

“メッシュ構造 2017:すじ雲型” — 壊れても死なない構造

Weld Mesh Tectonics 2017 : Cirrostratus Cloud – preventing death in the event of collapse

溶接金網を立体的に成形した架構です。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。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、2016年度に培った技術に学んで、2017年度は「すじ雲」のような形状が生まれ、スパン10mに達することができました。

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。半透明なメッシュ状の構造は、濃淡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。3 mm の針金の座屈と塑性化を制御する構造計算、手動形態解析、2次元画像スペクトル解析、アンカー用スクリューベグの引張試験を経て、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 spring (February or March) called "Haru Ichi-ban", imagining 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 structural analysis manipulating the buckling phenomenon and plastic state of 3 mm steel wires, manual form optimization, 2D visual spectrum analysis, anchor strength tests, the shape was decided.

規模 Scale・大きさ Dimension 長さ 20 m × 幅 5 m × 高さ 2.5 m 最大スパン: 10m 重量 Weight: 本体 150 kgf + 基礎用オモリ 200 kgf (レンガ)	柱 Column 丸鋼 Steel bar ϕ 25mm
溶接金網 Weld mesh ステンレス ϕ 3.2mm @ 100x100mm	基礎 Foundation 鋼板 Steel plate t = 12mm, ϕ 800mm オモリ用レンガ Bricks
継手 Joinery ステンレスパイプ Stainless steel tube ϕ 4mm, t = 0.3mm	設計荷重 Concerning Load 重力 Gravity : 1G = 980 cm/sec ² 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 : スクリューベグ, 針金, 漁網

指導教員: 佐藤 淳(東京大学准教授, 佐藤淳構造設計事務所)
 履修生: 朝原 真知子, 安達 沙樹, 猪口 隆大, 魚見 佑香, 景山 亮, 河村 京介, 坂本 菜, 志村 真人, 成 潜帆, 谷野 葵, 堤 中, 西 芳樹, 藤井 元貴, 藤崎 実玲, 松井 温子, 柳本 昌哉, 兪 凡, 廖 沁凌
 協力: 荒木 美香(旧佐藤研究室研究員, 佐藤淳構造設計事務所所員), 古市 渉平(佐藤研究室研究員, 佐藤淳構造設計事務所所員), Ying Xu(佐藤研究室学術支援専門職員), 張 耕嘉(佐藤研究室大学院生), Carol / Chen Xiaoke(小淵研究室大学院生), Andrea Samoy(隈研究室大学院生)

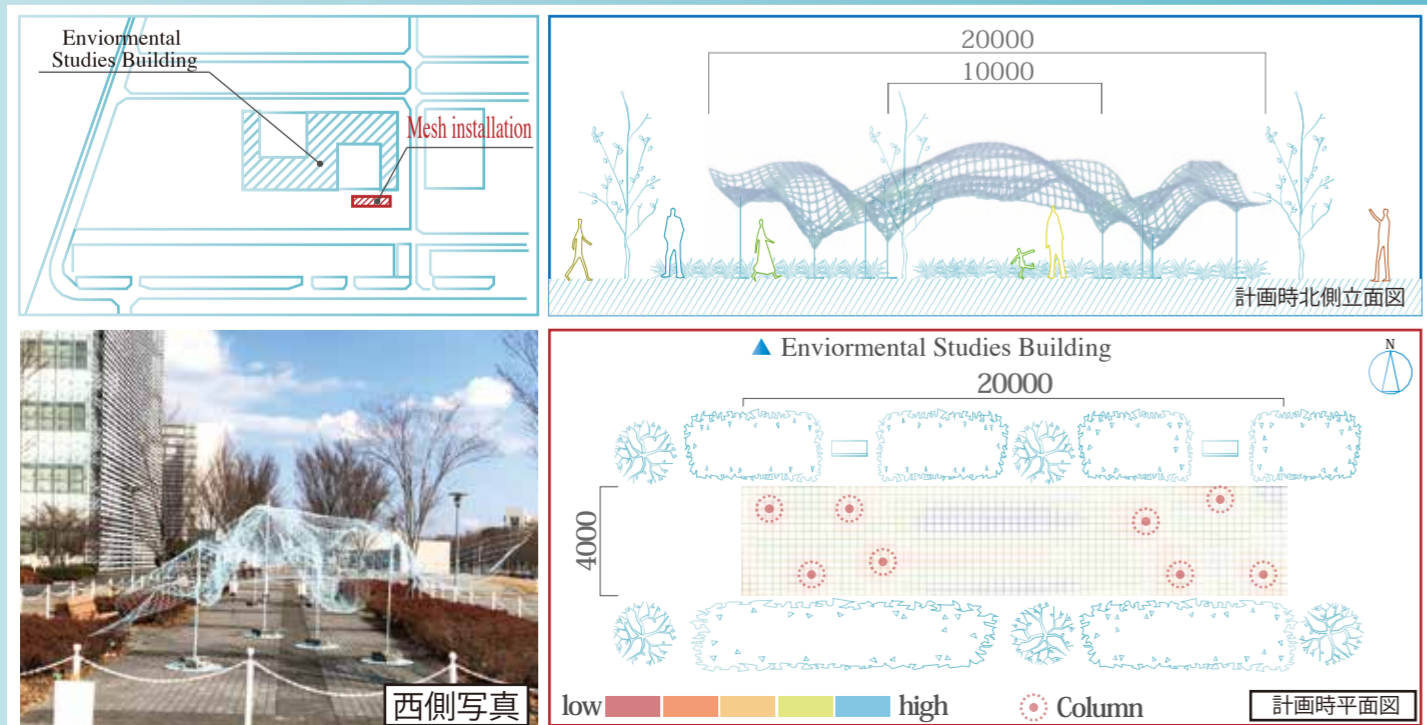
緊急連絡先
 佐藤 淳 Jun Sato
 ・東京大学大学院新領域創成科学研究科
 環境学研究所 社会文化環境学専攻, 准教授
 ・東京大学建築構成材デザイン工学
 (AGC旭硝子) 寄付講座, 特任准教授
 ・佐藤淳構造設計事務所
 携帯: 090-2521-4804
 E-mail: junsato@edu.k.u-tokyo.ac.jp
 Associate Professor, the University of Tokyo
 Jun Sato Structural Engineers Co., Ltd.

