東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2017 年度
修　士　論　文

しなやかな部材の大変形を応用した可変形態の設計手法
Design Methodology of Multi-transformable Structure Utilizing Large Deformation of Flexible Elements

2018 年 1 月 22 日提出
指導教員　佐藤　淳　准教授

澁 谷　　達 典
Shibuya, Tatsunori

ABSTRACT

Form of Elasticity

Free-form architecture is one of many main topics in contemporary architectural discourse owing to the development of computational technologies. One of the existing methods to achieve such forms is to bend the elements elastically during assembly process. Although this method can be used for elastic kinetic structures, it is seldom the case, and is often applied only partially on facade systems, neglecting its potential to alleviate many burdens of the current construction industry, such as excessive material usage and formwork. To extend the architectural design potential obtainable by elastic kinetic structures, this paper presents a fundamental design strategy of multi-transformable structure which fully employs large deformation of flexible elements to enable dynamic adaptability of the architecture to its environment. Using Kangaroo2, a solver based on Position-based dynamics, I developed a 3D modeling system to first understand the behavior of large deformation and to generate a numerically and graphically simulated form. Then, I tested and calibrated this system to ensure accuracy by comparing differences between various mock-up models and their digital models. Finally, a hybrid light-weight flexible structure using GFRP bones and stretchable membrane was realized as a contemporary tea house.

©ERINA UETA

目次

第 1 章 序 2

1.1. 研究背景

1.1.1. 建築表現の拡大と曲面成型

1.1.2. 部材の曲げによる立体成型法とその可能性

1.2. 既存のプロジェクト

1.2.1. 部材の曲げを利用した構造

1.2.2. 部材の曲げを利用した可変構造

1.3. 研究意義と目的

1.4. 論文構成

第 2 章 しなやかな可変構造と材料 10

2.0. 本章の概要

2.1. しなやかな可変構造

2.1.1. 可変構造

2.1.2. 基本構成

2.1.3. プレスタディ

2.2. しなやかな材料

2.3. 小結

第 3 章 シミュレーション 20

3.0. 本章の概要

3.1. 位置ベースシミュレーションの概要

3.1.1. 概要

3.1.2. Kangaroo2 と K2Engineering

3.2. 曲げ挙動のシミュレーション

3.2.1. 入力モデルと制約条件の設定

3.2.2. フレーム連結モデル

3.3. 膜の挙動のシミュレーションと形状変化

3.4. 小結

第 4 章　検証 48
4.0. 本章の概要
4.1. 部材政策
4.1.1. GFRP
4.1.2. 膜
4.2. 曲げ挙動の検証
4.2.1. 棒
4.2.2. フレーム
4.2.3. フレーム連結架構
4.3. 膜の挙動の検証
4.4. 小結

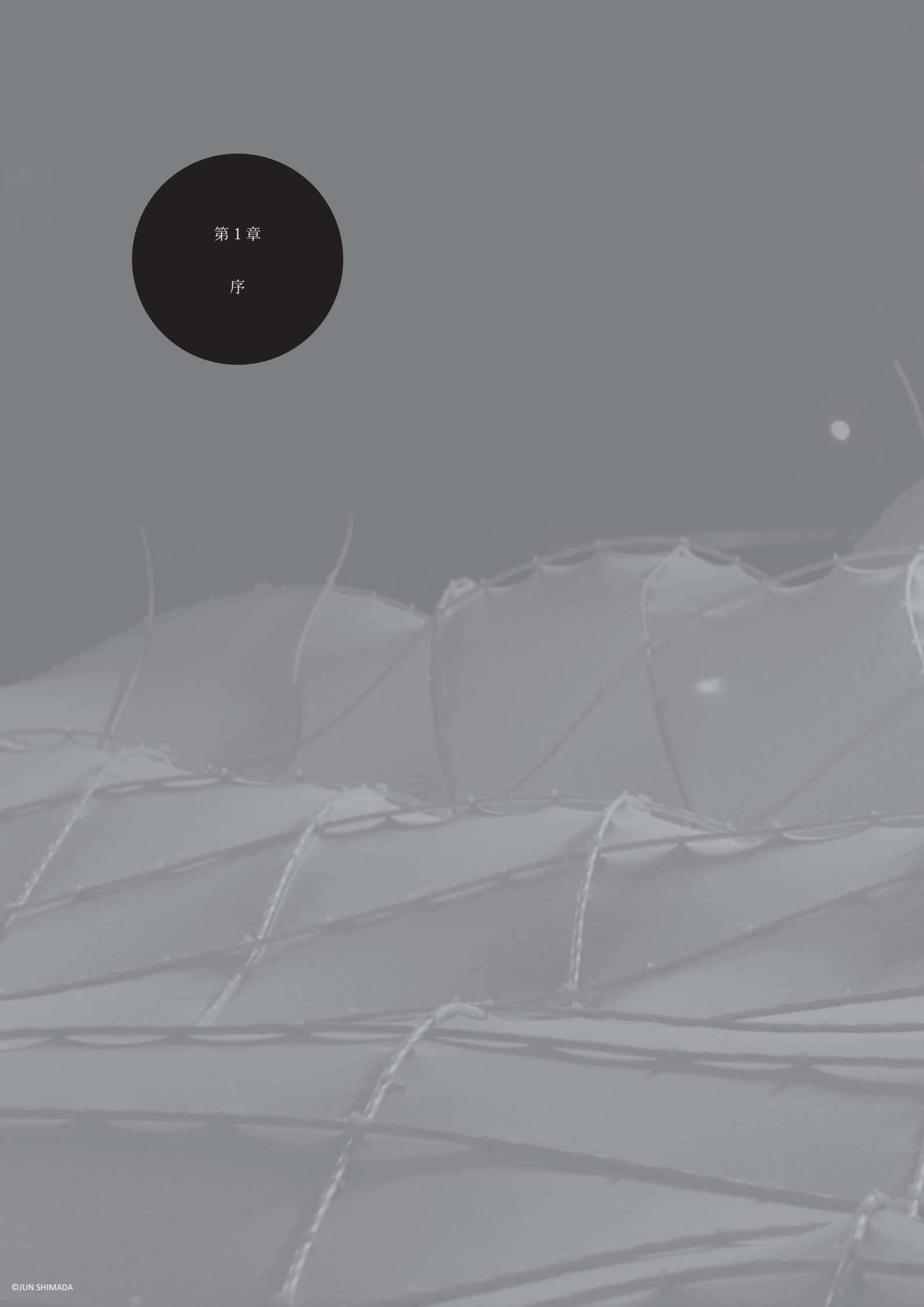
第 5 章 実践 80
5.0. 本章の概要
5.1. 設計
5.1.1. 設計条件
5.1.2. 提案概要
5.1.3. 形状決定
5.2. 制作
5.2.1. 概要
5.2.2. プレファブリケーション
5.2.3. 設営
5.3. 空間利用
5.4. 小結

第 6 章 総括 126
6.1. 結論
6.2. 課題と展望

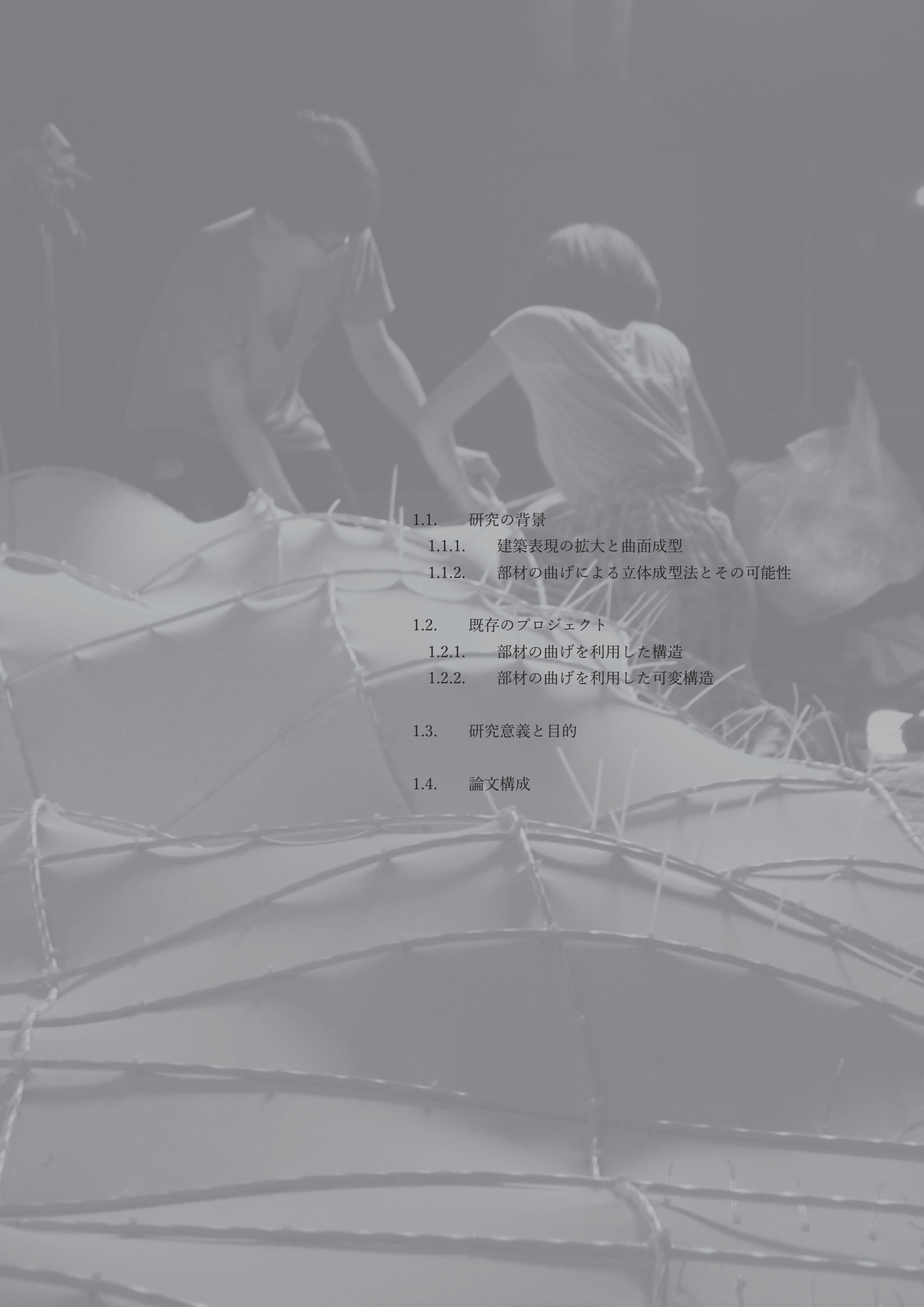
128
参考文献
図版出典
謝辞

第 1 章

序



©JUN SHIMADA



1.1. 研究の背景
1.1.1. 建築表現の拡大と曲面成型
1.1.2. 部材の曲げによる立体成型法とその可能性

1.2. 既存のプロジェクト
1.2.1. 部材の曲げを利用した構造
1.2.2. 部材の曲げを利用した可変構造

1.3. 研究意義と目的

1.4. 論文構成

1.1.　研究の背景

1.1.1.　建築表現の拡大と曲面成型

fig.1.1.1: Zaha Hadid Architects,『Heydar Aliyev Centre』(Baku, The Republic of Azerbaijan, 2012)

計算機の急速な高性能化・高速化に伴う 3DCAD や BIM といった建築設計支援ツールおよび解析ツールの発達は設計技術を格段に向上させている。特に、それらのデジタルツールと連携する Grasshopper や Dynamo といったヴィジュアル・プログラミング言語の普及は、デジタルデザインを本格化させ、アルゴリズムに基づいた形態生成・構造解析・環境解析などを加味した高度な設計に大きく寄与し確実に建築表現を拡張している。

中でも、(fig.1.1.1),(fig.1.1.2) に示されるような有機的で複雑な曲面を持つ建築物（以下、曲面建築）はその代表的な例であり、現代建築の議論におけるの主要なテーマの一つとなってきている。曲面建築はその伸びやかで躍動的な空間のシークエンスから公共施設に多く適用されており、コンペやプロポーザルでも頻繁に提案されるなど、その需要も増えてきている。

