

“セミテンセグリティ構造 2022：線香花火スボ手” – 壊れても死なない構造 Semi-tensegrity Tectonics 2022 : Senko Firework Subote – preventing death in the event of collapse

カーボンロッドを線香花火のようなモジュールに束ね、ワイヤーで安定させてテンセグリティのように散りばめた架構です。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、2022年度は「スボ手」の線香花火が上向きに火花を散らす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 first blow in early spring called “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.

- 規模 Scale
大きさ Dimension: 長さ 7 m × 幅 2 m × 高さ 3 m
重量 Weight: 本体 8 kgf + 基礎用オモリ 80 kgf(レンガ)
- カーボンロッド Carbon (CFRP) Rods
φ5mm, 最長2m
- 張弦
ステンレス針金 φ0.7mm

- 接合具
ポリ乳酸 (PLA) 製 3Dプリント (プリンター: Ultimaker 5, Ultimaker 3 Extended, Ultimaker 5s)
スチール針金 φ2.0mm
- 基礎 Foundation
オモリ用レンガ Bricks
- 設計荷重 Concerning Load
重力 Gravity: 1G = 980 cm/sec² 風速 Wind speed: 38 knots = 20 m/sec

- 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
監視カメラ: 24時間監視用ウェブカメラ

コンセプト

Concept(中馬)

「線香花火」
手持ち花火の一種で、火薬が練り込まれた球から弾けるように火花が現れる。線香花火の玉は儂いものたとしても用いられる。

「スボ手牡丹」
関西地方を中心に親しまれてきた線香花火の種類。ワラスボの先に火薬を付け、それを香炉に立てて火をつけて遊んでいたことが始まりだと言われている。ワラスボの端を持って風下に向け、花火の先端を斜め上に傾けて、花火の先端に火をつける。



スボ手牡丹

“線香花火”をモチーフとして、弾ける火花を連想させる形態のモジュールを、あたかも浮いているかのように組み合わせて制作した。

6本のロッドが放射状に広がる形態を基本構造とすることで、刺々とした形状でありながら浮遊感のある構築物を作った。水平方向と垂直方向の双方に長さを持たせることで、構造力学的な応用可能性を含意す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る。



最終形

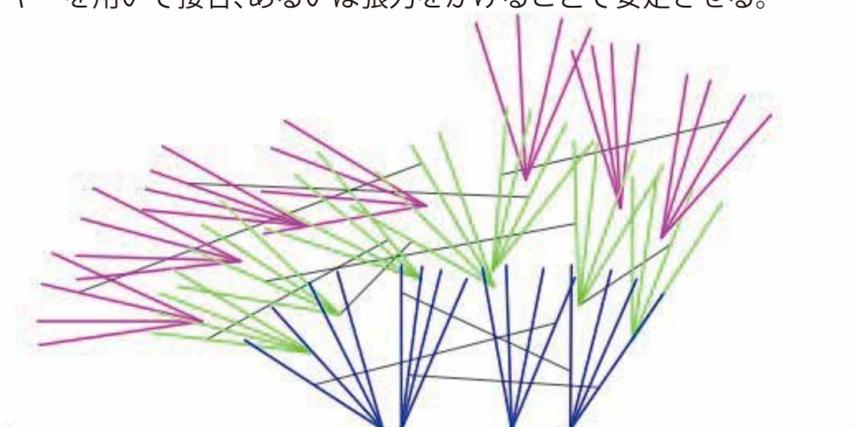
- ・地面に接する点を4点のみとし、カーボンロッドとワイヤーの細く直線的な形状を活かして浮遊感のある見た目とした。
- ・主要材料のカーボンロッド同士は、3Dプリントによる2種類のジョイントによる接合またはワイヤーと簡易クリップによる接続とすることで、施工性を向上させた。
- ・各モジュールの配置・向き・開き具合にランダム性を持たせ、より自然な風貌に仕立てた。
- ・ジョイントは青・紫・マゼンタの3色とし、カーボンロッドの黒を基調としながらも線香花火のように鮮やかな色合いとした。
- ・全体を水平方向と鉛直方向の双方に対して、地面の支持点から離れた位置まで部材を到達させる形状とすることで、将来的な応用を見据えた力学的検討を反映させている。

スタディ

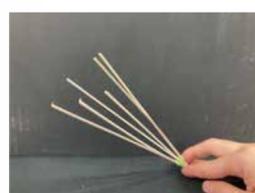
Study(熊野)