展示承認 ・社会文化環境学専攻会議 ・環境学専攻系専攻会議 ・環境棟運用WG ・新領域アミニティ室会議 ・柏キャンパス・アミニティ室会議 ・柏キャンパス・共同学術経営委員会 ・キャンパス計画室柏地区部会 ・キャンパス計画室会議	2017年 9月20日 承認済 2017年 9月21日 報告済 2017年10月 5日 承認済 2017年10月11日 承認済 2017年11月10日 承認済 2017年12月 4日 報告済 2017年12月14日 報告済 2017年12月16日 報告済
--	--

本展示は監視カメラにより1日24時間監視しています。



全体写真



西側写真

計画時平面図

STEP 1 解析ソフトを利用した形態解析



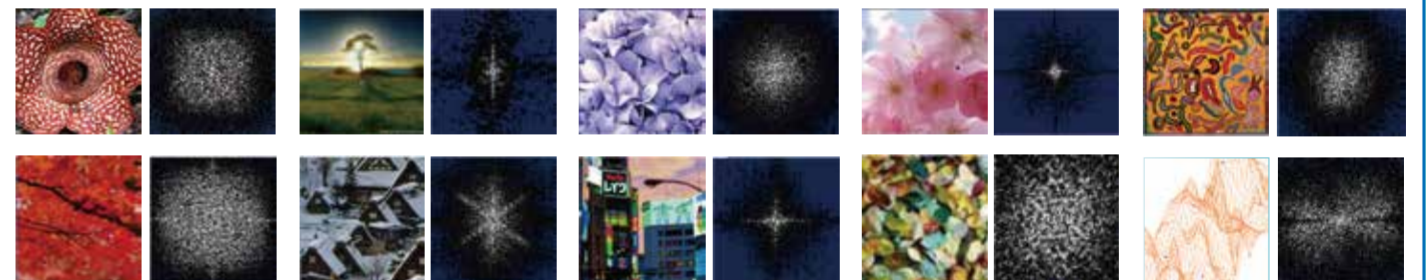
メッシュ状の構造を模したモデルを、解析ソフトを用いて手動で形状を変化させます。この手動解析ソフトでは、部材の安全率を把握する事ができ、全部材の安全率が1以下になる形態を検証しました。フラットな形状を初期形態とし、ねじれや膨らみの操作を加え形態を変化させました。この検証を重ねることにより、メッシュに高低差を与え、中央部に山脈を作る等の方針を決定しました。

STEP 2 模型による形態のスタディ



上記の形態解析により得た知見をもとに、縮小モデルとなる金網模型を用いて形態のスタディを行いました。中心に山脈を配置させる、山を点在させる等の様々な形態を構造的に成立することを検証すると共に、最適な柱の位置の検証を行いました。多数の形態を比較検証した結果、中央付近に山脈を配置させる形態が最も構造的に安定することがわかりました。

STEP 3 スペクトルによる分析



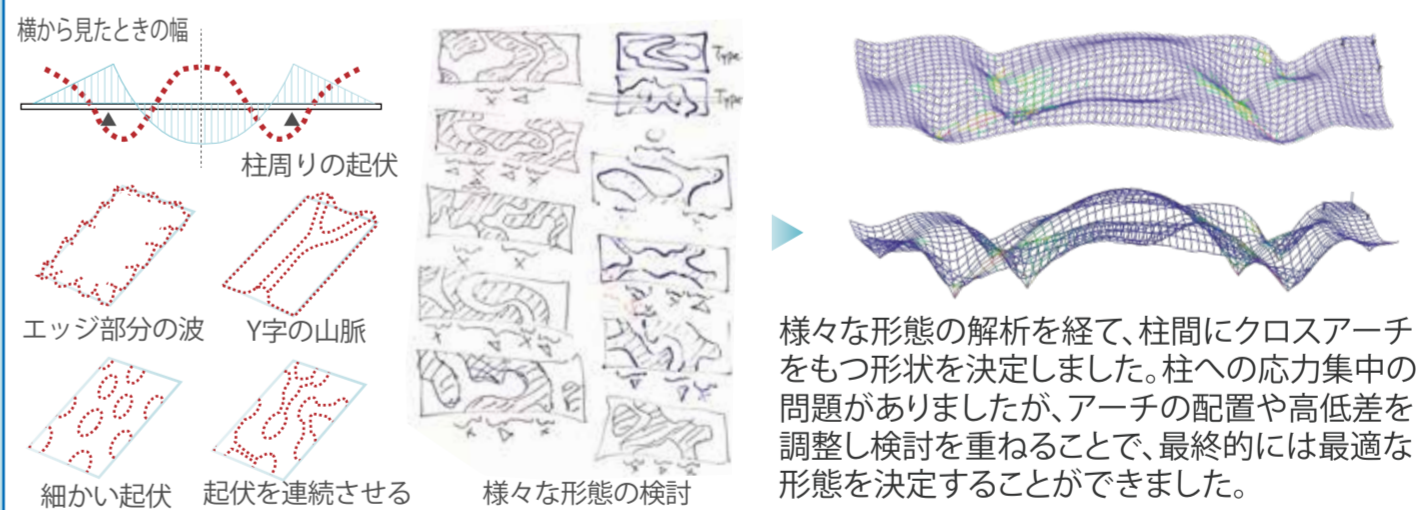
物体や風景は固有のスペクトルを持っています。様々な自然風景の2次元画像を用いてスペクトル解析を行うことでそれぞれのスペクトルパターンの抽出しました。得られたスペクトルパターンは、中央に分布する「集中型」や、縦・横に直線に分布する「十字型」、広範囲に分布する「発散型」と分類できました。これらの結果を踏まえ構造モデルをスペクトル解析することで、自然界のどのようなスペクトルの組み合わせを構造物が持っているのかを検証しました。