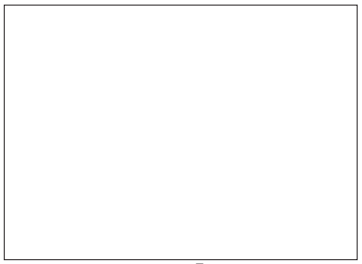


fig.1.1.2: 伊東豊雄 ,『瞑想の森』

曲面形状を成形する手法はいくつか存在する。例えば、伊東豊雄の代表的な作品である『瞑想の森』(fig.1.1.2,3) や『ぐりんぐりん』などのコンクリートを主構造とした曲面成形の場合は、複雑な型枠製作と配筋を施した上から、コンクリートを流し込むことでスムースな形状を成形することが一般的である [1]。また、鉄骨造による曲面成形の場合は、鉄骨を細かく組み合わせて躯体を構成し、その外皮にスムースなパネルで仕上げることで視覚的な滑らかさを表現する。使用する材料の違いによってもその成形法も異なってくるが、技術的には、いかなる形状の建築であっても実現することが可能になってきている。一方で、工期やコスト、職人不足の関係から曲面建築の現実性について議論されることが多く、建築の形状が複雑に特殊になればなるほど建築家が思い描く設計を実現するのは困難になることが多い。

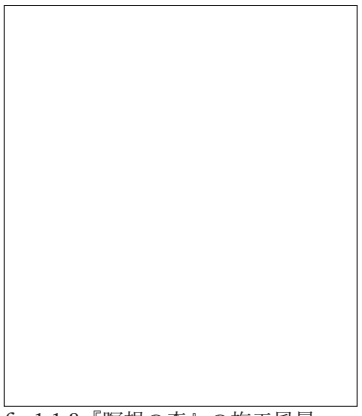


fig.1.1.3:『瞑想の森』の施工風景

1.1.2.　部材の曲げによる立体成型法とその可能性

以上のような曲面成形の手法の一つとして、材料のしなやかさを積極的に利用し、直線的あるいは平面的な部材を弾性

[1]10+1 web site 201605, 第 5 回：せんだいメディアテークをめぐって <http://10plus1.jp/monthly/2016/05/sasaki05-2.php>

範囲内で大きく曲げ変形させ、組み合わせていくことで3次元形状を構成する方法がある。これは、部材径を小さし、材料の特性を活用した構法的なコンセプトで、他の曲面成形の方法と比較し、軽量化が可能であり、曲面成形に必要になる型枠のような一時的な資材の削減や、建設に伴う環境負荷・建設費・建設期間の削減という側面でも優位性のある構法として考えられている[2]。

こうした施工法による建築物の起源は紀元前にさかのぼり、一部のヴァナキュラ建築の中で現れてきた。代表的な例は、マーシュアラブの葦の家（fig.1.1.4）があるが、彼らは、あたりに生い茂る葦を刈り、それら束ね、曲げ合わせていくことで、曲面を持つ居住空間をつくってきたと言われている（fig.1.1.5）[2],[3]。葦の家の形状は、一方向曲げのトンネルのようであるが、身近にある自然素材の特性を本能的に理解し、工夫することで生活に必要なシェルターを構築している。このように部材を曲げて組み合わせていくという曲面成型の手法自体の歴史は極めて長いものの、研究としての歴史は浅い。それは、部材の挙動をコントロールした上での安定した建築物の設計が、コンピュータのない時代には困難であったことに加え、適する材料がなかったことが大きな要因として考えられる。

現代においては、前述したように、デジタル技術の向上から、物体の挙動を加味した形状生成とその解析が技術的に可能となってきている。また材料性能の向上や新建材の開発などが進む現代においては、しなやかな材料で構成された部材を曲げて立体成型する手法は有意義であり、その利点を活かした曲面建築の設計が今後、より本格化していくポテンシャルがある。つまり、ユークリッド幾何学にとらわれない自由な形状の建築が、容易に実現できるようになってくる可能性が考えられる。

さらに、柔軟性のある部材を曲げて組み合わせ、拘束を与えていくことで、静的な構造を成形することが可能である一方で、部材の変形性能を構造物の可変機構に応用し、環境に対してアダプティブな構造を考えることも可能である[2]。本構法が持つこの側面もまた、他の曲面成型手法にはない特徴の一つとして挙げられ、しなやかさを持つからこそ可能となる新しい建築表現が期待される。

fig.1.1.4: 地域資源を束ねて曲げてつくられるマーシュアラブの葦の家

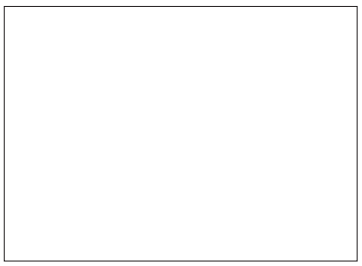


fig.1.1.5: 葦の家の建設の様子

[2]Lienhard J.,『Bending-Active Structures -Form-Finding Strategies using Elastic Deformation in Static and Kinematic Systems and the Structural Potentials Therein』, Stuttgart University, Doctoral Thesis, 2014
[3]トライブ-ログ 湿原に生まれた布 ～マーシュアラブの失われた刺繍2.～ <http://tribe-log.com/article/700.html>

1.2.　既存のプロジェクト

前節で記述した施工法を利用して実現した既存のプロジェクトについては、J.Lienhard の論文[2] の中でいくつか取り上げている。本節では、当文献を参照しつつ、それ以降（2014年以降）に実現したプロジェクトの調査も交え、これまでに実現されてきた代表的なプロジェクトを概観する。

1.2.1.　部材の曲げを利用した構造

○木材を利用したプロジェクト

木材の曲げ変形を利用し施工された建築構造の事例は 1960 年前後から出現する。当時は、コンピュータ解析の技術が発達していなかったことから、例えば、チェーンモデルのような懸垂曲線から得られる圧縮系の構造のような力学ベースまたは幾何学ベースのシェルなどの模型をもとに、そのターゲット形状に沿って、部材を曲げて組んでいく方式が多く取られている。

その代表例が、軽量構造の父 Frei Otto 自身の代表作品の一つでもある『Multihalle Mannheim』(fig.1.2.1) である。『Multihalle Mannheim』は、1964 年にドイツのマンハイムに建設された多目的ホールであり、長さ 50cm の短いマツの木片を曲げながら連結することで、力学シェルを実現している (fig.1.2.2)。木材によって組まれたグリッドシェルを覆うように PVC 膜が張られており、ホールのスパンは 60m × 60m、建築全体で 10000 平米以上の大空間を成立させている[2],[4]。

また、細長い部材でなく板材を曲げ合わせて空間構築した事例もある。Buckminster Fuller による『Plydome』(fig. 1.2.3) は、1958 年に韓国で建設された協会であり、直径 11.9m の半球をターゲットとして、複数の平らな合板に一方向曲げを加え、重ね合わせていくことで実現している[2],[5]。

昨今では、解析技術の発達からデジタルデザインの枠組みの中で扱われるようになり、その現象的な素材の振る舞いを考慮した設計が提案・議論されるようになってきた。その端緒を印象付ける事例がドイツの Stuttgart University で製作された『ICD/ITKE RESEARCH PAVILION 2010』(fig.1.2.4) で

fig.1.2.1:
Frei Otto『Multihalle Mannheim』

fig.1.2.2: 力学的に有効な懸垂曲線をベースとし、木を曲げて作られた大スパンシェル構造

fig.1.2.3:
Buckminster Fuller『Plydome』

[4]Boyner B., et al.,『Mannheim Multihale Strained Grid』, CEE463 course, "A social and multi-dimensional exploration of structures" , Fall 2012., Evolution of German Shells<http://shells.princeton.edu/Mann1.html>
[5]Fuller, R. B.『Ideas and Integrities A Spontaneous Autobiographical Disclosure』(1969)
[6]ICD Institute for Computational Design and Construction, ICD/ITKE Research Pavilion 2010<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458>

ある。この事例では、設計から制作までデジタルツールを用いて行われている。約 10mx10m の大きさの構造体を構成する 80 のプレートはすべて形状が異なるが、産業用ロボットアームによって正確にプレカットされた 6.mm の薄い合板を曲げながら、環状に組わせてドーナツ状の空間を構築している。設計においては隣り合う合板との接合位置と敷地への適合性を主なパラメータとして FEM による解析を通して形状決定を行っている [2],[6]。プレート部材を曲げて組み合わせる時、その接合部分の処理が非常に大きな課題の一つであるがそれをコンピュータシミュレーションと、ロボットによる精度の高いファブリケーションによって成立したものとして、制作システムの可能性を提示する事例である。

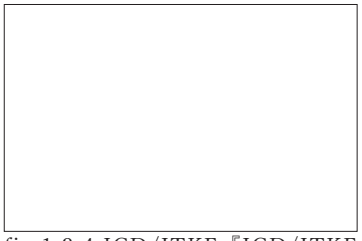


fig.1.2.4:ICD/ITKE『ICD/ITKE RESEARCH PAVILION 2010』

fig.1.2.5:Vo Trong Nghia『Bamboo Ceremony Dome in Son La』(2015)

fig.1.2.6:The Chinese University of Hong Kong School of Architecture『ZCB Bamboo Pavilion』(2016)

○竹を利用したプロジェクト

地域の竹を構造材として用い、そのしなりを活用し、風土に適合した美しい現代的な建築の事例も現れてきている。

ベトナムの建築家 Vo Trong Nghia の作品には、地域素材である竹のしなやかさ多用したプロジェクトが多々見られ、そのひとつである『Bamboo Ceremony Dome in Son La』(2015) (fig.1.2.5) では、最大 283 ㎡を覆う高さ 15.6m の現代的なカフェ空間を細い竹を曲げて組み合わせていくことで実現している。

また、香港中文大学建築学院が設計した『ZCB Bamboo Pavilion』(2016)(fig.1.2.6) は、350 ㎡を覆う最大スパン 37m のイベントスペースを実現している。

○ FRP

近年、竹や木材を用いたプロジェクトだけではなく、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）や CFRP（炭素繊維強化プラスチック）などの複合材料である FRP のしなやかさを利用したプロジェクトも研究・教育レベルで実現してきている。

その代表的な例として、ITKE(Stuttgart University) と HTF Stuttgart による共同のプロジェクトである、『Umbrella for Marrakech』(fig.1.2.7) が挙げられる。この事例は、ワークショップをベースとしたプロジェクトで、漏斗状の日除けとしてモロッコのマラケシュ大学の広場に設置された、11m 角、高さ 5.5m のスペースを覆う膜屋根である。構造は PVC 膜と GFRP の混構造であり、構造上部は建物に対してアンカーさ

[7]Vo Trong Nghia Architects, Bamboo Ceremony Dome in Son La <http://votrongnghia.com/projects/bamboo-son-la-ceremony-dome/>

[8]ArchDaily, ZCB Bamboo Pavilion / The Chinese University of Hong Kong School of Architecture <https://www.archdaily.com/800173/zcb-bamboo-pavilion-the-chinese-university-of-hong-kong-school-of-architecture>

[9]str.ucture, BENDING ACTIVE MEMBRANE ROOFING MARRAKECH ITKE UNIVERSITY OF STUTTGART, 2011 <http://www.str-ucture.com/en/what/research-and-development/reference/bending-active-membrane-roofing-marrakech-itke-university-of-stuttgart-2011/>

れ、中空の部分にはGFRPのロッドが挿入された引張系の構造である。ここでは、GFRPは構造を補強し、建物に対する負荷を減らす役割を担っている[2],[9]。

同様に、CITAの『Hybrid Tower』(fig.1.2.8,9)も膜とFRP材の混構造であり、GFRPを3Dプリントされたジョイント材によって連結させていき、高さ7mのタワーを実現した。いずれのプロジェクトもFEMによる非線形解析を通して、形態生成と挙動のコントロールをしているが、後者の例では、物理シミュレーションによる解析を設計初期段階で行い、設計プロセスにおいて精度の違うシミュレーションを使い分けている[2],[9]。

また、筆者も製作に携わった東京大学建築学専攻T-ADSのチームによる『Weaving Architecture』(fig.1.2.10,11)も同様にFRPと膜の混構造であり、仮設建築として一時的に東京大学本郷キャンパス内に展示された。フラットに組まれたグリッドをゆがませ立体を成形する要素として、伸縮膜が導入され、起伏のある不思議な形状を生み出した。このプロジェクトでは、物理シミュレーションによる形態生成とモックアップスタディによる検証を繰り返すことによって設計が進められた。

以上のように、FRPを用いた事例は、膜材との相性がよく混構造として設計されることが多い。また、自然素材に比べた例と比較しても、繊細な造形多く見られることが特徴として挙げられる。一方で大規模なプロジェクトは、いまだ見られず、現段階では仮設的な建築として、FRPを用いた構造の可能性が検討されている段階と考えられる。

1.2.2.　部材の曲げを利用した可変構造

前述したように部材の曲げを応用することで、部材を可変なエレメントとして扱うことで、例えば、環境に適応しながら様態を変えることができる建築を考えることができるが現状そういった事例は少ない。

