

“散乱型展開構造 2023：ハドロン衝突” – 壊れても死なない構造 Scattering Deployable Tectonics 2023 : Hadronic Collision – preventing death in the event of collapse

カーボンロッドを火花のようなモジュールに束ねたモジュールをひねりながら開くヒンジで連結させた架構です。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。2023年度は「ハドロン衝突」で素粒子が散乱する様子が生まれました。この全体形は一気に畳むことができます。

● 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 4 m × 幅 2 m × 高さ 3 m
重量 Weight: 本体 18 kgf + 基礎用レンガ 80 kgf

● カーボンロッド Carbon (CFRP) Rods
φ5mm, 最長2m

● 張弦
ステレス針金 φ0.7mm

● 接合具

ポリ乳酸 (PLA) 製 3Dプリント
(プリンター: Ultimaker 7, Ultimaker 5, Ultimaker 3 Extended)

● 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

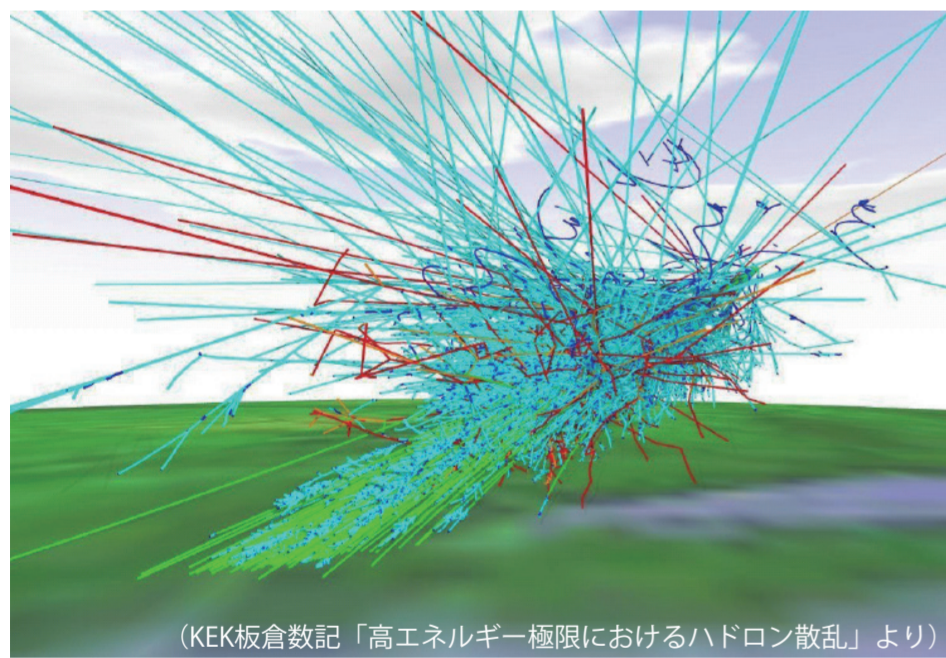
Concept(田中)

「ハドロン」

物理学で登場する素粒子にクォークと反クォークがある。それらのうち3個または2個が強い相互作用で結びついた粒子を“ハドロン”と呼ぶ。

「ハドロン衝突」

ハドロン同士の衝突によりハドロンを構成していた素粒子が散乱する。素粒子の性質によって様々な長さや方向へ放射される。



(KEK板倉数記「高エネルギー極限におけるハドロン散乱」より)