STEP 4 材料試験と許容応力度の分析



形態解析ソフトで、スチールメッシュの形態を検討する際に、あらかじめ許容応力度の仮の値を定め、その値を元に形態の安全レベルを調べていたが、実際にスチールメッシュの強度試験を行い、計算式に基づいてメッシュの降伏値と許容応力度を求めた。その値が、もともと仮定していたよりも大きいという結果を得ることができた。その結果の値を利用して、さらに形態解析を進めていった。

STEP 5 今までの成果をもとに再度形態解析・形態の決定



様々な形態の解析を経て、柱間にクロスアーチをもつ形状を決定しました。柱への応力集中の問題がありましたが、アーチの配置や高低差を調整し検討を重ねることで、最終的には最適な形態を決定することができました。

STEP 6 モックアップ施工



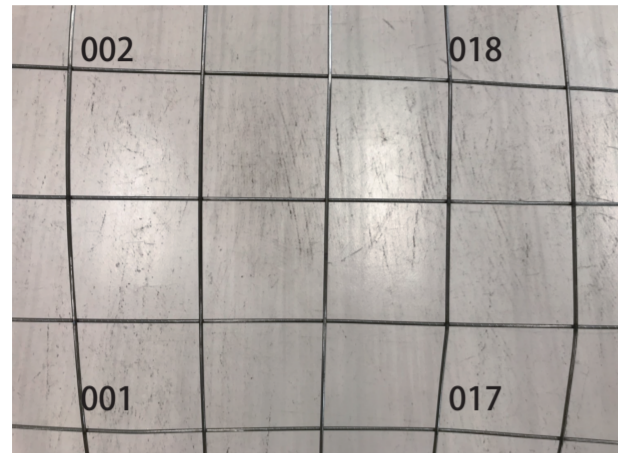
繋ぎ合わせた大きなメッシュに、球状の型を押し当てたり周囲を踏む事によって凸凹を形成しました。この工程を繰り返すことで山脈を形成しました。形態解析により得た最終モデルを形成するにあたり、施工工程でも柱位置や凸凹の高さ等の検討を行いました。形成した構造物に柱を立て完成しました。

形態解析の手順

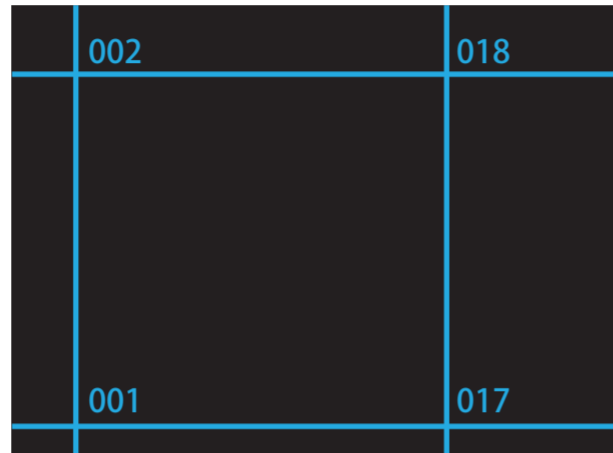
STEP 1 解析モデルの作成

メッシュを模した格子状の解析モデルを作成し、コンピュータプログラムを用いて安全率を算定します。10cm四方のメッシュをそのままモデル化すると、要素数が膨大になり解析時間が非常に長くなるため、30cm四方のメッシュに換算したグリッドを解析モデルとしました。

メッシュを構成する針金は直径 $D_{mesh} = 0.3cm$ なので、断面係数 $Z_{mesh} = 0.0026cm^3$ となります。解析モデルではこれを3本1組に換算し、断面係数 $Z_{model} = 0.032cm^3$ 、ここから導出される直径 $D_{model} = 0.69cm$ の値を用います。



メッシュ
直径 $D_{mesh} = 0.3cm$
断面係数 $Z_{mesh} = 0.0026cm^3$



解析モデル
直径 $D_{model} = 0.69cm$
断面係数 $Z_{model} = 0.032cm^3$

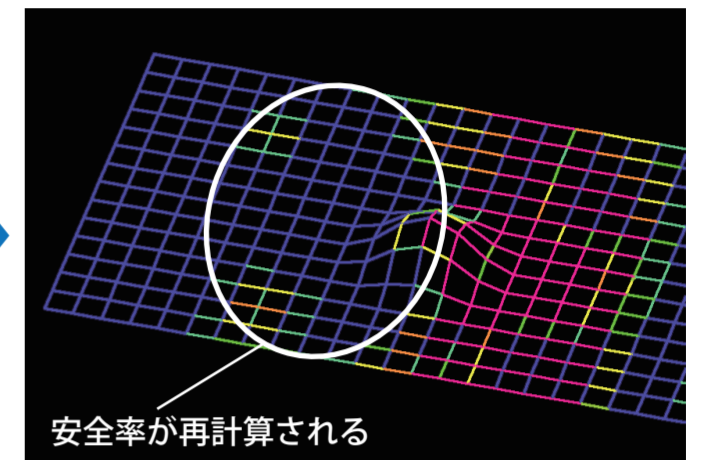
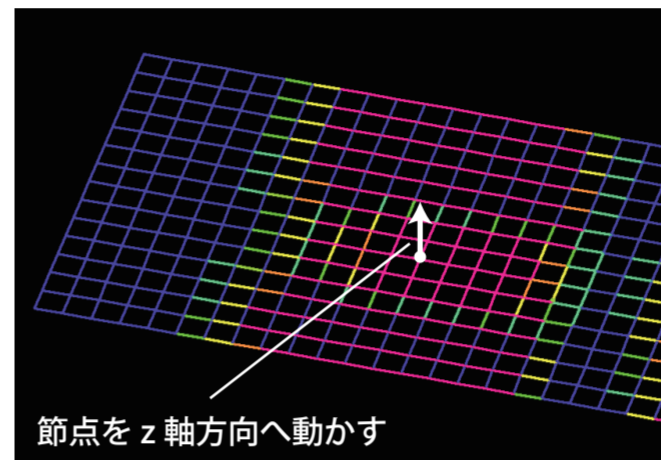
STEP 2 形状変更による最適化