確認されたプロジェクトのなかでも規模の大きいものは、2012年に韓国の麗水市で開催された万国博覧会にて、提案された『One Ocean, Thematic Pavilion Expo 2012』(fig.1.2.12)である[2],[11]。海に向く建物の一面に配置されたGFRP製の108枚の独立したプレートは、プレートの支持角度の変化に

fig.1.2.7:ITKE,HTF Stuttgart『Umbrella for Marrakech』

fig.1.2.8:CITA『Hybrid Tower』

fig.1.2.9:『Hybrid Tower』の内部構造

fig.1.2.10:T-ADS『WeavingArchitecture』

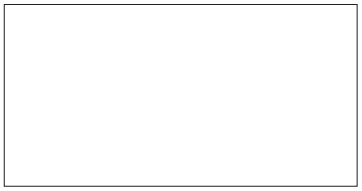
fig.1.2.11:『WeavingArchitecture』の制作過程

[10]Deleuran A. H., et al,『The Tower: Modelling, Analysis and Construction of Bending Active Tensile Membrane Hybrid Structures』IASS, Symposium 2015, 2015
[11]ArchDaily, One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012 / soma <https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma>

よって、ねじ曲がり、複数の開閉状態を作ることができる。最長のプレートが 13m、最小で 3m、9mm の厚さのプレートは長さにばらつきがあるもののコンピュータによってシミュレーションされ、その挙動が制御されている。設置角度をコントロールする極めてシンプルな手法で効果を生んでいる。

例として挙げた『One Ocean, Thematic Pavilion Expo 2012』は、ドイツのエンジニア Jan Knippers と同氏の研究室である ITKE を中心として技術的な開発がすすめられたが、彼らは、自然の中の原理を参照することによって『Flectofin®』(fig.1.2.13)[12],[13] という One Ocean とは異なる可動ルーバーも実現している。和名では極楽鳥花として知られるストレリチアは、つぼみの端部にある突起のような機構を下に下げることでつぼみを開き、受粉をする。この原理は、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）および GFRP のプレートを主構造として中央に配置し、それに対して付属する二枚の膜がバーを曲げると膜が開閉するという機構に翻訳され、ファサードの遮光部材として開発された。高層ビルを取り巻くように配置するようなアプリケーションも提案している [13]。

前記した二つの例はアクチュエータを用いて強制的に変異させることよって実現したプロジェクトであるが、そのような電力を用いずに可変性を獲得するようなアイデアも提案されている。ICD（Stuttgart University）よって提案された『HYGROSKIN』(fig.1.2.14)[14] では、マツカサの湿度変化による形態変化の原理を取り入れたアイデアであり、と USCSchool of Architecture の Doris Sung を中心として提案された『Bloom』(fig.1.2.15)[15] は、2 枚の金属を張り合わせたシートにおける表裏の熱膨張の差を利用することで金属フィルムがしなるという提案である。どちらもパビリオンスケールの構造物を実際に設計しており、自然の流れや原理に追従しながら変化する不思議さが見受けられる。



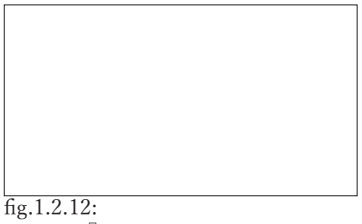


fig.1.2.12:
SOMA『ONE OCEAN,Thematic Pavilion EXPO』(2012)

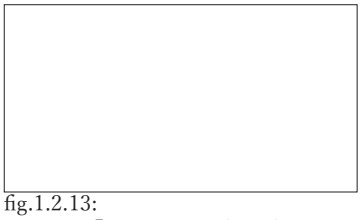


fig.1.2.13:
ITKE 他『Flectofin®』(2012)

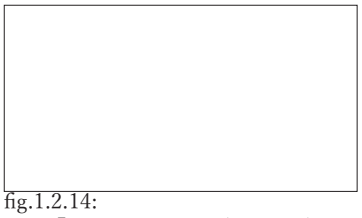


fig.1.2.14:
ICD『HYGROSKIN』(2011-13)

fig.1.2.15:
Doris Sung 他『Bloom』(2012)

[12]ITKE, University Stuttgart, Lienhard J., et al,『flectofin®, A Hinge-less Flapping Mechanism Inspired by Nature』
<www.itke.uni-stuttgart.de/download.php?id=486>
[13]Schleicher S,『Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design, Transferring Bending and Folding Principles of Plant Leaves to Flexible Kinetic Structure』, ITKE, Stuttgart University, Doctoral Thesis, 2015
[14]ICD, HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion
<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>
[15]DOSU Bloom
<http://dosu-arch.com/bloom.html#>

1.3.　研究意義と目的

背景では、デジタルツールの発展に伴う建築表現の拡張の一端として曲面建築が普及しているという状況に対して、しなやかな部材の曲げを利用して組み合わせることによって曲面成型する施工法が持ち合わせるポテンシャルについて以下のように述べた。

・構造体の軽量化につながる
・型枠などの一時的な建築資材や施工期間の削減につながる
・柔軟性を可変機構に応用したアダプティブ構造の可能性

また、既存のプロジェクトを概観し、部材の弾性曲げを積極的に応用した構造は、様々な形で大きいものから小さいものまで実現されてきている。また挙動をコンピュータ解析で、形状をコントロールし設計することが可能になってきている様子を伺えた。このように､材料の情報なども考慮したうえで、高い精度で複雑な形状をコントロールすることが、デジタルファブリケーションにおける一つの関心事であり、教育現場で多く取り扱われていることから曲げを用いた構造はその良い題材であることがわかる。

しかし、可変構造としてはいまだに実例が少なく、現存するものはいずれも独立したプレートを並べることで構成される局所的なファサードの開閉動作に終始し、建物全体がダイナミックに変化し、多様な空間を生み出すというような提案はなされていない。建築の柔軟性が求められている今日において、環境や状況に適応しながらその形態を多様に変容できる構造物が実現できれば、今後、より空間の可能性が拡大していくことが期待されるため、その意義は大きい。

以上から、本研究ではしなやかな部材の大変形を応用した複数の形状に可変な形態、人間と外環境とをつなぐ新しいインターフェースの実現を目的に、その基礎的研究として次のことを行う。

・構造システムの一例の提案
・シミュレーションシステムの構築とその精度の検証
・実施設計での実践と提案する架構の可能性と実現性の考察

1.4.　論文の構成

○第 1 章
第 1 章では、本研究の背景を述べ、既往の研究を整理と研究の意義の確認を行い、研究の目的と方法について記述した。

○第 2 章
本研究で対象とする基本構成を提案し、構造体を構成するために適した材料の検討を行う。

○第 3 章
位置ベースの物理シミュレーションによって部材の曲げ挙動および膜の伸縮挙動を再現する方法を解説し、それを応用し、可変構造のシミュレーションシステムの構築を行う。

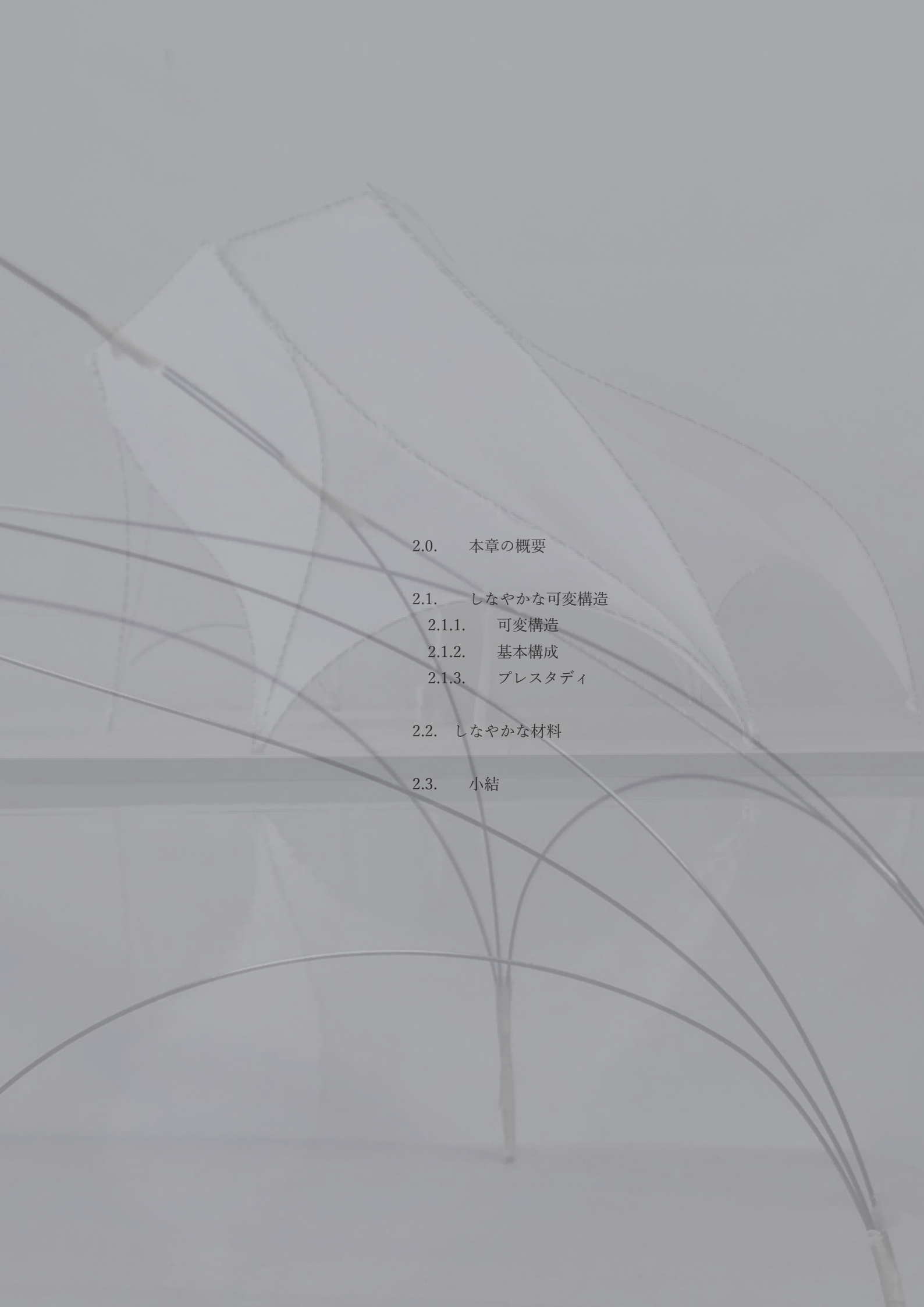
○第 4 章
第 3 章で提案したシミュレーションシステムの精度を検証するため小模型との実測比較を行う。

○第 5 章
以上のシミュレーションシステムを実施プロジェクトにおいて実践的に活用し、その有用性を評価する。また、実施物を通して、提案する架構の可能性と実現性を確認する。

○第 6 章
本研究の総括として、結論と今後の研究課題および発展性について記す。

第 2 章

しなやかな可変構造と材料



2.0. 本章の概要

2.1. しなやかな可変構造
2.1.1. 可変構造
2.1.2. 基本構成
2.1.3. プレスタディ

2.2. しなやかな材料

2.3. 小結

2.0.　本章の概要

本章では、しなやかな部材を構造部材として扱い、複数の形状にダイナミックに変形可能な曲面形態の構成法の一例を提案し、模型によるプレスタディを通してその可動性と特徴を確認する。続いて、構造体を構成する材料として適したものの検討を行う。

2.1.　しなやかな可変構造

2.1.1.　可変構造

○剛体同士の回転動作による可変機構

既存の可変構造の代表的な例としては、全天候型スタジアムなどの開閉式の大屋根や『the Syddansk Universitet communications and design building』(2014)（fig.2.1.1）[16] や『Al Bahar Tower』(2012)（fig.2.1.2）[17] のようなエネルギー的側面から環境を制御することを目的とした開閉式のファサードが挙げられる。通常、建築の一部を可動なものとして扱う場合、その可動機構のほとんどがヒンジを介した剛体同士の回転動作（あるいはスライド）によって与えられ、動力を与えることで変形する。このよに変形しない物体がジョイントされた状態はリンクと呼ばれ、リンクが複数に組み合わさり、一つのリンクの変形に対して全体系が変形するような機構はリンクメカニズムと呼ばれる。このような可動機構の利点は、(fig.2.1.3) に示す概略図のようにエネルギーが回転に変換されるため、構造体に大きな変形を与えることができ、変形動作を把握しやすいことなどがある。

一方で、変形動作が可能な方向への制限が大きく、複数の状態に変形することが困難である。また、ヒンジ部分が肥大化し、収まりやデザイン的な観点から好ましくないものになってしまうこと、機構の維持に対する定期的なメンテナンスの必要性により可動部が多くなればなるほど、維持費も増大することなど、技術的な課題は多い。実際に、2001 年に 451 億という莫大な費用をかけて建設された豊田スタジアムは、可動開閉式の大屋根を持つことでも有名であるが、豊田市は修繕費の問題からその大屋根の開閉機能の運用を取りやめている [18]。