ハドロンが散乱する様子

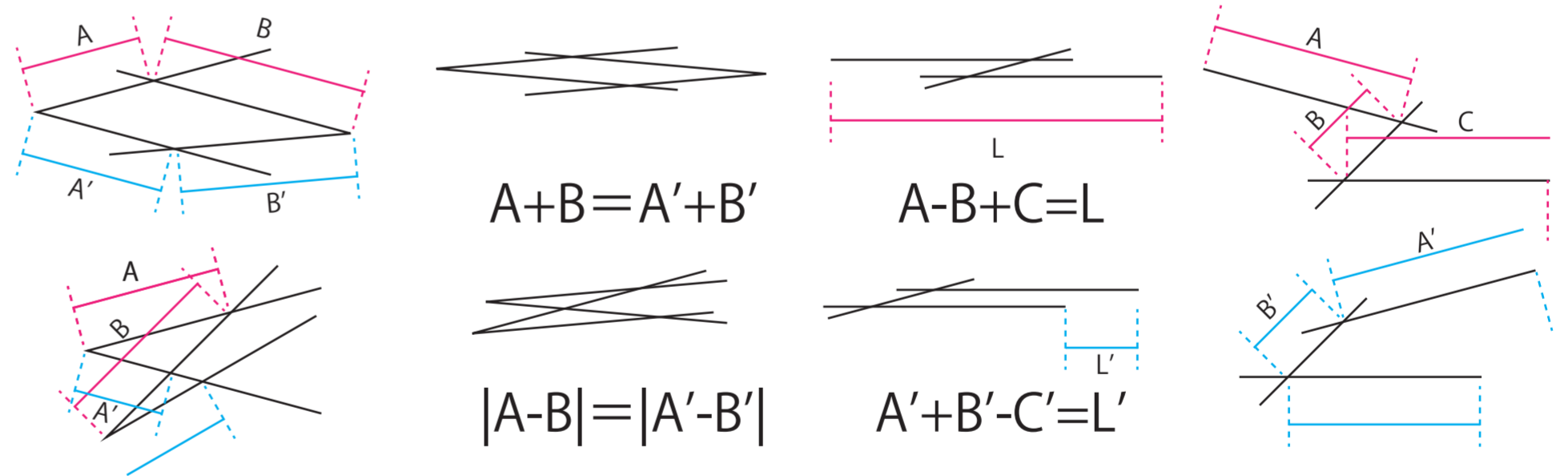
一つの粒子から様々な素粒子が散乱するハドロン衝突のように、カーボンロッドを束ねたモジュールを様々な方向に連結させさらに折りたたんだ状態から展開可能なインスタレーションの制作に成功した。

特徴

- ・折り畳んで多数の直線を束ねた状態から、直線の端点を内側に押ししていくことで展開できる。
- ・一般的な展開構造物と異なり、均一に展開しない。
- ・ロッド同士は 3D プリントによる 2 種類のジョイントのみで接続している。
- ・ロッドの角度に応じてジョイントをオーダーメイドでプリントすることができる。

ロッド接続のルール

様々な角度で“散乱”するためにロッド同士の位置関係は一定ではない。だが、長さの関係性について基本となる法則が4つ存在する。

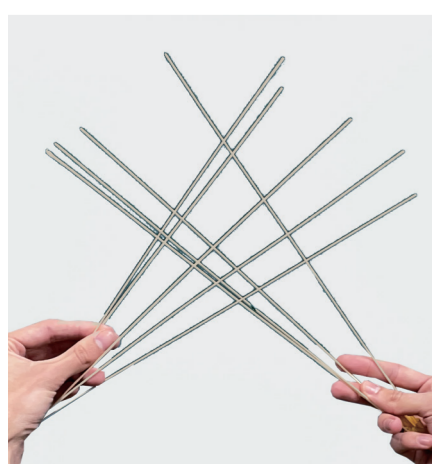


スタディ

Study(中山、Théo、Nathan)

1mm角のヒノキ棒5~7本を束ねたものを1モジュール(縮尺1/5)とし、複数モジュールを連ねても折り畳みが可能な形状を探索した。最初に3つのモジュールの接合から始め、接点がスライドすることなく折り畳める接合位置を探した。繋ぐモジュールを一つずつ増やしてスタディを重ねなが

ら、折り畳みに必要な幾何学的条件を導き出した。その後全体形状のスタディでは、斜め上方にせり上がるような三日月形態を目標とし、展開と折り畳みを繰り返し行いながら形状を決定していった。なお模型の接合部はドラフトテープを用いてヒンジ接合を再現し、モジュール数は25モジュールとした。