使用したコンピュータプログラムでは、鉛直・水平荷重に対して骨組の応力から算出される各部材の安全率（次式）が色で表示されるため、骨組の状況を容易に把握することができます。

$$\text{安全率} = \frac{\text{部材の応力度}}{\text{部材の許容応力度}}$$

安全率 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
色表示

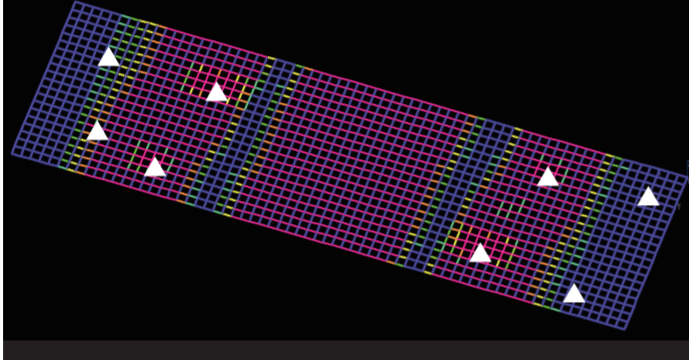
グリッドが交差する節点の位置を手動で変更し、全部材の安全率が1以下になるように試行錯誤を繰り返します。



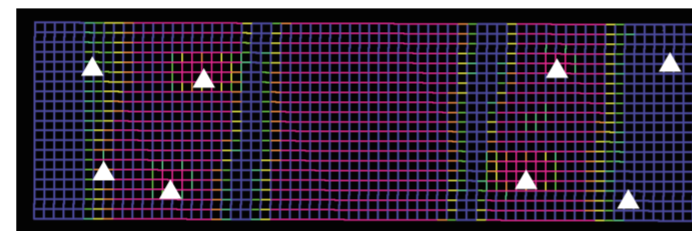
最適化プロセス

PHASE 1
変形方針の決定

初期形状 全体図



初期形状 上面図



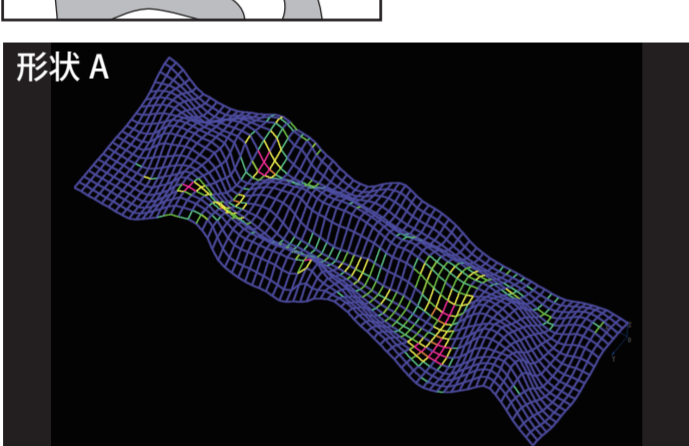
初期形状のフラットなモデルでは、柱（左図△で示した箇所）の周囲、及び柱間に赤が見られ、このままでは構造体として成立しないことがわかります。

原因としては、

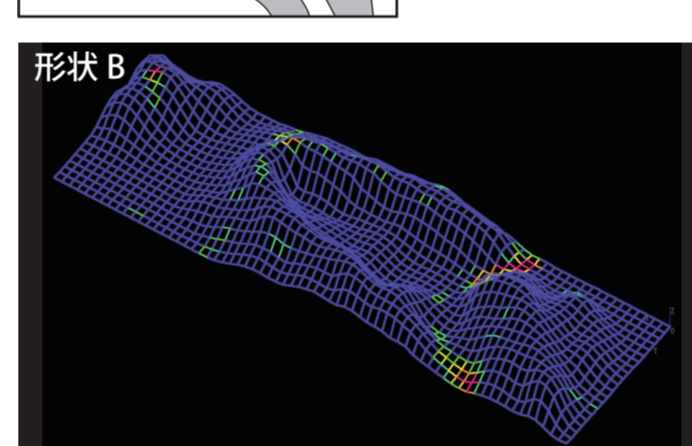
- ①柱の周囲に大きなモーメントがかかっている
 - ②柱間の中央部でも大きなモーメントが生じている
- ことが予想されるので、柱の周囲の応力を分散し、柱間を架け渡す山脈的要素を形状に取り込むことを方針とし、複数の形状A,B,C,Dを試し解析をしました。