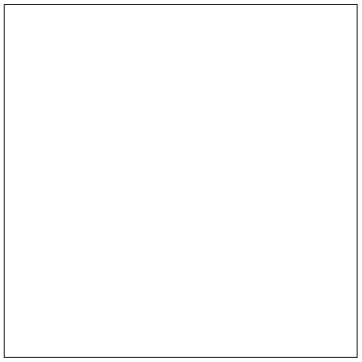


fig.2.1.1: the Syddansk Universitet communications and design building, 2014

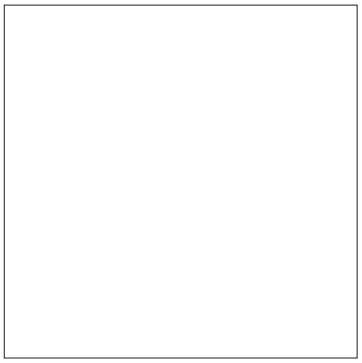


fig. 2.1.2: Al Bahar Tower, 2012

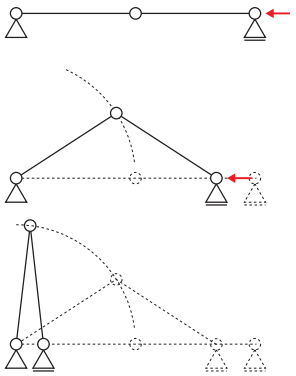


fig.2.1.3:
リンクメカニズムによる挙動

[16]dezeen, Henning Larsen's university building has a facade that moves in response to changing heat and light <https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/>

[17]e-architect, Al Bahar Towers, Abu Dhabi <https://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi>

[18] 日本經濟新聞，豊田スタジアムの屋根、撤去も検討　修繕費の削減狙い，2015/3/10 付 <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO84128430Z00C15A3000000/>

可変性・可動性という建築構造物の柔軟性は、現代の建築にみられる一つの特徴としてとらえることができるが、いまだそのような事例は少ないのは、以上のような要因が影響していると考えられる。

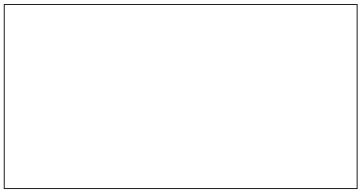
○部材のしなやかさを利用した可変機構

上述した剛体同士の回転動作による可変機構に対して、弾性体の変形を利用したコンプライアントメカニズムと呼ばれる可変機構がある[2],[19]。コンプライアントメカニズムでは、動力を部材自体の変形に変換し伝達することで物体を可動にする。(fig.2.1.4)[20]のようなプライヤやハサミといった小さいスケールでの展開が多くみられる中で、前述したように建築のような大きいスケールに利用した事例もみられるようになってきた[13],[21],[22]。前章で取り上げた『One Ocean, Thematic Pavilion Expo 2012』(fig.1.2.12),(fig.2.1.5)[22]では、柔軟なプレート部材を建物の外皮として配列し、各プレートを拘束する上下の2辺の支持部分の角度を変えることで部材中央部に発生するたわみのずれを、ファサードの開閉システムとして利用している。このメカニズムは、部材の材料性能に大きく依存するため回転動作のような極端な変形を苦手とするが、部材の断面形状によっては複数の方向に柔軟に変形し対応できるポテンシャルを持つ(fig.2.1.6)。

また、ジョイントを設けない機構であるため、部材数や部品数を削減することができ、建物全体の重量自体も減らすことや、がたつきや騒音のないスムースな変形も可能である。これは、同時に可変機構の潤滑などのメンテナンスが不要であることを意味し、可動物実現の課題である維持管理費の削減につながるものとして期待される。

○まとめ

以上の対立する二つのメカニズムの特徴を簡潔にまとめると、剛体の回転動作の場合、物体を大きく変形させる点で有利であるが、変形の方向に対して制限がある。他方、コンプライアントメカニズムは、極端な変形が苦手であるが、複数の方向に変形できる可能性があるため、多様な変形を生むためには有効である。またコンプライアントメカニズムを積極的に取り入れることで、可動構造が持つ複数の課題を解決することが可能であることが予想される。



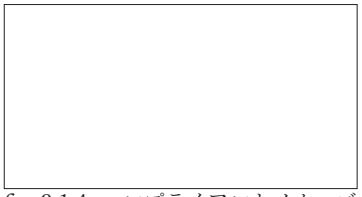


fig. 2.1.4: コンプライアントメカニズムを利用したジョイントを持たないプライヤ

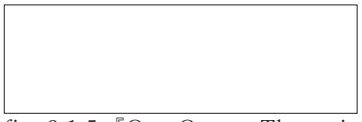


fig. 2.1.5:『One Ocean, Thematic Pavilion Expo 2012』の開閉システム

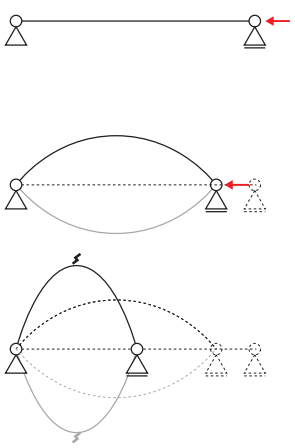


fig.2.1.6: 弾性体の大変形による挙動

[19] 津田勢太,『コンプライアントメカニズムを利用した建築構造の力学特性と最適化による生成手法』,広島大学,博士論文,2013
[20]Ion A., et al.『Metamaterial Mechanisms』, In Proceedings of UIST'16. Full Paper. pp. 529-539
[21]Takahashi K., et al.,『Scale effect in bending-active plates and a novel concept for elastic kinetic roof systems』, IASS, 2016
[22]Knippers J., et al『KINETIC MEDIA FAÇADE CONSISTING OF GFRP LOUVERS』,CICE2012, 2012

2.1.2.　基本構成

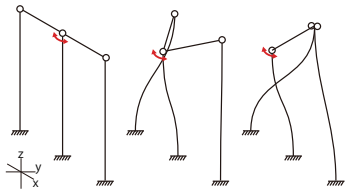


fig.2.1.7:
フレームの回転→曲げの挙動

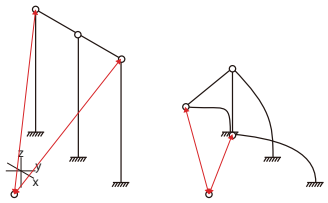


fig.2.1.8:
フレームの曲げ→回転の挙動

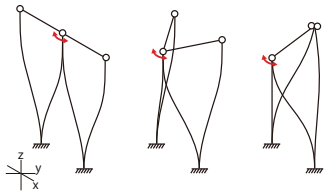


fig.2.1.9:
フレームの回転→曲げの挙動

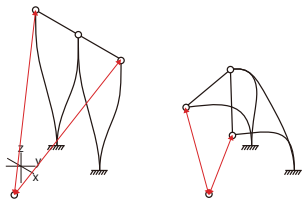


fig.2.1.10:
フレームの曲げ→回転の挙動

○原理

以上から本論文では、コンプライアントメカニズムを構造部材として適用し、大きな変形を与える要素として回転動作を可能とする機構を取り入れることで、ダイナミックかつ多様な形状に変形することができる形態の基本構成を提案する。

まず、(fig.2.1.7-10) に示すような柔軟性のあるフレームが連結されたモデルにおいて部材頂部中央が回転可能な状態のモデルを例として考える。ここでは､図の水平部材を梁と呼び、垂直部材を柱と呼ぶ。構造の下部を固定した状態で、共有する柱の軸回りに 0° から 360° の間で回転することができ、その角度の変化に伴って、発生する力が柱に伝わり、変形する。ダイナミックな変位に対して構造全体の形状を変化することで安定する形状に移行する仕組みであることがわかる。

また (fig.2.1.8)、(fig.2.1.10) のように構造がある方向に対して幾何学的に弱い場合、ケーブルなどによりその方向に引き寄せ、構造体全体を曲げ倒すような変形も考えることができるが、本論文では主に回転動作に着目した可変形態を考える。

○応用

以上を応用し、(fig.2.1.11) に示す構成によって可変形態を構築する手法を提案する。

①しなやかなフレームの両端部を束ねる。
②フレームを環状に配置する。
③隣り合うフレーム同士を部材軸周りに回転可能なヒンジとして連結し、上部に開口を持つ架構を構成する。
④開口部分の開閉動作とそのパターンに応じて、部材が CM として機能し、全体形が変化する。

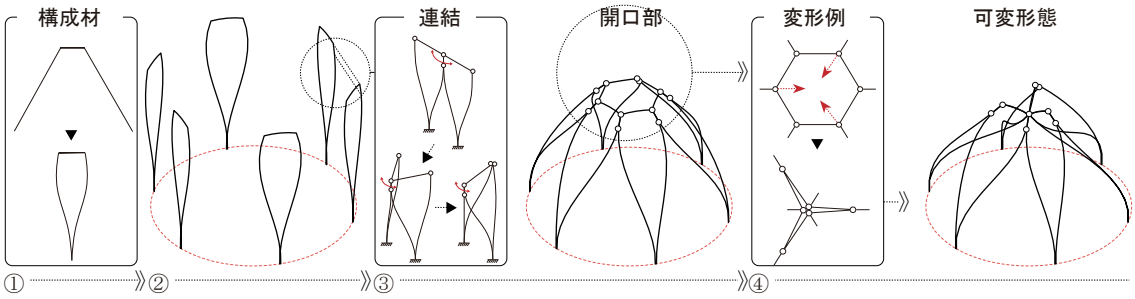


fig.2.1.10: 架構の構成例

2.1.3.　プレスタディ

○ピアノ線模型

以上の方法で構成される可変形態を小模型によって再現し、その挙動を確かめる。模型はピアノ線を部分的に折り曲げて、MDF ボードに挿入することで組み立てた。

まず、(fig.2.1.12-14) に示す模型は、同じ長さのフレームを環状配置し構成したもので、それぞれ、4 フレーム、6 フレーム、8 フレームにより構成されている。いずれの模型も上部の開口部分を回転動作により開閉し全体形状を変形をすることができた。開閉操作において各部材は荷重―変形の関係に極致を持たず、スナップスルー現象を起こさないため、形状を変形させても結束する力を開放すると元に戻る。また、架構上部を押し下げていく（曲げ―回転）動作は、それぞれで行うことができたが、4 フレームの模型のみスナップスルー現象が発生し、そのまま安定形となった (fig.2.1.12 右)。

また、(fig.2.1.15) は、異なる長さのフレームを交互に配置した六角形のモデルであるが、上部の開口を開いた状態で、安定せず､すぐに④ -B または④ -C の形状に移行した。これは、長さが違うフレームを交互に配置したことによって、長いフレームが隣り合う二つの短いフレームによって大きく曲げられ、そのエネルギーを分散させようと左右どちらかに回転することによって生じていると考えられる。

(fig.2.1.16,17) は、フレームの長さに偏りを持たせて配置した六角形の偏心モデルであり、部材の長さを調整し開口の向きをコントロールできることが確かめられた。

○膜との複合

フレームモデルのみだけではなく、フレームに対して面材を追加することで、空間として機能させることを考える。(fig.2.1.18-21) は、前項における偏心モデル (fig.2.1.14-15) に対して膜を面材として追加した複合モデルである。膜の材料は 2 方向に伸縮する生地を採用し、ピアノ線で構成したフレームに対して 90%程度に縮小したものを縫合した。

伸縮性のある生地を採用することによって、変形に対しても柔軟に追従することが確認された。また縮小した膜を張ると、形態変形させた後にも膜に張力が残り、膜のたるみを軽減している様子も見られる。