モジュールの接合



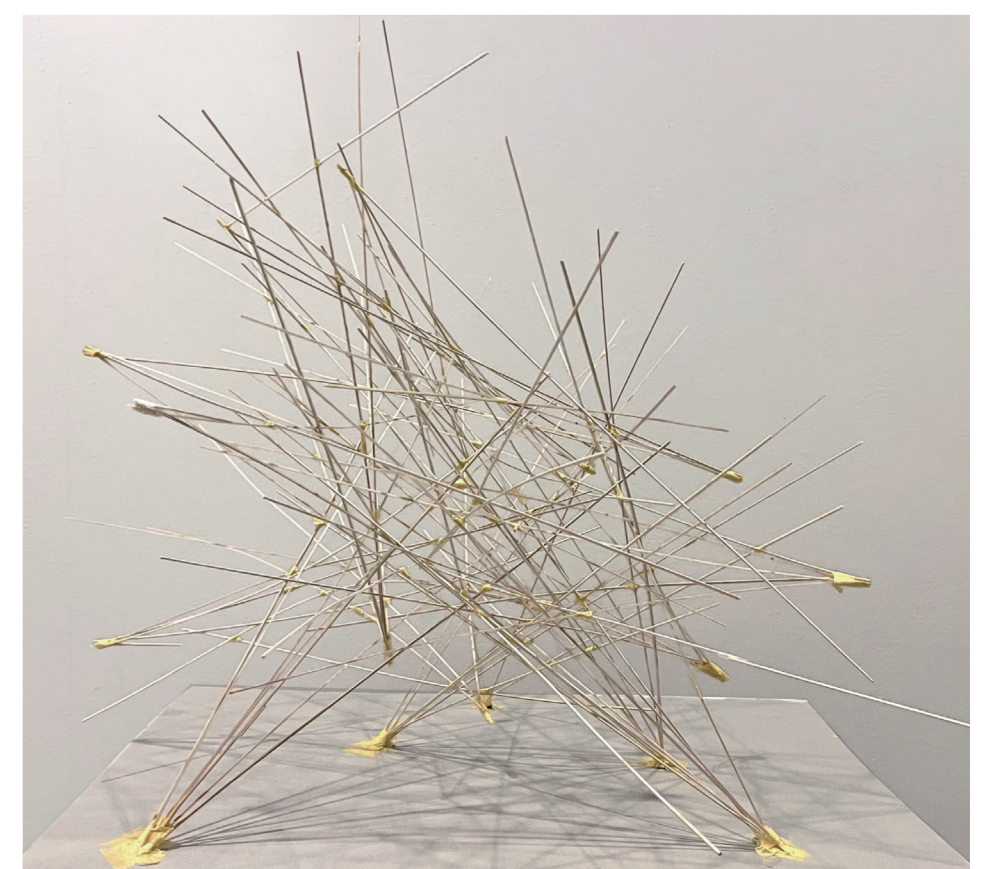
3モジュールでの展開挙動



スタディの様子



全体形状スタディ模型



最終模型

構造解析概要 General(内田、平林)

寸法・重量 Dimension & weight

- 幅 Width: 4.8m
- 長さ Length: 5.8m
- 高さ Height: 5.1m
- 重量 Weight: 28.4kg

材料 Material

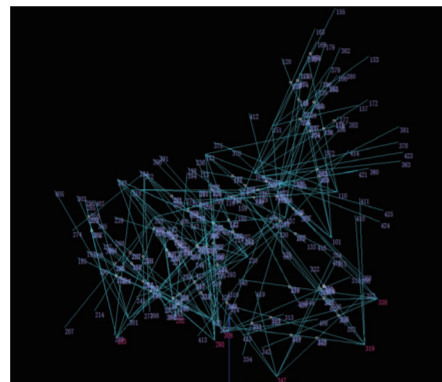
- Carbon rod (diameter : 5.0mm, dencity : 1.5g/cm³)
- PLA (dencity : 1.2g/cm³)