PHASE 2
形状の模索

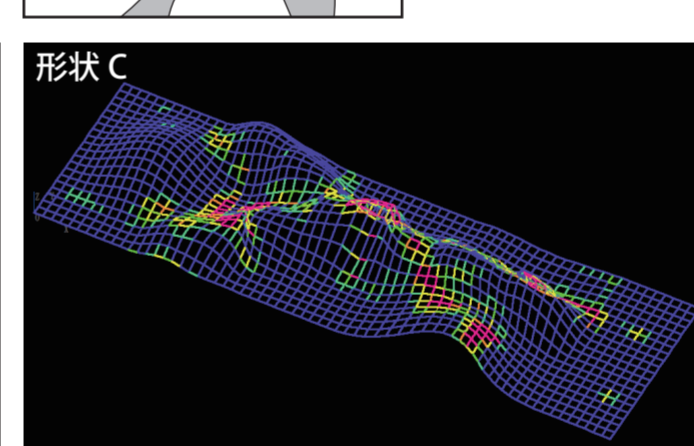
2つの山脈をY字型に深く食い込ませる



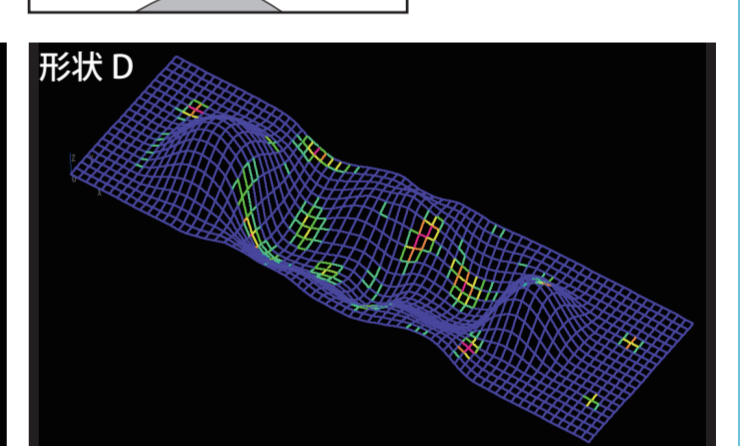
2つの山脈をY字型に少し食い込ませる



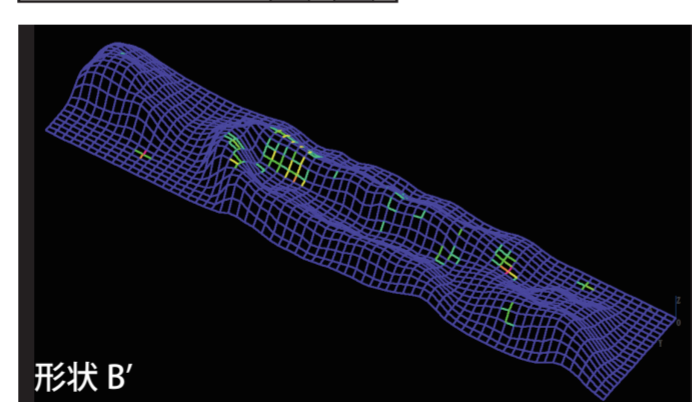
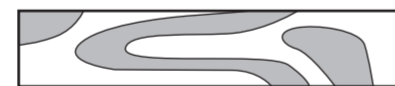
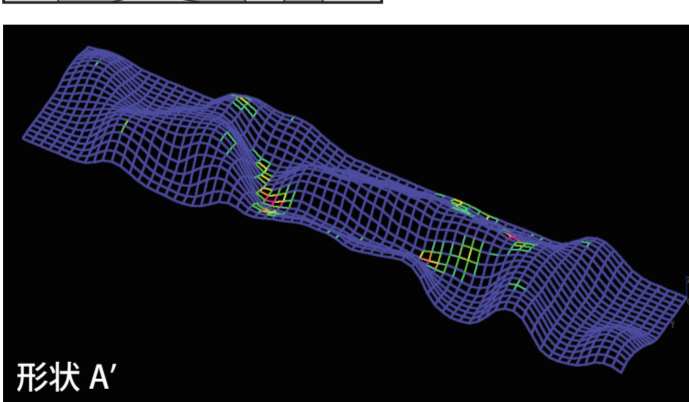
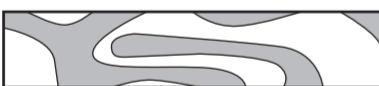
1つの山脈を2つに分岐させる



柱付近と柱間のサイドを盛り上げる

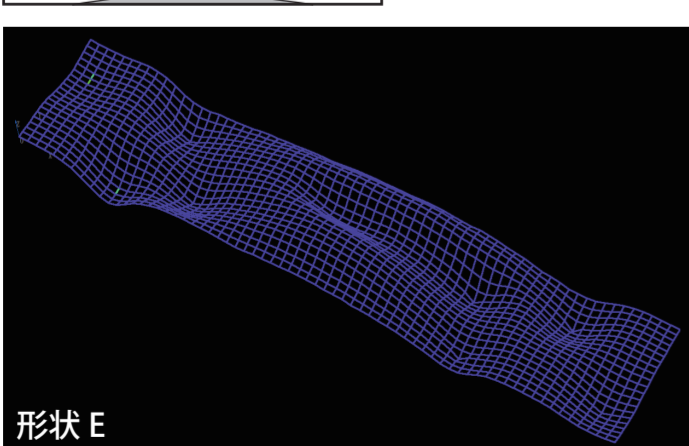
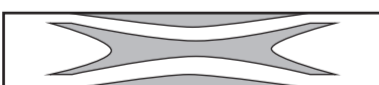


PHASE 3
実物とモデルの対応

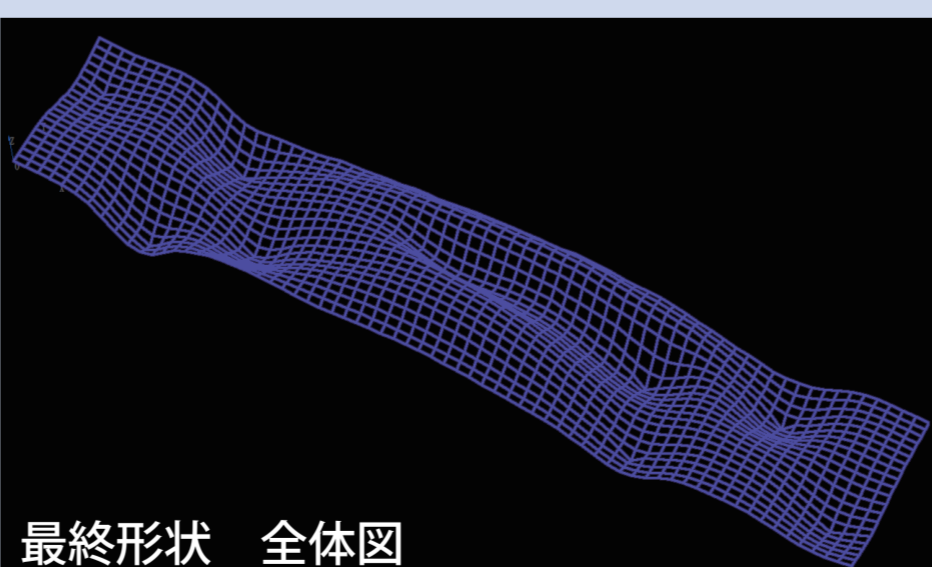


z軸方向に節点を大きく変形させると、周りの部材が極端に伸びてしまいました。実際のメッシュの変形時には部材が伸びることはなく、動かした節点に追従しながら周囲の節点がx軸・y軸方向に移動します。部材が伸びる現象は特に短辺方向に顕著にみられたため、短辺方向の長さを6mから4mへと縮小することで、あらかじめ部材を縮めておき、大変形時にも大きく部材が伸びることがないようにしました。この操作を、比較的赤の少なかった形状A、形状Bに適用しました。