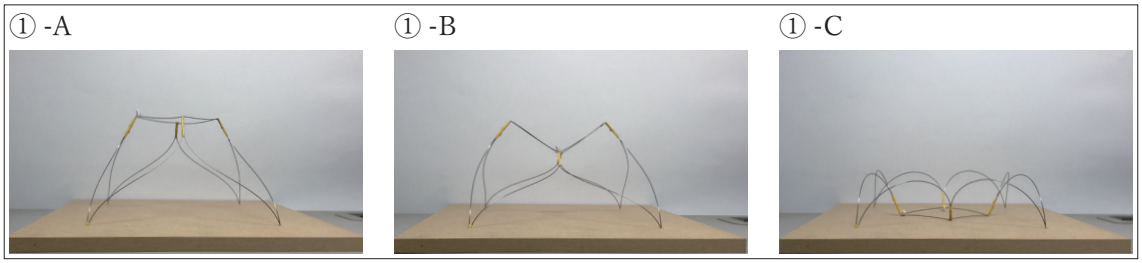


fig.2.1.12: ピアノ線フレームモデル - 同じ長さのフレームを 4 本配置したモデル

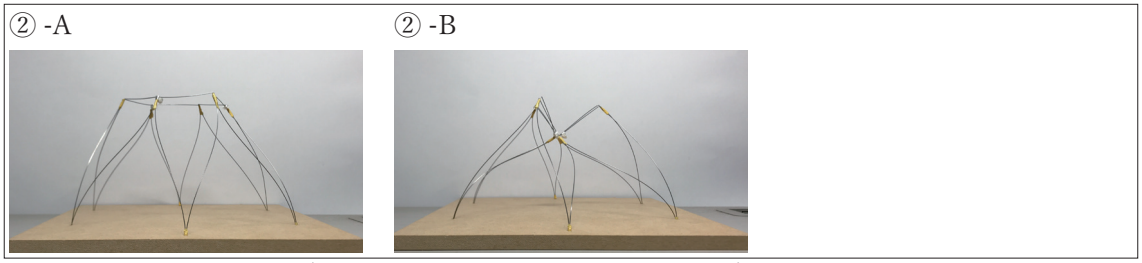


fig.2.1.13: ピアノ線フレームモデル - 同じ長さのフレームを 6 本配置したモデル

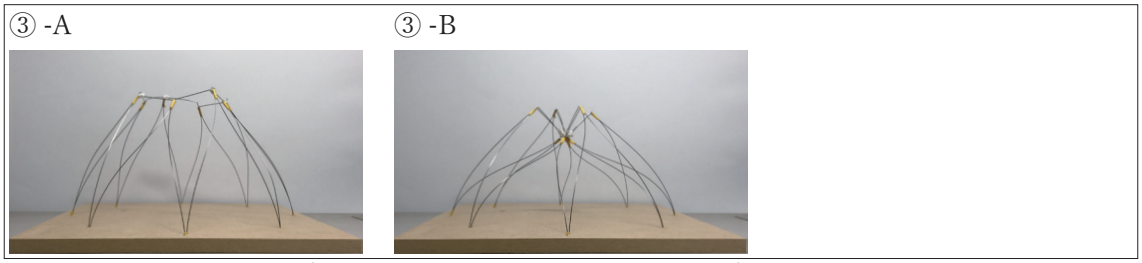


fig.2.1.14: ピアノ線フレームモデル - 同じ長さのフレームを 8 本配置したモデル

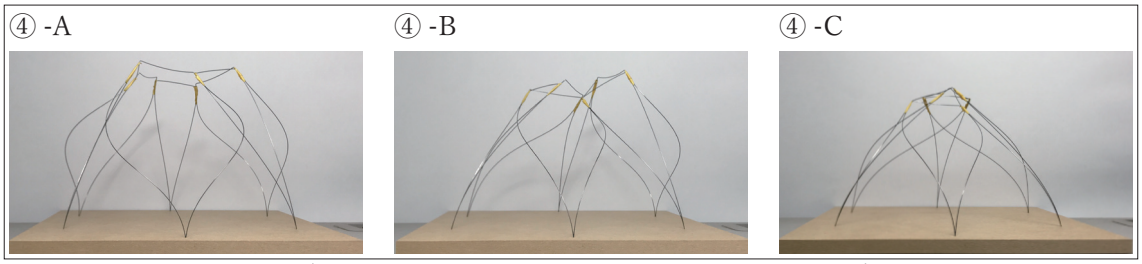


fig.2.1.15: ピアノ線フレームモデル - 異なる長さのフレームを交互に配置した六角形のモデル

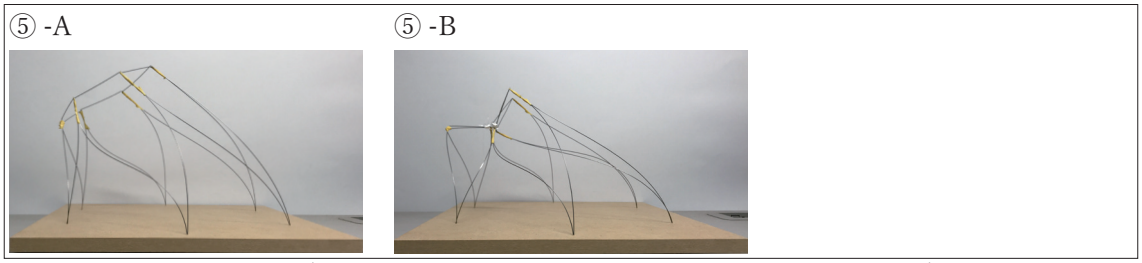


fig.2.1.16: ピアノ線フレームモデル - フレームの長さに偏りを持たせて配置した六角形の偏心モデル 1

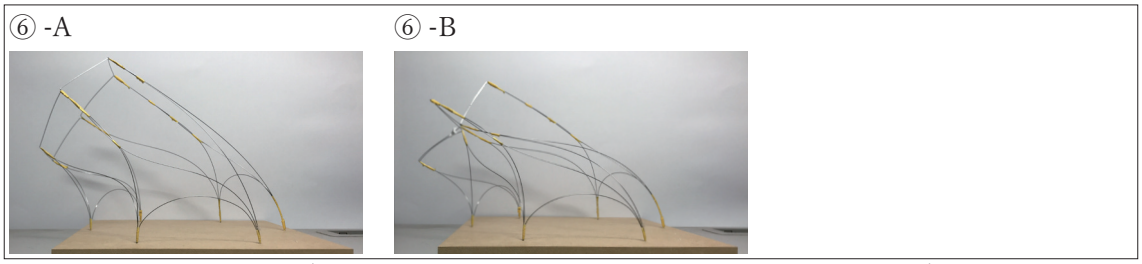


fig.2.1.17: ピアノ線フレームモデル - フレームの長さに偏りを持たせて配置した六角形の偏心モデル 2

fig.2.1.18: 膜を追加した模型 -type1

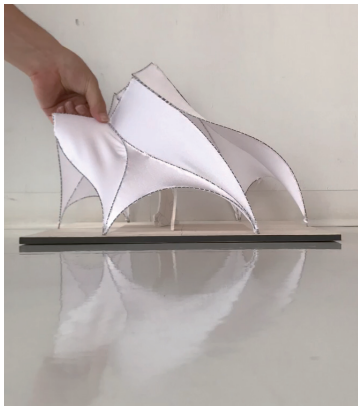


fig.2.1.19: 膜を追加した模型 -type2

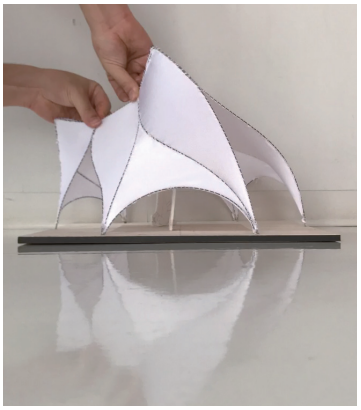


fig.2.1.20: 膜を追加した模型 -type3

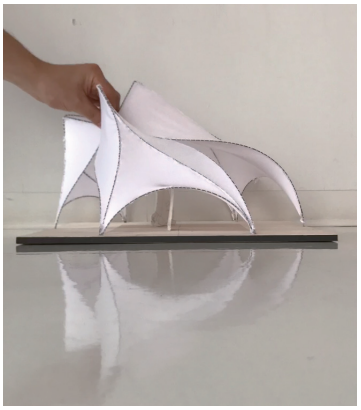


fig.2.1.21: 膜を追加した模型 -type4

2.2.　しなやかな材料

部材の曲げによる弾性変形を積極的に利用した構造体においては、材料の強度と硬さが大きく影響するため、その選定が非常に重要になる。高い材料強度を持ちながらも柔軟に変形できるしなやかさを併せ持つ材料として、竹や籐（ラタン）などの自然物が馴染深い。それだけではなく、GFRP や CFRP などのいわゆる複合繊維材料や、眼鏡フレームや下着などに用いられる形状記憶合金なども、柔軟性に富んだ身の回りの材料として代表的である。前章で取り上げたプロジェクトにみられるように、建築物においては、竹や合板などの自然素材や FRP が用いられることが多いが、適切な材料選定は、例えば、その構造が静的な構造であるのか可変な構造であるのかといった利用法や利用条件が大きく関係する。(fig. 2.2.1) のように弾性範囲内で材料を曲げた時、材料が湾曲する程度を示す曲率 ϕ は、円形断面の場合、曲げによる最外縁応力度 σ、弾性率 E、部材半径 r を用いて、次のように表せる（式 2.1)。

$$\Phi = \frac{\sigma}{E \cdot r} \qquad (式\ 2.1)$$

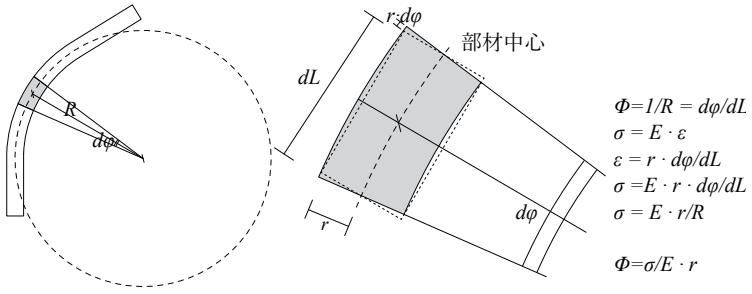


fig. 2.2.1: 曲げによる部材の挙動と応力度

大きい曲げ変形を得るには、材料強度が大きく、弾性率が小さいほど有利であることがわかる。また、部材断面から見れば、その厚みあるいは、太さが小さいほど曲げやすいということがわかるが、材料自体の選定においては、曲げ強さと曲げ弾性率の比が一つの大きな評価指標となる。

Lienhard J.[2] は、材料特性の比較をするためにこの関係の違いをグラフにプロットすることで可視化している (fig. 2.2.2)。グラフには、一般的な材料の中でも柔軟な材料である木材 (TIMBER)、竹（BAMBOO)、金属（METAL)、FRP がプロットされている。グラフから確認できるように、FRP や竹は木

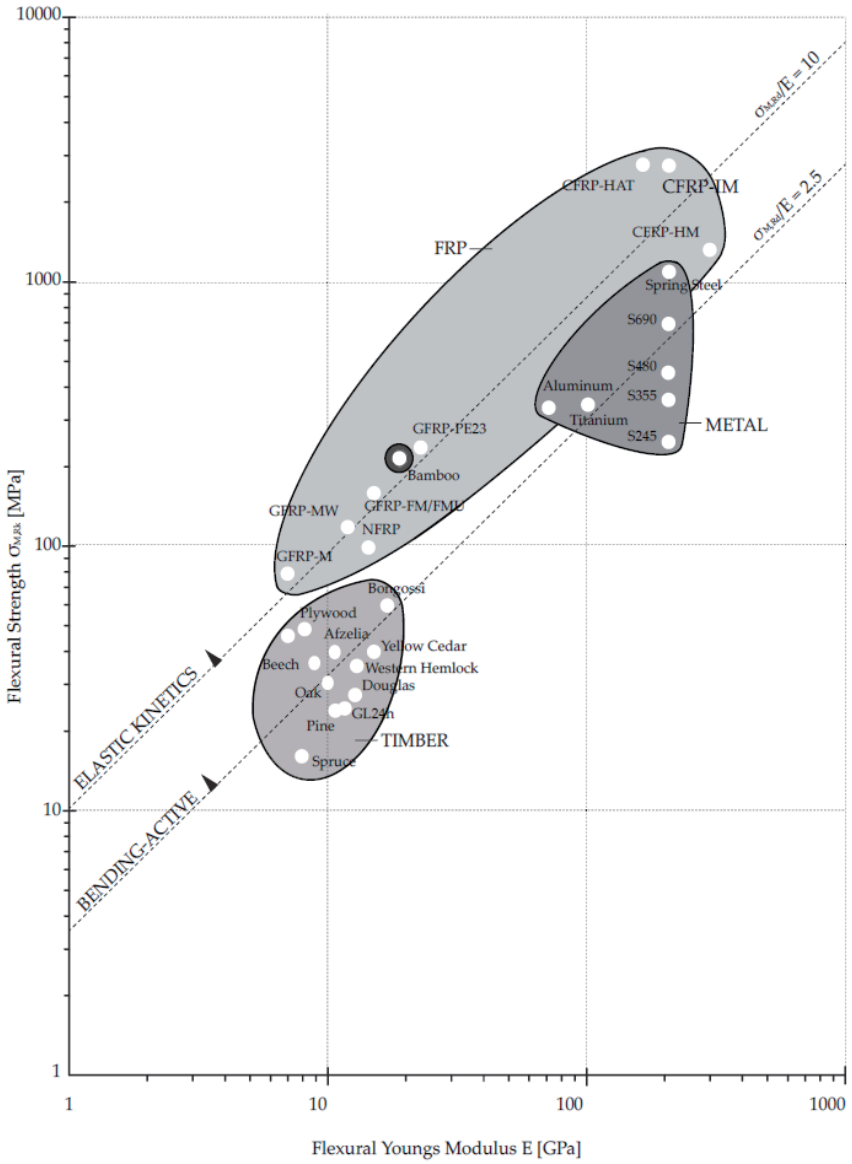


fig. 2.2.2: 各材料の曲げ強さに対する曲げ弾性率の比のプロット（参考文献 [2], pp34 より引用）

材や金属と比較し、グラフの上側に分布し、弾性率に対する曲げ強さの割合が高い。Lienhard は、この割合（σ [MPa]/E[GPa]）が大体 2.5 以上であれば、大変形を利用した静的な架構に、大体 10 以上であれば、動的な可変機構に扱えるという基準を設けている。本研究では、主に FRP(繊維強化プラスチック) を扱うが、鉄や木材などと比べ弾性率に対する強度の割合が大きく、可変構造への応用可能性がある。