主に2mm角の木材と糸を使用して、木を主な素材とした1/10スケールの模型を作成し、全体形状のスタディを行った。複数本のカーボンロッドの端点をまとめたモジュールを、ファスナーとワイヤーを用いて接合、あるいは張力をつけることで安定させる。

全体形状のスタディでは、横に張り出す部分と上に高さを出す部分を設定することで、力学的に釣り合う形状を意識した。これは同時に、対称性を崩したナチュラルな外観にすることにもつながった。



下から積んでいく



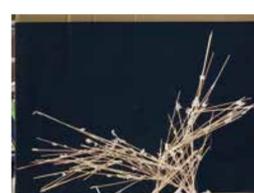
モジュール



スタディ案1



スタディ案2



スタディ案3



最終スタディ模型

■ 構造物諸元・構造解析概要 General(九富)

□ 寸法・重量 Dimension & weight

- 幅 Width: 2.8m
- 長さ Length: 5.4m
- 高さ Height: 3.4m
- 重量 Weight: 10.1kg

□ 材料 Material

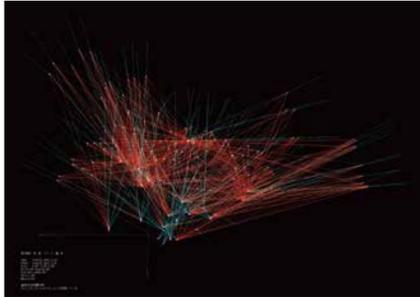
- Carbon rod(diameter : 5.0mm, dencity : 1.5g/cm³)
- Stainless wire(diameter : 0.7mm dencity : 7.8g/cm³)

□ 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



初期形状の構造モデル

青: カーボンロッド
赤: ステンレスワイヤー

■ 構造計算 Calculation(八木、鈴木)

□ モデル化・座屈長さの設定

モデル化に当たってはモジュールのカナメとワイヤーの両端をピン接合、残りを剛接合とみなしたうえで、それぞれのカーボンロッドは1:2:1に分割して中間節点を設定し、他の部材の接合部とした。座屈長さに関しては各中間節点がワイヤーや他のロッドによって一定程度拘束されていることを考慮して、先端部材に関しては両端ピン接合時の1倍、中間部材に関してはロッドが多く集まるカナメに近い分両端ピン支持よりは拘束度が高いと考えて1/√2倍、根本部材は安全側に見積って中間の部材と同等程度の座屈長さになる√2倍として設定した。

ロッドの中間同士をつなぐファスナーは剛接合

モジュールの要はピン接合

ワイヤー端部はピン接合

□ 風荷重の設定

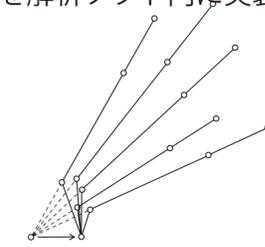
初期モデルから総重量や受圧面積を算定し、風荷重によって想定されるベースシアを算出した。

- 風速 20[m/sec]
- 風圧 35[kgf/m²]
- 抗力係数 1.4
- 受圧面積 0.005[m] × 2[m] × 150[pcs]=1.5[m²]
- 風荷重 2.1[m²] × 35[kgf/m²] × 1.4=73.5[kgf]
- 自重 1.5 × 25000[cm] × 0.196[cm²]=7.36[kgf](カーボンロッド分)
7.8 × 90000[cm] × 0.00385[cm²]=2.70[kgf](ワイヤー分)
7.36+2.70=10.1[kgf](総重量)
- ベースシア 73.5/10.1=7.27<8.0 ベースシアで8.0相当の風荷重として設定

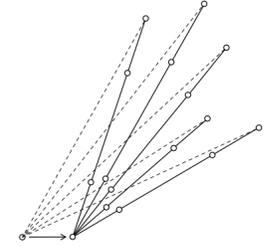
■ 構造解析 Structural Analysis(九富)

構造モデルを作成するにあたって、ワイヤーブレースは圧縮力を負担できないため、モデル上に圧縮力が生じるブレースが存在しないワイヤーの張り方を探索する必要がある。そのため解析で圧縮力が生じるワイヤーを検出するたびに、該当するワイヤーを削除して再計算を行う繰り返し計算を自動で行うツールを作成し、すべてのワイヤーに引張力が生じるようなモデルを作成した。