PHASE 4
形状の決定と微調整

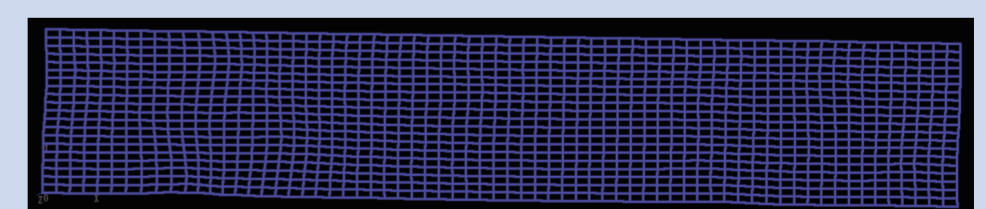


形状変化を通して、力学的にはアーチが重要であることが分かったため、柱間を結ぶクロスアーチを形状に取り込みました。また、柱部分をへこませることで、メッシュ全体が垂れる形状から、持ち上がる形状へと変化させました。

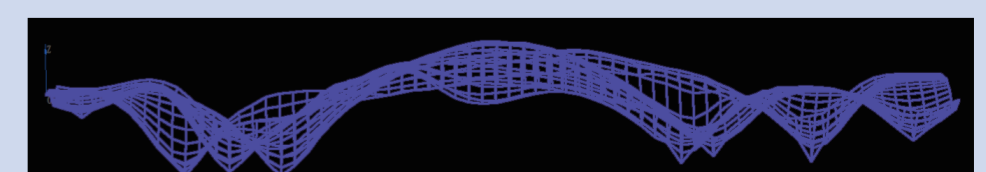


最終形状 全体図

形状Eの若干残っている柱周辺の緑色の部材を青色にするために、柱に集中している応力を分散させるように微調整を重ねた結果、メッシュ全体が青色となりました。



最終形状 上面図



最終形状 立面図

2次元スペクトル解析

スペクトル解析

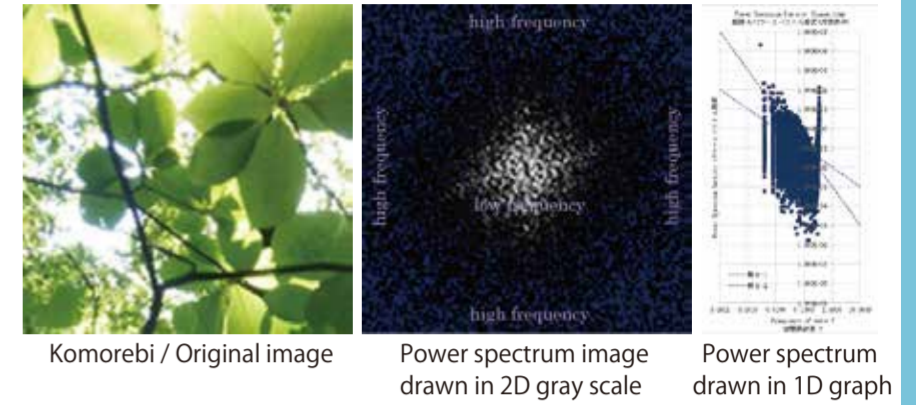
あらゆる風景は固有のスペクトルを持っています。私たちはそれぞれ好きな写真に2次元スペクトル解析を行い、そこから得られたスペクトルから複数のパターンを抽出しました。そして今回の制作物のさまざまな角度の写真解析し、どのパターンに近いスペクトルを持つか検討しました。

○2次元スペクトル解析とは...
画像のピクセルの色の値は、X,Y方向に並ぶ数値と捉えられます。その数値を波形と見なし、その「ゆらぎ成分」にフーリエ変換を行い、「パワースペクトル」を描く画像処理の手法です。
この手法によって、「ナチュラル」「快適」といった環境評価を物理現象として捕らえる試みがあります。

自然環境のスペクトル

スペクトル解析は、2次元画像に描く方法と、1次元グラフに描き方法があります。1次元スペクトルを指標にすると、「1/f ゆらぎ」がひとつのターゲットになることが知られています。

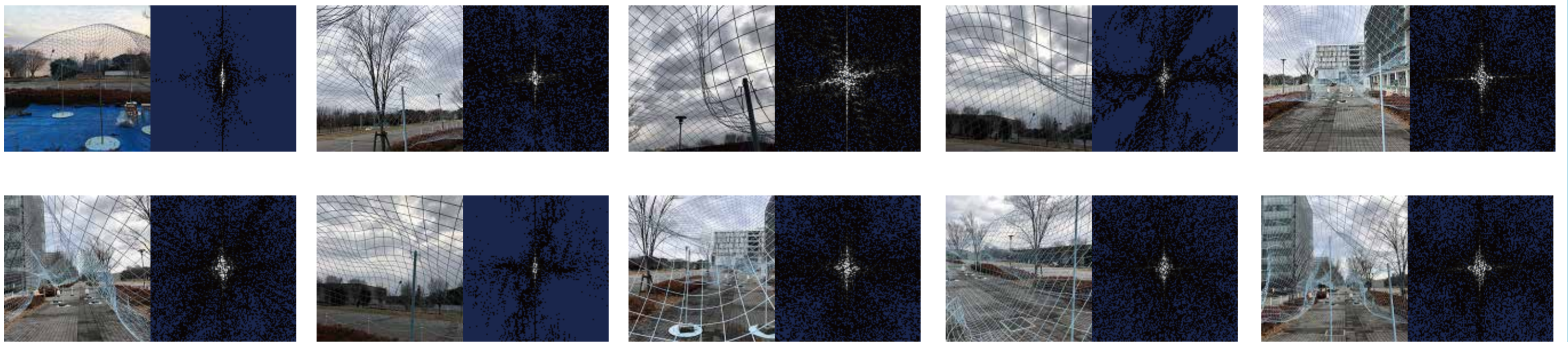
右図が「木漏れ日」の画像を用いたスペクトル解析の一例です。
環境要素に適用する事で、様々な環境を定量的に認識できる可能性があります。