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

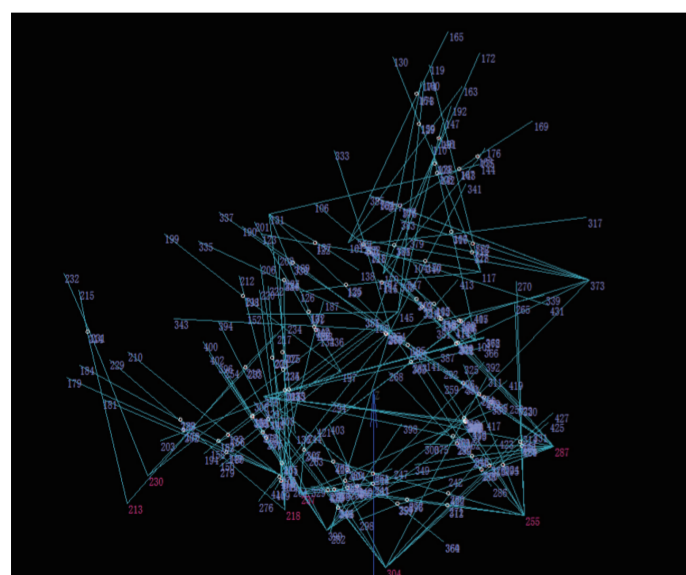
風荷重の設定

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。

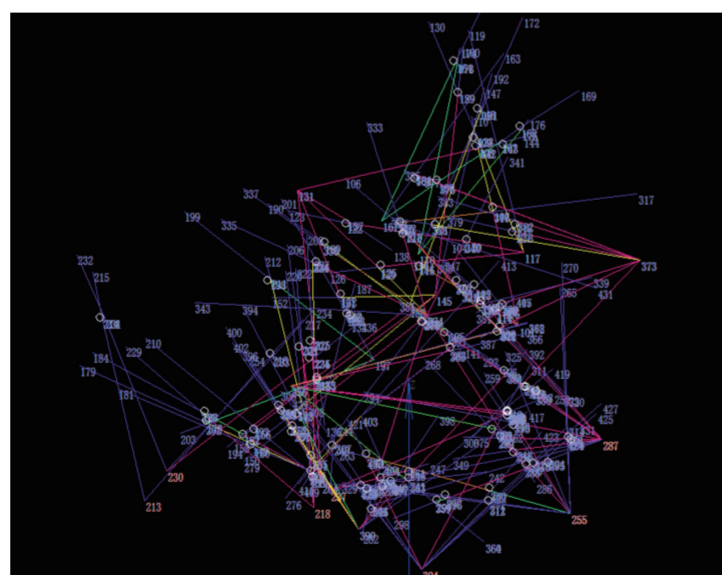
- 風速 20[m/sec]
- 風圧 34.6[kgf/m²]
- 抗力係数 1.2
- 受圧面積 $0.005[m] \times 2[m] \times 125[pcs] = 1.25[m^2]$ (カーボンロッド分)
- $0.030 \times 0.03[m^2] \times 2 \times 120 + 0.04 \times 0.04[m^2] \times 25 = 0.25[m^2]$ (ジョイント分)
- $1.25 + 0.25 = 1.5[m^2]$
- 風荷重 $1.5[n] \times 34.6[kgf/m^2] \times 1.2 = 62.6[kgf]$
- 自重 $1.5 \times 2000[cm] \times 125 \times 0.196[cm^2] = 7.4[kgf]$ (カーボンロッド分)
- $1.2 \times 27[cm] \times 2 \times 120 + 1.2 \times 64[cm] \times 25 = 9.8[kgf]$ (ジョイント分)
- $7.4 + 9.8 = 17.2[kgf]$ (総重量)
- ベースシア $62.6/17.4 = 3.59$ ベースシアで3.6相当の水平荷重として設定

最適化

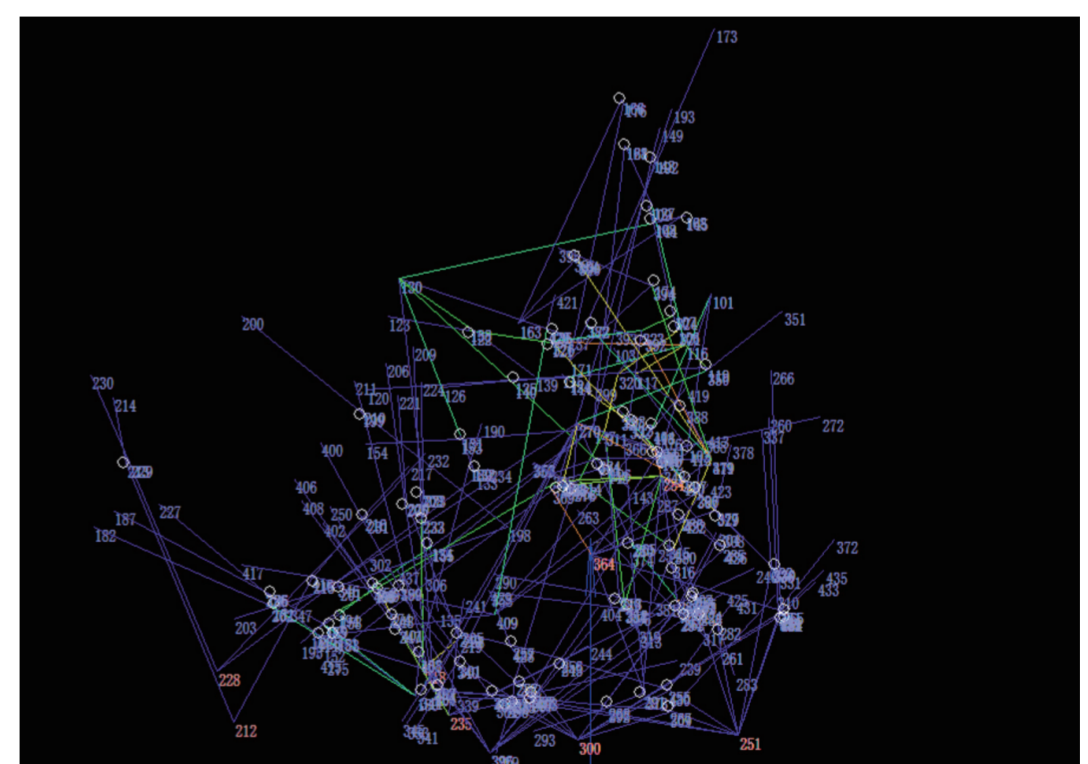
節点の座標を動かすことで応力分布と座屈長さを制御し、安全率が1を超える赤色の部材がなくなる形状を探索する。