○ FRP

FRP は、繊維材料で強化されたプラスチックであり、航空

機や自動車などの巨大なものから釣り竿や棒高跳びの棒自転車、電子部品などの細かく複雑な形状のものまで、多くの分野で幅広く使用されている。

前述したように、高い曲げ強さに対して低い弾性率ため曲げやすいという性質を持ち、強度に着目すれば、GFRP の比強度は鉄の 1.5—6 倍、CFRP の比強度は鉄の 10 倍と非常に性能が高い [23]。それだけではなく、比重が小さいため軽量な材料として扱われることが多く、耐食性や疲労特性に優れているなどの性質も有している。また、複雑な形状を成形しやすいことから、製造における優位性があることも一つの特徴といえよう。

FRP の建築物への利用は、パビリオンなどの実験的で特殊な建築物を除いて、外装材や内装材といった非構造部材として多く用いられ、Zaha Hadid Architects の一部の作品 (fig. 2.2.3) における複雑な外装曲面のパネルやシームレスな内装にも適用されている。先に挙げたようにパビリオンや、小規模の仮設的構造物に対しては、構造材として用いられる事例もみられるが、日本では恒久的な建築に対して繊維材料をその構造材として使用することが、法規的に認められていない。FRP は、建物に安定的に利用できる構造材料として規格化されていないのに加え、現状、耐火の問題や施工の問題などの技術的な課題や、建築利用としての FRP の有用性を十分に示せていないことなど、建築利用の普及への課題は多い。

その中で、繊維材料の建築利用を普及させようという積極的な動きもみられる。石川県は、2016 年 3 月に炭素繊維複合材料が構造材として安定利用されることを目指して、『建築分野における炭素繊維複合材料の実用化に向けたロードマップ』(fig. 2.2.5) を制作している [24]。このロードマップでは、CFRP を建築に利用するために「構造材として安定して利用可能な位置付けの獲得」、「非構造材としての利用の促進」、「技術的課題の克服」、「社会への普及を図る具体的取組の推進」という 4 つの指針を掲げ、具体的な道筋を明確化している。

また、株式会社小松精練は、2017 年に炭素繊維を主として構成される耐震補強材『カボコーマ・ストランドロッド』で JIS 認定を取得する見込みと発表している [25]。同社は製品開発だけではなく、株式会社隈研吾建築都市設計事務所と共同し、鉄の 10 倍の強度を持つという『カボコーマ・ストランドロッド』を用いて、世界発の耐震改修を非常に鮮やかな手法によっ

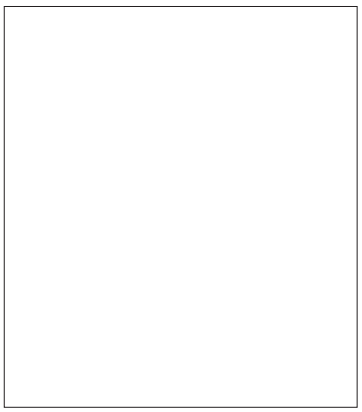
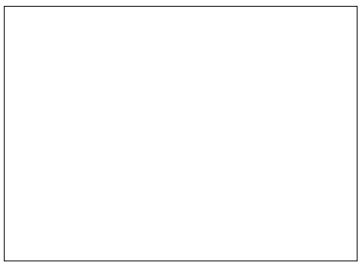


fig. 2.2.3: Zaha Hadid Architects『the serpentine sackler gallery london』(2013)



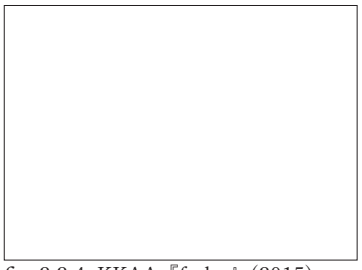


fig. 2.2.4: KKAA『fa-bo』(2015)

[23] サクラ化学工業株式会社 ,FRP（繊維強化プラスチック）<http://www.sakurakagaku.co.jp/?page_id=7)
[24] 石川県 ,『建築分野における炭素繊維複合材料の実用化に向けたロードマップの策定について』, 2017 <http://www.pref.ishikawa.lg.jp/syoko/tansoseni/kentiku.html>
[25] 日本經濟新聞『小松精練、耐震補強材料「カボコーマ・ストランドロッド」が国内標準（JIS）化に認定』,2017/8/1 <https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP452990_R00C17A8000000/>
[26] 隈研吾建築都市設計事務所 , 小松精練ファブリックラボラトリー　fa-bo <http://kkaa.co.jp/works/architecture/komatsu-seiren-fabric-laboratory-fa-bo/>

	区分	課題	平成28～30年度【短期（1～3年後）】	平成31～37年度【中期（4～9年後）】	平成38年度～【長期（10年後～）】	目指す成果
建築分野での利用	**構造材として安定して利用可能な位置付けの獲得**	・建築基準法 37 条に基づく指定建築材料の指定 ・建築基準法施行令第 94 条及び第 99 条に基づく材料強度等の指定		・JIS(JAS)登録認証の検討	・JIS(JAS)化 ・設計・施工指針の策定 ・建築関係者への認知度向上	**・JIS(JAS)化** **・設計・施工指針の策定** **・指定建築材料としての指定及び材料強度等の指定に向けた働き掛け**
		・実証的建築の積み上げ（構造材として活用(※)） ※ 建築基準法 20 条に基づく個別認定	・CFRP 構造材の仕様検討、試作、試験・評価 ・材料強度等の指定に必要な試験の実施	・CFRP 構造材の高品質化 ・構造材（梁、柱、屋根、壁等）に活用した建築物の建築・実証	・CFRP 構造材の普及	**・国内における CFRP を構造材として用いた建築物の増加**
	非構造材としての利用の促進	・実証的建築の積み上げ（非構造材として活用）	・CFRP 非構造材（内装材、庇等）の仕様検討、試作、試験・評価、商品開発	・CFRP 非構造材の普及		**・CFRP 非構造材（内装材、庇等）の普及**
		・軽量性を活かした非構造材の提案	・構造材ともなり得る CFRP 非構造材（パネル等）の仕様検討、試作、試験・評価 ・リノベーション部材としての仕様検討、試作、試験・評価	・CFRP 非構造材の普及 ・リノベーション部材としての普及		**・軽量性を活かした非構造材の商品化**
	技術的課題の克服	・CFRP 構造体の耐火性能向上	・CFRP 部材の不燃化、難燃化にかかる研究開発、試作、試験・評価	・CFRP 構造体の耐火にかかる研究開発、試作、試験・評価	・耐火構造としての認定取得	**・耐火構造としての認定取得**
		・接合・接着技術の改良（木材とのハイブリッド化を含む）	・CFRP 部材の接合・接着技術の仕様検討、研究開発、試験・評価 ・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の仕様検討、試作、試験・評価	・接合・接着技術の確立 ・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の商品開発	・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の JIS(JAS)化	**・接合・接着技術の確立** **・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の JIS(JAS)化** **・上記部材の普及**
		・CFRP 耐久性データの蓄積	・既存 CFRP 建築物の耐久性実績調査(非破壊検査) ・CFRP 耐久性試験の調査・実施			**・CFRP の高耐久性をデータで実証**
		・トータルコストの低減	・CFRP 部材を活用したトータルコスト低減策（LCC（ライフサイクルコスト）を含む）の検討	・工期短縮、新規工法、省力化施工技術によるトータルコスト低減の実証	・JIS(JAS)化した部材を収録した設計・施工指針の策定	**・工期短縮、新規工法、省力化施工技術の確立**
	社会への普及を図る具体的取組の推進	・具体的な建築物への CFRP 部材活用による PR	・様々な建築物での CFRP 部材の活用を働き掛け	・様々な建築物での CFRP 部材活用事例の PR	・一般建築物への CFRP 部材の活用 ・超々高層、地下構造物など、新規性の高い構造物への活用	**・施工方法の認知度向上、施工ノウハウの獲得** **・様々な建築物での CFRP 部材活用を通じた社会への普及促進**
		・施主への認知度向上	・企業による一般施主（マンション管理組合等）への CFRP 耐震補強工法の働き掛け ・CFRP 部材による耐震補強事例の積み上げ	・CFRP 活用事例の広報などを通じた建築材料としての認知度向上		**・一般消費者（施主）における高機能な素材としての認知の獲得**
		・建築関係者への認知度向上	・関係学術研究団体における FRP 合成構造設計施工指針の発刊（建築学会）	・関係学術研究団体における CFRP 構造に係るセミナー等の情報発信		**・各地の設計者等における高機能な建築材料としての認知の獲得**
		・木材との一体利用による高機能化	・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の仕様検討、試作、試験・評価	・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の商品開発 ・耐火木造の実証 ・JIS(JAS)登録認証の検討	・CFRP と木材が一体化したハイブリッド部材の JIS(JAS)化 ・設計・施工指針の策定 ・建築関係者への認知度向上	**・CFRP との合成化、複合化による木材の高機能化** **・国産木材の利用促進**
その他		・CFRP の用途拡大	・据付家具、文具、スーツケース、スポーツ用品等に代表される日用品など、人々に身近な商品への CFRP の利用促進			**・ブランド価値、製品価値向上の手法としての CFRP の利用を社会的に認知**

fig. 2.2.5: 建築分野における炭素繊維複合材料（CFRP）の普及に向けたロードマップ（参考文献 [24] より引用）

て実現し、意匠的かつ構造的な有用性・応用可能性を示している (fig. 2.2.4)[26]。

2.3.　小結

本章では、小模型におけるスタディを通して、フレームを円周配置し、部材軸回りに回転可能なヒンジとして連結することで、複数の形状にダイナミックに変形可能なシェル形状が現れることを確かめた。また、フレームの配置位置・数やフレームの長さのパラメータによって、シェル形状をコントロールできる可能性があることが分かった。加えて膜を追加した複合モデルを考え、伸縮性のある膜を用いることによって架構の変形に対応できることが確かめられた。

後半では、提案する架構に適する材料の調査を行った。しなやかさで強い材料として FRP が高い性能を持つことは明らかであり、また、成形性が高い点も FRP の大きな利点である。本研究では、建築利用の可能性を提示するという意味も込めて、FRP をしなやかな材料として扱う。

第3章

シミュレーション

3.0. 本章の概要

3.1. 位置ベースシミュレーションの概要
3.1.1. 概要
3.1.2. Kangaroo2 と K2Engineering

3.2. 曲げ挙動のシミュレーション
3.2.1. シミュレーション原理
3.2.2. フレーム連結架構の形状決定と可変形態の操作

3.3. 膜の挙動のシミュレーション

3.4. 小結

3.0.　本章の概要

本章では、曲げによって変形するフレームの挙動と膜の収縮による影響を受けるフレームおよび膜の挙動を再現し、設計時における検討ツールとして機能するシミュレーションシステムの構築を目指す。シミュレーションには、汎用 3D モデリングソフトウェア Rhinoceros を描画インターフェースとし、そのプラグインであるヴィジュアルプログラミング環境の Grasshopper 上でモデリング及びシミュレーションを行う。なお、シミュレーションには、GH 上で機能するオープンソースプラグインである Kangaroo2 および K2Engineering を用いる。Kangaroo 2 と K2Engineering の理論については K2Engineering の開発者である Brandt-Olsen, C による論文[27] が詳しく原理を解説しており、また、Kangaroo 2 の開発者である Daniel Piker が公開している Kangaroo 2.0 Release notes[28] や GitHub 上にアップロードしているプログラムのソースコード[29],[30] など以上を参照または引用しながら、システムの理解と構築を進める。

[27]Brandt-Olsen, C.『Calibrated Modelling of Form-active Structures』, Master thesis, The Technical University of Denmark, 2016
[28]Piker, D.,『Kangaroo2.0 Release notes』, 2015
[29]GitHub, CecilieBrandt/K2Engineering <https://github.com/CecilieBrandt/K2Engineering>
[30]GitHub, Dan-Piker/K2Goals <https://github.com/Dan-Piker/K2Goals>