建造物の解析結果

制作した建造物を様々な視点から撮影し2次元スペクトル解析を試みました。

その結果、全ての写真で『中央に十字架の形をした白色の模様が集結し、その白い模様を中心に、黒い模様が放射状に拡散している』傾向がスペクトル解析結果の画像から見られました。



作品のスペクトルと自然 / 建築 / 動物等のスペクトルとの比較

SPECTRE 1 / 花	SPECTRE 2 / 建築物	SPECTRE 3 / 雲	SPECTRE 4 / オーロラ	SPECTRE 5 / その他
<p>flower 1</p>	<p>architecture 1</p>	<p>cloud 1</p>	<p>aurora 1</p>	<p>other 1</p>
<p>flower 2</p>	<p>architecture 2</p>	<p>cloud 2</p>	<p>aurora 2</p>	<p>other 2</p>
<p>flower 3</p>	<p>architecture 3</p>	<p>cloud 3</p>	<p>aurora 3</p>	<p>other 3</p>
<p>花と作品との比較</p> <p>1の丸みのある花のスペクトルは丸い模様になっているため、建造物と似ていません。 2は、細い曲線が特徴的な花は建造物と近い伸びやかさを感じるが、スペクトルで見ると似ていません。 3は、建造物のスペクトルと似ており、複数の花が集まり、曲線のエッジが目立っていることが、建造物のメッシュと似ていたためだと推測できます。</p>	<p>建築物と作品との比較</p> <p>作品の画像はいずれも建造物のスペクトルと似ています。 メッシュが重なって強調されている縦のラインと、建物の縦ラインが似ているからだと予想されます。</p>	<p>雲と作品との比較</p> <p>雲の3つの画像とも建造物のスペクトルと似ています。 メッシュの作る緩やかな曲線と雲の形が似ているからだと考えられます。</p>	<p>オーロラと作品との比較</p> <p>オーロラの3つの画像も同じく、建造物のスペクトルと似ています。 メッシュの作る波とオーロラの作る波が似ているからだと予想できます。</p>	<p>その他と作品との比較</p> <p>1は、羽の曲線群がメッシュの曲線と似ているため、比較的スペクトルも似ている印象を受けます。 2は、強調された縦横のラインとメッシュが似ているため、スペクトルも似ています。 3は、葉脈とメッシュの曲線が似ているため、比較的スペクトルも似ている印象を受けます。</p>

強度試験

もともと降伏耐力を $F = 3.0 \text{ tf/cm}^2$ を仮定し入力していたが、ステンレスメッシュが強そうなので材料試験によってその降伏耐力を明らかにし、解析時の設定を修正した。

右図のような実験セッティングをした。

両端ピン支持として、中央曲げモーメントは $M = \frac{PL}{4}$ で求まる。グラフより降伏時の荷重は $P = 2.5 \text{ kgf}$ とし、 $L = 40 \text{ cm}$ を代入して、

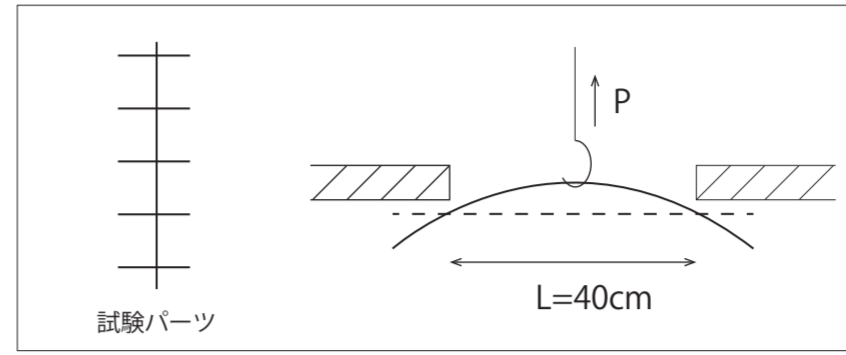
$$M = \frac{2.5 \times 10^{-3} \times 40}{4} = 0.025 \text{ tfcm}$$

ステンレスメッシュの直径 $D = 0.32 \text{ cm}$ より断面係数 Z は以下。

$$Z = \frac{\pi}{32} \times D^3 = 0.00322 \text{ cm}^3$$

よって、ステンレスメッシュの降伏耐力 F' は次式の値に修正される。

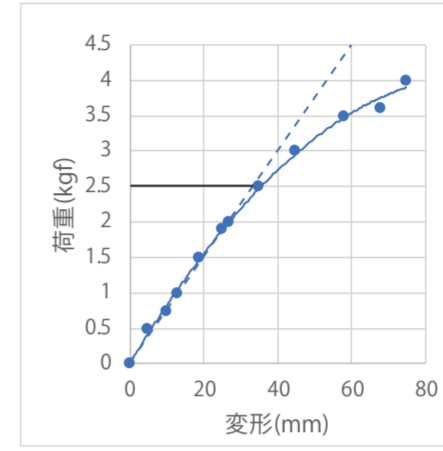
$$F' = \frac{M}{Z} = \frac{0.025}{0.0032} = 7.8 \text{ tf/cm}^2$$



