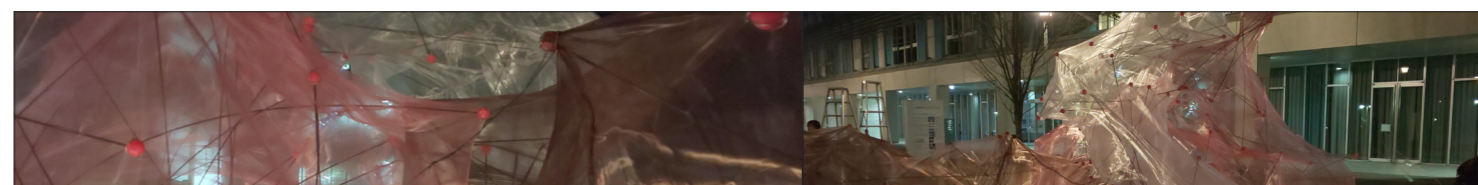
本体に取り掛かる前に、1/20 と 1/5 のスケールで模型を作成した。



1/20 は全長 30 センチほどで、最終的な形状を決定するために作成された。この時に、足元を支える LEG パーツ、縦に伸びる BODY パーツ、全体を支える TORNADO パーツ、の 3 パーツで本体を構成することが考案された。模型ということで材料や施工方法はかなり簡略されているが、棒材で布をつっぱり、その張力で全体を立たせる構造的な仕組みは本体と変わらない。

1/5 の模型は、本体を作る上で型紙的な役割も果たせるように、最終形になるということを意識して、試行錯誤を繰り返し作られた。また 1/5 スケールでは布と棒材の数制限について考慮し模型を作成した。1/5 は、本体の型紙的な役割を果たすため、切り出した布の形がよくわかるように、隣り合う布同士はなるべく異なる色になるよう作成された。





### 施工プロセス

スタジオ担当者: 佐藤 淳

担当者: 劉彦辰 皆川宥子 竹村由紀 徐艺翎 楊斯琦



#### 1. 型紙作成

1/5 模型にロール紙を当てて型取りし、型紙を作成した。縫製箇所を減らすため、できるだけ少ない枚数・大きな布で形を再現できるようにした。



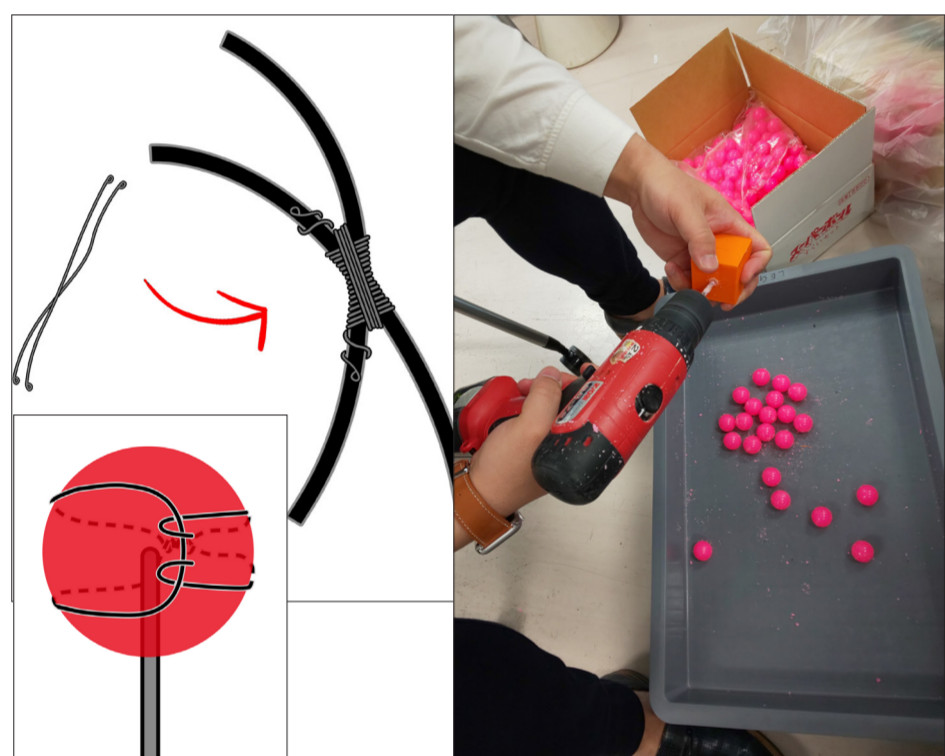
#### 2. 布への転写

1/5 スケールの型紙を用い、布に相似形を描く作業。XY・2軸の値を求め、頂点を算出。それらの頂点を結ぶように弧を描き、形を決定した。布はそれぞれ、tornado に 20m、leg に 30m、body に 40m、を使用した。



#### 3. 縫製

90 番の糸を用い、ミシンで縫製 (上糸強さ: 2、押さえ強さ: 弱、縫い目間隔 2 ミリ) を行った。3 の倍数をもつ辺は後の施工のことを考え、角のみを縫い、開口部とした。複数の布が組み合わさるに連れ、徐々に立体となっていく。



#### 4. 接合部パーツ作成

スーパーボール穴あけ、ファスナー作成、カーボンロッド接合部針金作成。



#### 5. カーボンロッド挿入、組み立て (室内)

布の縫い目やいくつかの布が合わさった頂点から対角に位置する布をめがけてロッドを差し込み、ファスナーを用い布とスーパーボールを固定。ロッド同士は細針金で固定し、強度を増した。



#### 6. 屋外運搬

室内で組み立てていたパーツをいざ屋外へ! 6F のワークスペースから階段をつたい、方向転換するごとに掛け声をかけあいながら 1F まで運搬した。



#### 7. カーボンロッド挿入強化

最終形に近づくため、カーボンロッドを入れ、強化していく。同時にファスナーをスーパーボールに食い込む程度に締め、ロッドの位置を固定した。



#### 8. 三パーツ組み上げ

まずレッグの位置を決めて足を仮固定し、そこに沿わせるようにボディを設置した。次にトルネードをレッグとボディにそって巻きつけるように設置し、ボディの頭頂部、レッグの上部と固定した。最後にボディとレッグを固定し、ボディの地面との接地点を調整して形状を固めた。



#### 9. 仕上げ縫製

仕上げに、カーボンロッド挿入用に空けていた箇所を手縫いで縫い合わせた。布が薄く二枚を合わせた波縫いでは針穴が欠点となり布が裂ける要因となるため、布を幾重かにし、かがり縫いを施した。