初期形状



中間形状



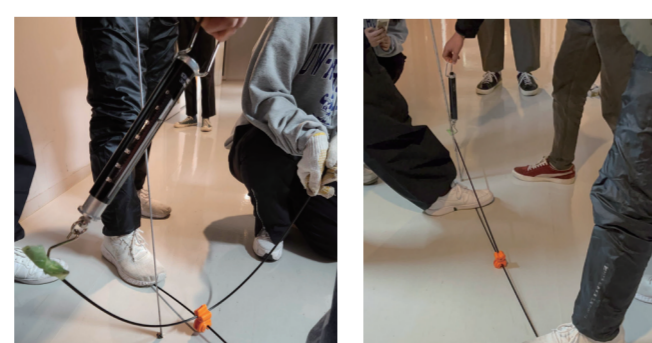
最終形状: 安全率が1を超える赤色の部材が存在しない

加力試験

3Dプリントで作られたPLA製のジョイントについて強度を簡易的な実験による確認をした。

ロッド+ロッド

ロッド+ロッドの接合具では、引張と曲げの強度試験を行った。引張については11.0Nの力が加わっても破断せず、構築物において十分な強度を擁していることがわかった。曲げについては3150Nmmで接合部分の突起が破断した。しかし、実際に用いた際には軸回転と水平移動分の自由度が確保されており、脆弱な破壊となってしまう曲げ破壊の発生はほとんど起こらないと考えられる。



ロッド+ロッドの加力試験 (左: 引張, 右: 曲げ)