材料試験のセッティング図



材料試験の様子

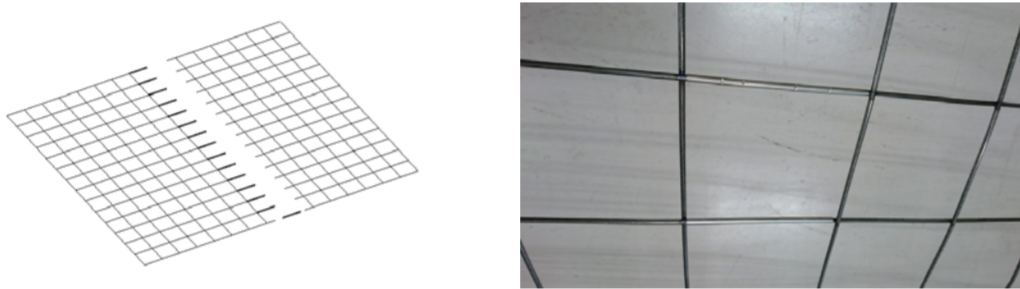


材料試験の結果

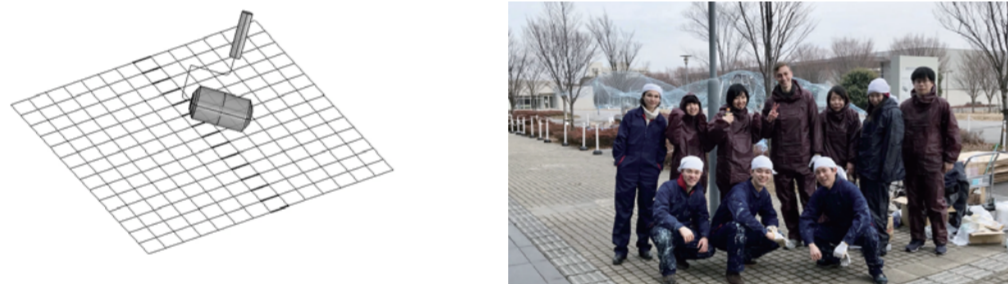
施工現場

施工手順

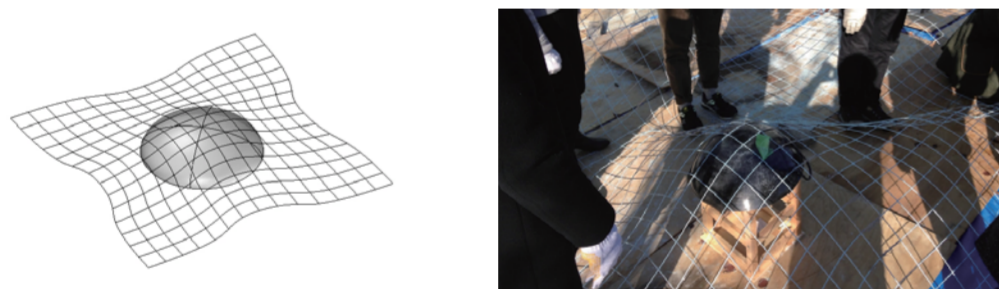
1. メッシュとメッシュを、金属のパイプで繋ぎ合わせ、大きな1枚のメッシュを作る。



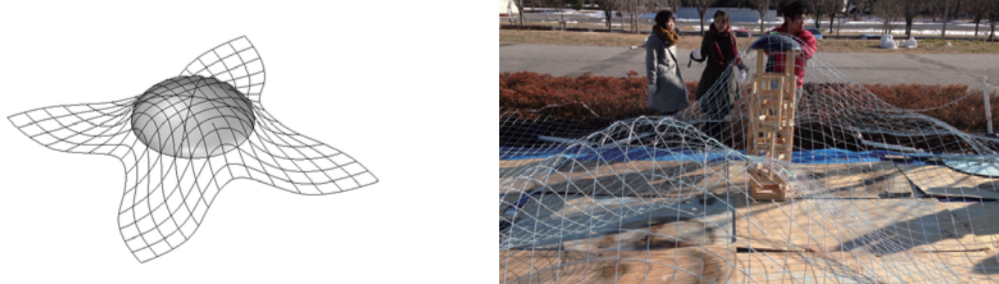
2. 1枚になったメッシュに、ペンキでムラなく着色する。



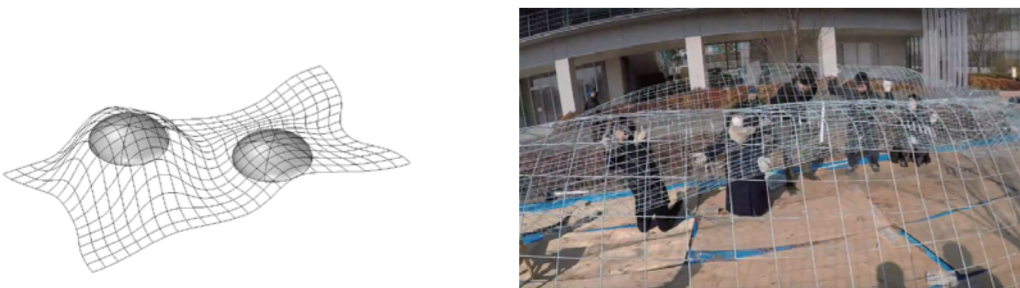
3. 計算した形状を作っていく。球形の型(中華鍋など)を使いメッシュを浮かせ、周囲を踏み凹ませて凹凸の形を作る。



4. 徐々に大きな山を作る。球形の型の下に置いた台を徐々に高くしていき、3. と同じ要領で凹凸の形を作る。



5. 山脈の形を作る。山脈の両端に球形の型を並べて、3. と同じ要領で凹凸の形を作る。ある程度の形が出来たら型を取り外し、前段階で付けた跡を基に成形する。



6. 柱を立てる。成形した構造物の形が崩れないように、慎重に柱を立て、完成。



工夫したところ

格子の変形

対角線方向の4隅の格子を菱形に変形する



山脈を強化

単調にならないよう、山に小さな凹凸をつける
四隅をむくって山の単一さを減らす



谷の作成

メッシュを裏返して山を形成し、元の面に戻すことで谷を形成

成型

椅子で届かない高さの山は、中央を棒で押し上げ左右から潰す
ペンチ二つを八の字に持ち、細かな歪みを修正する

ジョイント

網と網のジョイント部

長さは10cm。



施工時

両端をペンチでかきめる



針金補強

構造的に弱いところを補強。
紐でも補強した。



柱頭部

柱1本に対して針金2本で補強。
4点で支えている。