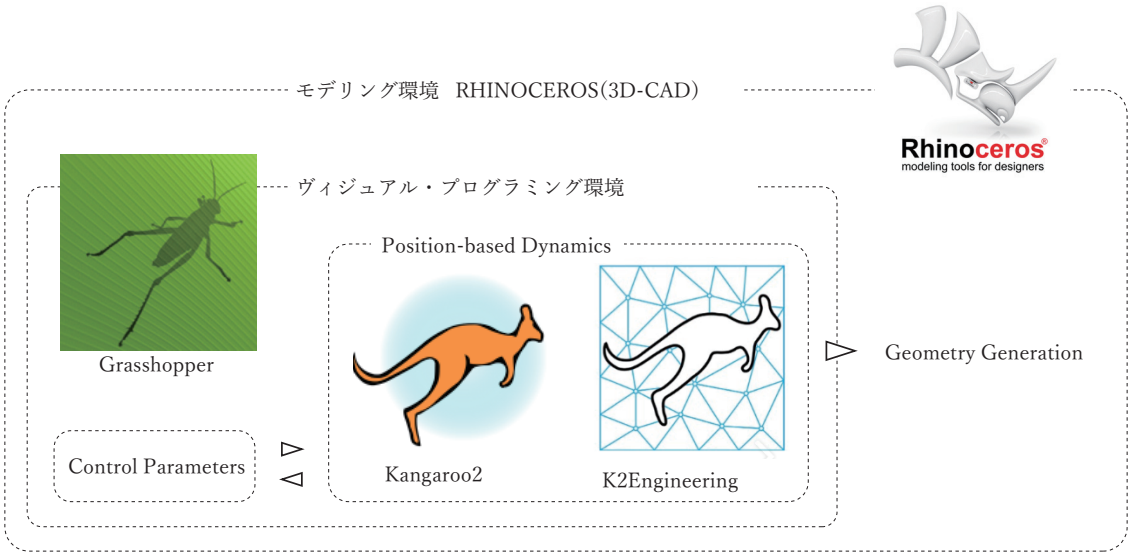


fig. 3.0.1: シミュレーションフロー

3.1.　位置ベースシミュレーション

3.1.1.　概要

しなやかな部材を曲げて形成される構造や可変な構造を設計するためには、設計物の空間の様相といった建築計画的あるいは意匠的な側面に加え、曲げによって発生する応力やその挙動といったエンジニアリング的側面を同時に扱った形状コントロールが必要とあり、特に 3 次元的に応用する場合においては 3D モデリングによる検討が非常に有効になると考えられる。

大変形の解析は、部材に発生する変形に加え、部材の伸びやねじれなどを考慮される必要性から、一般的には非線形解析によって解析され、詳細に設定すれば、高い精度の結果を得ることができる。しかし、複雑な設定が必要になる上、解析に時間がかかるため、高い解析精度を必要とせず、複数のパラメータを操作しながら膨大に形態スタディを行う設計の初期段階においては、より高速でリアルタイムに形状生成を行うことができるシステムが設計支援ツールとしてより有効に働くものと思われる。

そういったツールとして物理シミュレーションツールがある。物理シミュレーションは、物理シミュレーションの演算法として一般的な手法は、質量を持つ節点に働く力から速度を求めて、節点の位置を決定する Force Based Physics であったが、近年では、より高速で安定したシミュレーション法として、Position Based Dynamics(以下 PBD) が提案されている[31],[32]。PBD は速度を扱わず、節点に対して移動の制約を与えることで節点位置を更新していくことで物体の挙動を再現するシミュレーション方法であり、有限要素法（FEM）の計算量に対して、比較的簡易なアルゴリズムの組み合わて実行され、解析対象に入力する制約情報が単純化し、高速のリアルタイム解析が可能になるため、ゲームや映画などのモーショングラフィックスの制作によく用いられている。

[31]Müller M., et al『Position Based Dynamics』, 3rd Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS", 2006
[32] 北見翔 , 他『位置ベース力学に基づく布の折り目シミュレーション』, 映像情報メディア学会技術報告 ,2015

3.1.2.　Kangaroo2 と K2Engineering

○ Kangaroo2

Kangaroo2(以下 K2) は、2014 年に Daniel Piker によって開発された Grasshopper のプラグインであり、物体の挙動を質量と速度をもとに物理挙動を再現する力学ベースの手法をとっていた Kangaroo に対して K2 は、PBD の概念に基づいており、安定した高速な解析ができるツールである [33]。K2 では、ジオメトリを節点の集合体として扱うため、剛体における解析の設定条件とは異なり、各接点における自由度は X, Y, Z の並進のみの 3 自由度で回転を制御することはできない。しかし、物理現象を模倣することは可能であり、解析速度と解析の安定性に加え、リアルタイムに物体の挙動の把握をしやすいため、形状生成のスタディにおける有用性が考えられる。

K2 のシミュレーションは、「GOALS」と「SOLVER」の 2 つの機能によって行われる。

「GOALS」は、節点の移動を促すための制約条件の総称であり、重力や軸バネ、回転バネなどの挙動の制約を各節点に対して与える機能を持つ。本論では、「GOALS」を制約条件と呼ぶ。節点に対しては複数の制約条件を与えることができ、各制約条件が必要とする入力情報はそれぞれの定義によって異なる。出力情報は、与えられた条件をもとに算出された移動量とその方向であり、これらを移動ベクトルと呼ぶ。また、その移動ベクトルの強さを示す重みも同時に与えることができる。例えば、i ステップ時における i-1 ステップ時からの移動距離の差が移動ベクトルだとすれば、その変位量に対してばね定数 k を与えることでその動きの硬さを表現することが可能である。

「SOLVER」は、節点に与えられた各制約条件とその重み集約し、計算することで各節点の現在の位置 *Pi,cur* からの移動先を示し、新しい位置 *Pi,new* に更新するステップを繰り返すシミュレーションのプラットフォームである。計算は以下のように行われる (式 3.1) [27] より引用。

$$P_{i,new} = P_{i,cur} + \frac{\sum_{j=1}^{n} w_j \cdot G_j}{\sum_{j=1}^{n} w_j} \qquad (3.1)$$

Pi,new　：更新後の節点 i の位置
Pi,cur　：更新前の節点 i の位置
n　：各点に作用する制約数
wj　：ゴール j の重み
Gj　：ゴール j 移動ベクトル

[33]Thomsen M. R.,『Hybrid Tower, Designing Soft Structures』,Modelling Behaviour: Design Modelling Symposium 2015, pp91-92, 2015
[27]Brandt-Olsen, C.『Calibrated Modelling of Form-active Structures』, Master thesis, The Technical University of Denmark, 2016, p27

「SOLVER」は、更新した新しい節点の位置情報に対して制約条件に与えなおすフィードバックを行い、再度が新しい移動ベクトルを計算し、再び「SOLVER」内で新しい位置に書き換えられる。このステップを繰り返すことで、全体が釣り合う位置を探すが、ここでは更新する前の節点位置から、移動ベクトルによって更新される新しい節点位置の距離の二乗誤差の合計値が、Threshold value（初期設定は 1e-15）を下回った時に十分に小さい、つまり釣り合いとみなされるようにプログラムされている。

$$E = \sum_{i=1}^{n} DIST(P_{i,current}, P_{i,new})^2 \qquad (3.2)$$

E　：二乗誤差の総和
DIST　：節点の移動距離
Pi,new　：更新後の接点 i の位置
Pi,cur　：更新前の接点 i の位置
n　：総節点数

○ K2Engineering

K2Engineering は K2 の機能を拡張するプラグインとして 2016 年に Brandt-Olsen, C によって開発されたオープンソースである。K2Engineering では、部材の材料特性や断面形状という具体値に読み替えることで直感的にわかりやすく適切な曲げ剛性と軸剛性の設定を可能とし、それによって構造評価を可能にしたものである。その精度は FEA による汎用構造解析ツール Karamba（6 自由度）の結果と比較することによって検証されているが、特に部材を曲げるような物理現象の解析は 3 自由度であっても意味のある構造的な数値が算出されることを明確化させている。

K2Engineering が提供する制約条件は、K2 における制約条件と同様に「SOLVER」にインプットすることが可能で、K2 の場合と同様にルールに基づいて節点の位置情報を更新するループを繰り返すことで、安定状態を算出する。

3.2.　曲げ挙動の再現

位置ベースの物理シミュレーション Kangaroo2 による曲げ挙動の再現における設定する制約条件の原理についてまとめ、棒要素、フレーム要素、第 2 章で検討したフレーム要素を環状配置し、上部を連結することで構成されるモデル（以下、フレーム連結モデル）の 3 つについてのモデル化とシミュレーション方法を示す。

3.2.1.　シミュレーション原理

まず、シミュレーションの流れを概観すると、入力モデルの設定、制約条件の設定、実行と大きく 3 つの工程がある。

○入力モデルの設定

はじめに、解析する部材のモデルデータを生成する。Kangaroo2 によって曲げ挙動を再現するとき、例えば、一本の直線的な部材の場合は、単線を分割し、連続する複数の線分によって近似的に表す。そのため、単線によって表現するのではなく単線を複数の線分の連続体としてを解析の入力するジオメトリとする。分割数が多ければ多いほど、解像度の高い高精度なシミュレーションとなり、より滑らかな結果を得ることができるが、一方で、解析速度も低下するため、適度な分割数の設定が重要になる。適切な値は、シミュレーションの結果を見て判断する。

続いて、支持点とケーブルのジオメトリを設定する。支持点は、部材を支持する位置である。一方、仮想ケーブルは、部材に強制的な変形を与えるためのファクターに値するものである。例えば、(fig.3.2.4) のように部材端部をある固定点まで移動させ全体を変形させる場合、端点と移動先の点をつなぐケーブルを作成し、その長さを伸縮させることで連結する各節点に変形を促す。この時、移動先の位置は動かないように支持点として設定する必要がある。一方、(fig.3.2.5) のように異なる部材の任意の節点同士を緊結することも可能で、部材を同士をひきつけ合うこともできる。ケーブルは曲げ部材のように複数の線分に分割する必要はなく単一の直線でよい。

以上をまとめると曲げ挙動のシミュレーションに必要なモデルは以下の通りである。

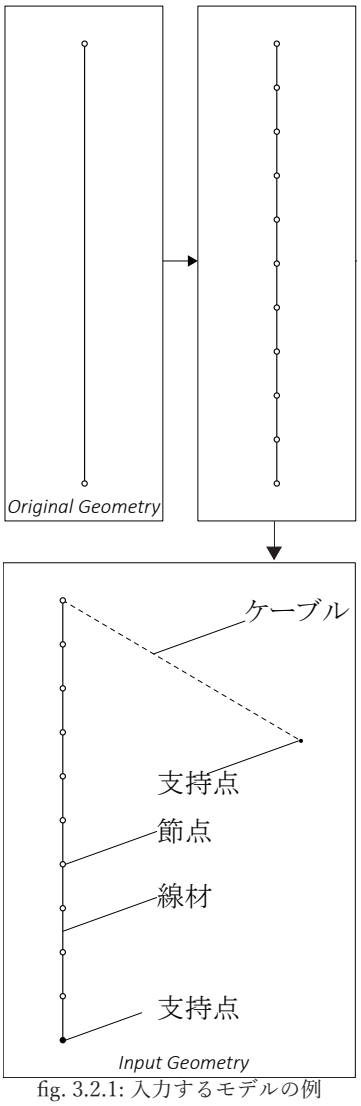


fig. 3.2.1: 入力するモデルの例

- 線材の連続体と節点データ
- 支持点 (節点)
- ケーブル (線材)

○制約条件の設定

入力モデルの設定の次に、各節点に対して、挙動の制約条件を設定していく。複数の制約式を組み合わせることで、曲げや重力などの物理的所作を再現するが、基本的な曲げシミュレーションに必要な制約は、以下に示すコンポーネント（各名称は、Kangaroo2 および K2Engineering のコンポーネントに従う）を使用し、列挙した制約式の条件についてをそれぞれ解説していく。

- 線材・節点に与える制約式
  - -Bar（軸バネ）
  - -Rod（回転バネ）
  - -Load（重力）
  - -Direction（支持点における支持角度の設定）
- 支持点に対して与える制約式
  - -Pinned Support
- ケーブルおよび膜材に与える制約式
  - -Length
- 全体に与える制約式
  - -Floor

・Bar（fromK2Engineering）[27]

Bar コンポーネントは、入力した各線材の軸方向の距離に対する制約条件を与えることができ、フックの法則 (式 3.2) に従い、線材の初期長とステップごとの長さの差を計算し、線材の断面情報と弾性率から与える。

$$F = \frac{E \cdot A}{Lo} \cdot x \qquad (3.3)$$

各線分要素の両端点に移動ベクトルを作用させるため、変形量 x の半分が各端点に対するベクトルの大きさとして、変位が正であれば内向きに、負であれば外向きの移動ベクトルとしてみなされる。一方、重みは変位との整合性をとるために両端に 2 EA/Lo が与えられている。