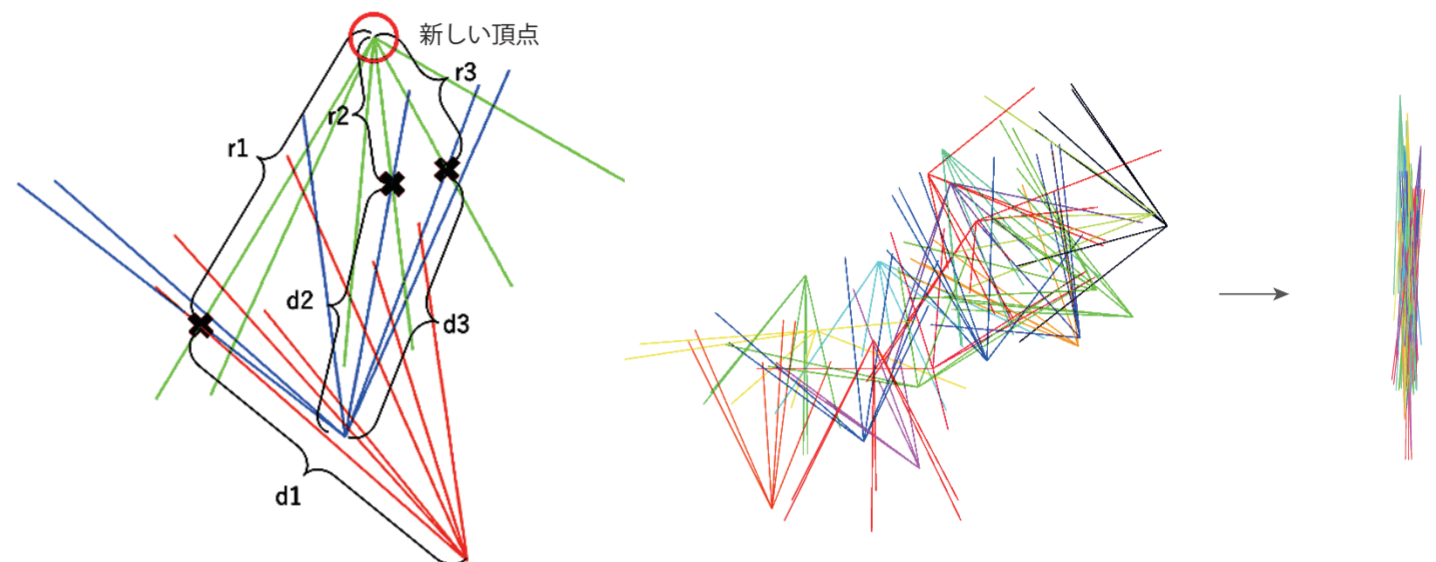


曲げ試験による破断状態

モデル作成 Model Construction(内田、平林)

全体モデル

既存モジュール群の中に一つずつモジュールを追加していくアルゴリズムを考案してモデルを制作した。新しくモジュールを追加する操作は、カナメ位置から接合点までの長さを変数にして頂点の位置を定めることで作図した。この時新しいカナメ座標は、既存モジュール群から3本のロッドを選び、各カナメ位置からそれぞれ任意のd1,d2,d3離れた点を中心として任意の半径r1,r2,r3の球を描き、その球の交点として求められる。6つの距離が一定のまま、既存モジュール群を展開させた時、常に三つの球の交点が存在するかを判定することで、展開可能なモジュールの追加が可能となる。この操作を繰り返すことで、全体モデルを作成した。

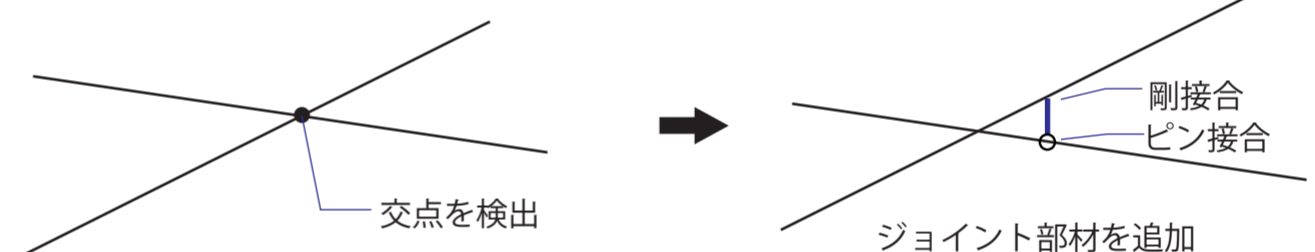


新たな頂点を追加する際はd1,d2,d3及びr1,r2,r3の6変数によって求められる

上記の計算を繰り返すことで20ユニットを畳んだモデルの例

接合部条件

ロッド同士の交点をそのままピン接合としてモデル化すると、ロッドが連続せず途中にヒンジがあるモデルとなってしまう、実際の挙動と異なるモデルとなる。そのため互いを繋ぐ部材をロッドの交点に追加し、その部材の一端をピン、他端を剛とすることで、実際の状態に近いモデル化に成功した。



交点を検出

ジョイント部材を追加

Optimization(内田、新枝、凌雪)

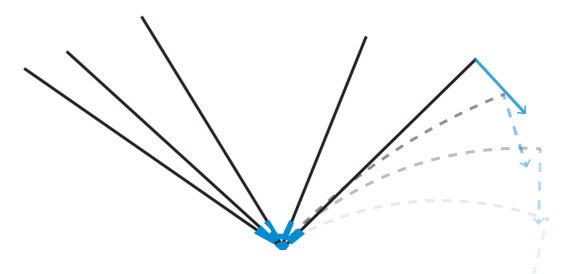
Loading tests(佐藤翔、凌雪)

カナメ main joint

As for the pinnacle joint, we conducted a bending test. We positioned joints on the ground, allowing them to open to a certain degree naturally. We applied an equal force to the rods in all four directions. The bending moment was 764Nmm without fracture, indicating that the material is strong enough for use in construction. However, it's important to note that in actual installations, the joint is unlikely to spread at the exact same degree observed in the test conditions.