構造モデルが完成した後は形態解析のツールを用いて節点を動かす操作、ケーブルを追加・削除する操作をおこない全体形状を最適化する。モジュールを構成する各ロッドは中間接点で複数部材に区切られているため、節点を一つずつ操作するとロッドが曲がった形状になってしまう。今回はロッドの直線形状を維持しながら節点を動かすために、モジュールの先端を動かした際にモジュール全体が追従して変形するような形態解析のツールを解析ソフト内に実装した。



節点を動かす操作をすると
ロッドの形状が崩れてしまう



節点を動かす操作をすると
ロッド全体が追従して移動する

初期形状に多く見られる赤色の部材は安全率1を超えていることを示すので、赤色がなくなるまで形状操作を行う。



初期形状



中間形状



最終形状: 安全率が1を超える赤色の部材が存在しない

■ 加力試験

Loading tests(坂本)



ロッドの座屈試験の様子

細いロッドから構成される構築物は座屈現象が支配的になります。実際に用いる直径5mmのカーボンロッドに対して座屈試験を行いました。座屈荷重は両端ピン支持の場合 $P_{cr} = \pi \times E \times I / L^2$ (ここでEはヤング率、Iは断面2次モーメント) のため、材料のヤング率は $E = P_{cr} \times L^2 / \pi \times I$ と求められます。

長さL=1955mmのロッドでは座屈荷重 $P_{cr}=1.0\text{kgf} \rightarrow E=1272\text{tf/cm}^2$

長さL=1185mmのロッドでは座屈荷重 $P_{cr}=2.8\text{kgf} \rightarrow E=1308\text{tf/cm}^2$

曲げ試験でも同等の結果が得られたことから、カーボンロッドのヤング率を $E=1250\text{tf/cm}^2$ として構造計算に用いることになりました(下グラフ)。

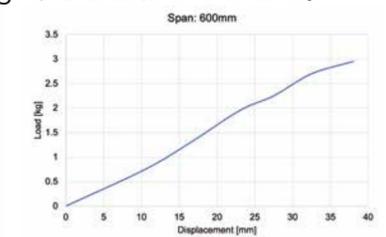
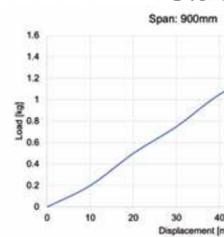


ロッド+ロッドの加力試験の様子



カナメの加力試験の様子

3Dプリントで制作されたPLA製のファスナーについても強度を簡易な実験で確認しました。「ロッド+ロッド」タイプのファスナーについてはこの原理の要領で、支点から1:5の距離に作用点(ファスナー)と力点(ばねばかり)を配置し床に固定したファスナーを上へ引くことで破断に至る引張荷重を計測しました。その結果「ロッド+ロッド」タイプのファスナーの引張強度は20kgfであるとわかりました。



曲げ試験結果グラフ

接合部

クリップ



最終形



①四角を作る ②大量生産 ③切断する ④折り返す ⑤挟み込む クリップの作成手順 ⑥ワイヤーを通す

ロッド+ロッド：3DプリントPLA製

左から右へ形状を改良



①スリットが水平方向 ②スリットを斜めに (ほぼ完成) ③フィレット追加

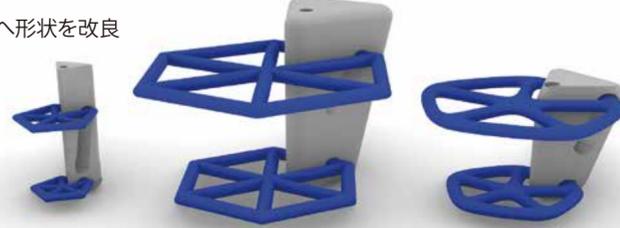


3Dプリントしたもの

ロッドどうしの可動接合部を3Dプリンティングにより一体で製造した。小パーツのダンベル状の軸が大パーツの斜めのスリットに挟まれており、軸まわりの360度回転・ロッド方向まわりの120度回転・接点の若干の変位を許容している。ロッド穴はなるべくきつくする代わりにフィレットを大きめにかけ、挿しやすさの向上を図った。