カナメの加力試験の様子



曲げ試験の方法

接合部

Fasteners(新枝、佐藤和)

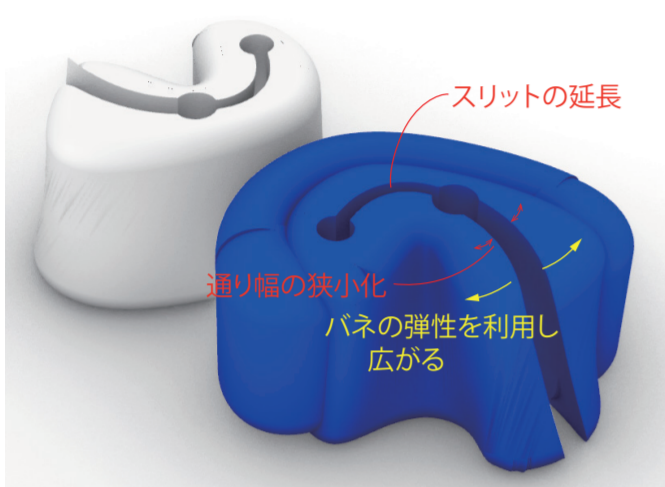
□ ロッド+ロッド：3DプリントPLA製



▲実際に3Dプリントしたジョイント



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。それにより、交叉角の360度回転・ロッド軸まわりの約180度回転を許容している。



▲ジョイントの3Dモデル

ロッドを後から挿入できるようなスリットを設計した。その際、ロッド孔から細い切り込みを延ばすことで、ばねの弾性を利用し、ロッドの侵入幅を狭くすることに成功した。さらに、ジョイント上底と下底の渦巻曲線に相違をもたせることで、ひねりながら挿入するものとし、抜けにくい形状となった。