カナメ：3DプリントPLA製

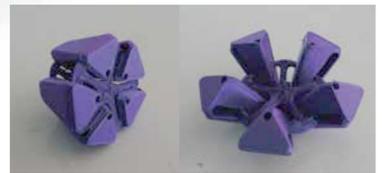
左から右へ形状を改良



①スリーブ細め ②スリーブを太く ③蓮根を丸く ロッドが奥まで刺さる



3Dプリント中の様子



閉じたとき 開いたとき



カナメ断面図

線香花火モジュール内のロッドの先端が集まる要のジョイントを3Dプリンティングにより一体で製造した。ロッドを保持するスリーブにはロッド穴・軸の穴・スリットが効率よく納められている。蓮根型の軸が5~7個のスリーブを束ね、もう1つの蓮根パーツがスリットをスライドし可動域の制限と強度の向上を担う。蓮根パーツは入隅部での応力集中を防ぐため角を丸めて設計した。

施工

線香花火モジュールを23個作成し、それらをワイヤーで繋げることで組み上げた。4つのモジュールを足がかりに、上に伸ばすTall側とキャンチさせるLong側とでバランスをとりながら一つ一つモジュールを追加していく。

具体的な施工手順は以下の通り。

- ①線香花火モジュール下部にクリップを取り付ける
- ②位置を定め、複数人で支える
- ③ロッド+ロッドで2箇所固定する
- ④カナメをワイヤーで釣り上げる
- ⑤ロッドに圧縮がかかるようにワイヤーで結ぶ

最終的には高さ3.4m、長さ5.4m、幅2.8m、重さ10.1kgの構造物が出来上がった。手前の2本の支持点の中点から3.0m張り出すことに成功した。



モジュール



施工風景



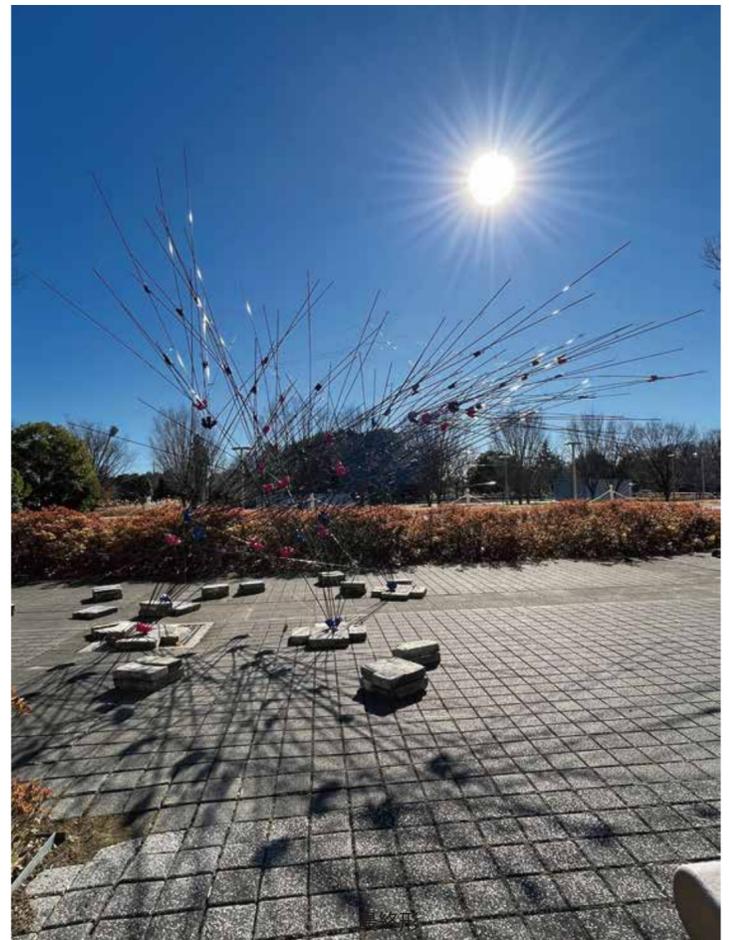
クリップとワイヤー



ロッド+ロッド



3色のカナメ



最終形

Construction(俵、露木)

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 承認済
環境学研究系専攻長会議 報告済
環境棟運用WG 承認済
柏キャンパス・アメニティ室会議 承認済
柏キャンパス・共同学術経営委員会 報告済
キャンパス計画室柏地区部会 承認済
キャンパス計画室会議 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
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。