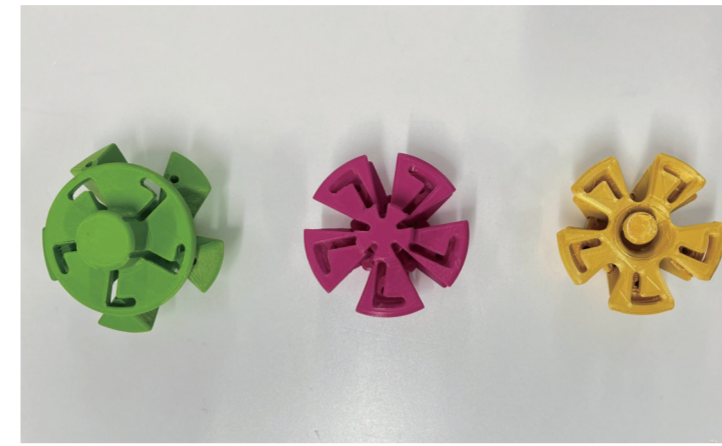
▼ロッドの抜けにくい穴径と幅の探索



▼渦巻形状の探索



□ カナメ：3DプリントPLA製



▲左から右へ形状を改良

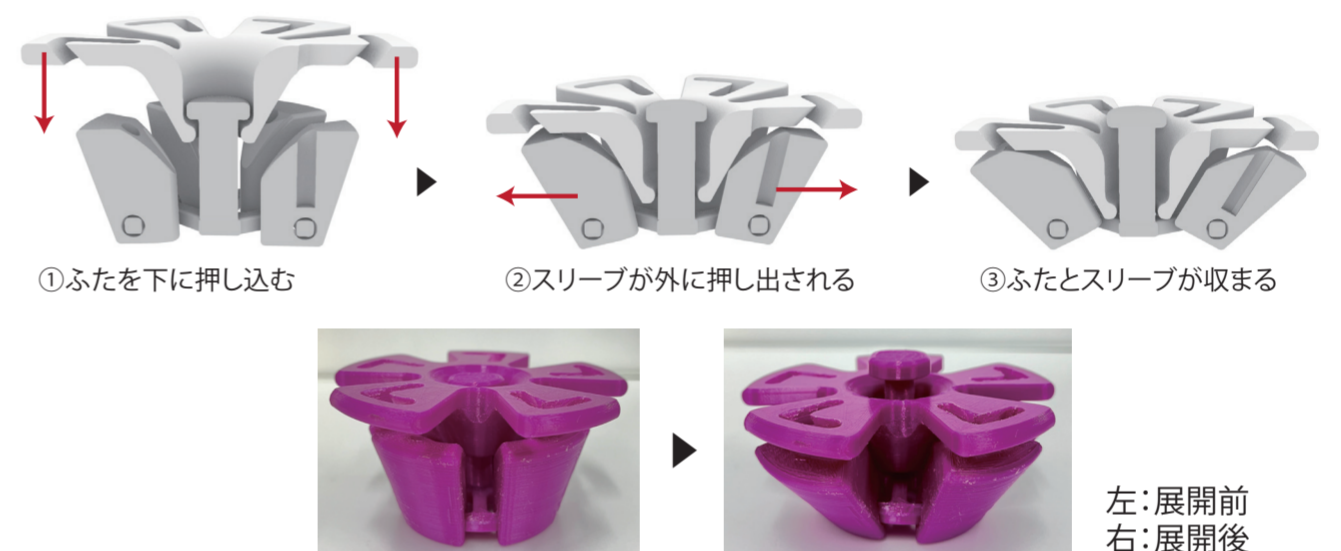
ロッドの端部が集まるカナメのジョイントを3Dプリンティングにより製作した。ロッドを保持するスリーブ、それを束ねる蓮根型のディスク、めしべ型の軸とロック機構を備えたキャップの一体プリンティングを可能にした。入隅部での応力集中を防ぐためRを設けるよう設計した。



▲解析モデルに即した非均等割りのカナメ

解析モデルから各モジュールの展開挙動を割り出し、それに即したロッドの位置にスリーブが来るようなアルゴリズムを考案し、grasshopperで生成した。キャップを押し込むことでスリーブが外に押し出され、キャップとスリーブが所定の展開角度で収まるように設計し、最後にキャップを回すことで、展開した状態で固定されるようにした。

▼展開機構



施工

Construction(佐藤翔、長留、高田)

力学的最適化による形状決定と並行しての組み上げとなったため、3つのモジュールからなる基本形に、幾何学的条件や構造的合理性等を考慮しながらロッドを追加していった。ロッドを少なめの3本程度にした状態から最大7本までカナメに追加していくことで新たに取り付くモジュールを形成した。最終的な形状としては、5つのモジュールが地面に設置した、合計25のモジュールからなる構築物を制作した。具体的には右のような手順を繰り返すことで制作を進めた。



①ロッド (モジュール) の取り付け



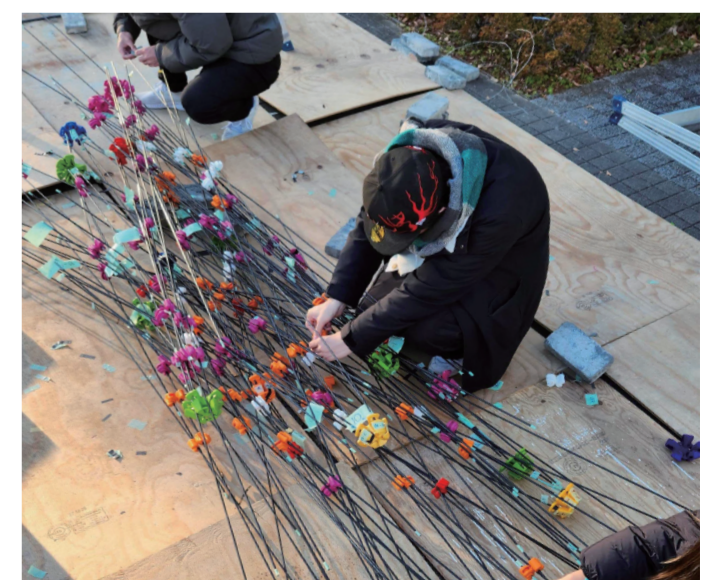
②ロッドやジョイントのナンバリング



④展開



③折りたたむ



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