そのインプットデータとして線分データ、断面積および弾

[27]Brandt-Olsen, C. Calibrated Modelling of Form-active Structures. Master thesis, DTU (2016),pp.40-42

性率が必要である。初期長および変位は線材のモデル情報から自動で計算される。

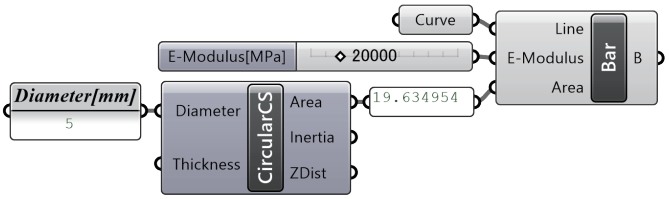


fig. 3.2.2: Bar コンポーネントの入力情報

・Rod（fromK2Engineering）[2]

Rod コンポーネントは線材間の角度の制約を与えるコンポーネントである。接続する二つの線材がなす角度の変形量から曲げモーメントが計算され、モーメントがせん断方向のベクトルに分解しそれが各節点における移動ベクトルとなる。

以下に線材間の角度から節点の位置情報を更新するせん断力の算出法を示す。まず、線分 A と線分 B の曲げ（角度の変化）よって発生するモーメント M は、部材のヤング率と断面二次モーメントの積を曲率半径で除した値に等しい。また、節点を共有しない端点同士を結んだ線分を C、長さを Lc とし、三角形 ABC に外接する円の中心から節点への距離を曲率半径とし、線分 A、B の長さ La、Lb、線分 A、B に働くせん断力 Sa、Sb を用いて表すと、

$$\mathrm{M} = \frac{E \cdot I}{R} \quad \mathrm{M} = S_a \cdot L_a = S_b \cdot L_b \tag{3.4}$$

となる。

外接円の中心から線分 C に直行する線分と中心から節点 1 の直線がなす角 α を用いて、Lc、R との関係は次のように表すことができる。

$$\sin(\alpha) = \frac{Lc/2}{R} \Rightarrow R = \frac{Lc/2}{\sin(\alpha)} \tag{3.5}$$

(式 3.4)、(式 3.5) より、せん断力 Sa、Sb は、それぞれ

$$\frac{E \cdot I}{Lc/2 \cdot \sin(\alpha)} = S_a \cdot L_a \Rightarrow S_a = \frac{2 \cdot E \cdot I \cdot \sin(\alpha)}{Lc \cdot L_a} \tag{3.6}$$

$$S_b = \frac{2 \cdot E \cdot I \cdot \sin(\alpha)}{Lc \cdot L_b} \tag{3.7}$$

である。ここで Sa、Sb が各節点に作用し移動の条件となる。

Rod コンポーネントに必要な入力情報は、一つの節点を共

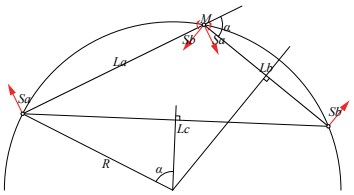


fig. 3.2.3:
角度と力の関係図
（参考文献 [27] をもとに再製作）

[27]Brandt-Olsen, C.『Calibrated Modelling of Form-active Structures』, Master thesis, The Technical University of Denmark, 2016,pp.45-52

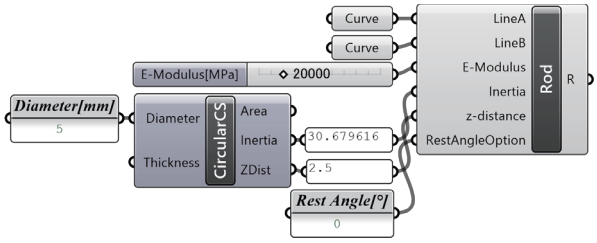


fig. 3.2.4: Rod コンポーネントの入力情報

有する 2 つの線分 LineA、LineB、弾性率、断面二次モーメント、中立軸から部材表面までの距離、RestAngleOption である。RestAngleOption は、LineA、LineB がなすべき目標角度を設定する項目であり、0 または 1 によって与えれる。 0 の場合、その角度が 180°、つまり部材が直線に戻ろうとする力が働く。一方、 1 に設定した場合、インプットジオメトリの 2 つの線分がなす初期の角度を保とうとする力が働き、例えば 90° として初期モデルを制作した場合、90° からの変形量をもとに応力が計算され、そこからの変形の挙動が再現される。これに対して筆者は、任意の角度を入力すると初期モデルに関係なくその角度がターゲットとして認識されるようなファンクションとして書き換えた。これについての説明は、後述する。

Rod コンポーネントのみでは、線材に対して角度の制約のみしか与えることができないため、Bar の制約を組み合わせることで、端点間の距離と 2 線分間の角度を管理し、実際の曲げ挙動のシミュレーションができる。

また Rod コンポーネントは各節点における角度の変形量から算出したモーメントおよび曲げ応力度を出力する。このデータを設計における一つの評価指標とする。

・Load（fromK2Engineering）[34]

部材の自重を再現するために各節点に対して鉛直下向きの移動ベクトルを与える。ベクトルの大きさは、部材の断面積と密度および各節点がに接続する線分の有効長さ（各線分の 1/2）によって決まる。

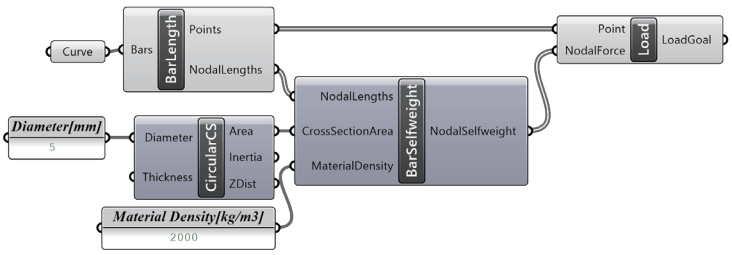


fig. 3.2.5: Load コンポーネントの入力情報

[34]GitHub, CecilieBrandt/K2Engineering <https://github.com/CecilieBrandt/K2Engineering/blob/master/K2Engineering/K2Engineering/Load.cs>

・Support（fromK2Engineering）[27]

支持点に対して Support コンポーネントによって支持力と固定度を与える。このとき支持点自由度は 3 並進のみある。必要なインプットジオメトリは、3D ポイント、x,y,z 方向に対する固定度（True/False）、支持力を示す Strength である。本研究では、支持点という場合は x,y,z すべての方向に拘束され、その Strength は基本的に限りなく大きい値を設定する。

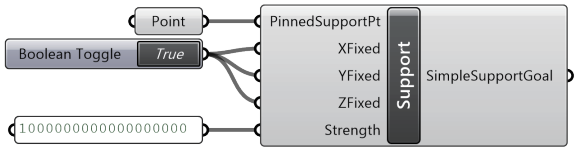


fig. 3.2.6: Support コンポーネントの入力情報

入力情報：
PinnedSupportPt:　支持点
XFixed:　X 方向の移動拘束
YFixed:　Y 方向の移動拘束
ZFixed:　Z 方向の移動拘束
Strength:　強さ（常に∞）

・Direction(fromKangaroo2)[35]

Pinned Support コンポーネントでは x,y,z 方向の 3 並進のみしか拘束できないため、特定の角度で部材端部を拘束し、部材軸に対して直行する 2 軸を中心とした回転を疑似的に拘束したい場合は、支持部分に接する線分に対して支持角度の条件を与える。必要な入力情報としては、拘束したい線材とその方向ベクトル v（x,y,z）、そしてその支持力を示す Strength の値である。本研究では、Strength は限りなく大きい値を入力してシミュレーションを行う。

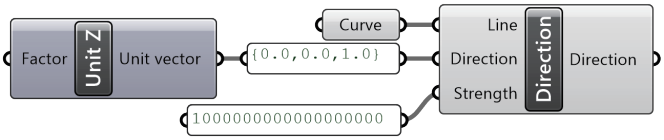


fig. 3.2.7: Direction コンポーネントの入力情報

入力情報：
.Line:　角度拘束対象の線分
.Dir:　角度拘束の方向ベクトル
.Strengt:　強さ（常に∞）

・Length(fromKangaroo2)[36]

外力や強制的にモデルを変位させる場合において必要となる。特に部材のある点を特定の位置に変位させる場合や、複数の部材同士を引き合わせるようにまで変位させる場合、ケーブルとしてその点間をつないだ線分を入力モデルとして設定し、その長さを強制的に 0 に近づけることで変形後の形状を得る。強制変位を与える場合はすべて K2 の Length コンポーネントを用いてシミュレーション法を設定した。また、膜のシミュレーションにおいても同様に用い、伸縮率を設定することでの膜の挙動の再現方法を採用した。膜の設定に関しては後述する。

ケーブルに対して入力する情報は Lest Length、Strength で

[27]Brandt-Olsen, C.『Calibrated Modelling of Form-active Structures』, Master thesis, The Technical University of Denmark, 2016, pp.37-39
[35]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/Direction.cs <https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/Direction.cs>
[36]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/Spring.cs <https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/Spring.cs>

ある。Target Length(以下、目標長さ）について、今回ケーブルを配置する際には、その長さに極めて短くし、Strength に大きな力を加えた。なお、通常、Length コンポーネントの Strength を EA/L（E は弾性率、A は断面積、L は初期長さ）によって与えられる。

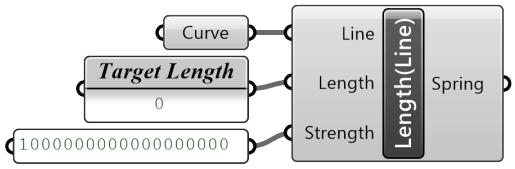


fig. 3.2.8: Length コンポーネントの入力情報

入力情報：
Line:　角度拘束対象の線分
Direction:　角度拘束の方向ベクトル
Strength:　強さ（常に∞）

・CoPlanar(fromKangaroo2)[37]

(fig.3.2.3) のように、部材に屈折角度角度のあるフレームにおいて、フレームの上辺を軸とした回転に対しての拘束はできないため、上辺に接する 2 つの線分がねじれの位置あるにも関わらず、抵抗を示さない。そこで、CoPlanar コンポーネントを用い、上端辺に接する 2 つの線分の両端点を同一平面上に引き付けようとする力を働かせる。基準となる平面は、入力した点群から割り出される平均面であり、その面に対して垂直な移動ベクトルが入力した節点に与えられるアルゴリズムとなっている。この Strength の設定は、現状不明瞭であるため、第 4 章で検証し、適切な値を探る。

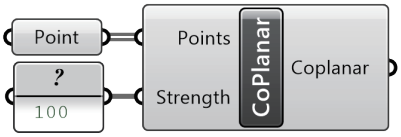


fig. 3.2.9: CoPlanar コンポーネントの入力情報

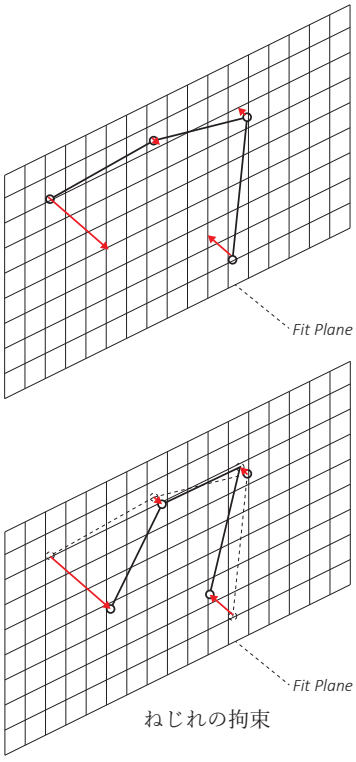


fig. 3.2.10: CoPlanar 機能の概念図

・Floor(fromKangaroo2)[38]

すべての節点が、基準平面以下になることを防ぐために設定する床を設定する。Floor へのインプットはその強さのみであるが、基本的には大きい値を入力する。詳細は参考文献 [16] に詳しい。

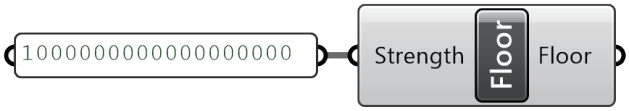


fig. 3.2.11: Floor コンポーネントの入力情報

[37]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/CoPlanar.cs <https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/CoPlanar.cs>
[38]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/FloorPlane.cs <https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/FloorPlane.cs>

○実行

以上が曲げ挙動のシミュレーションに必要な制約式でありこれを＜ SOLVER ＞内で各節点の更新先を計算し位置情報をアップデートしていく。収束速度は Threshold によって与えられ、Tolerance は設定した値よりも節点間の距離が下回ると同じ節点としてみなすための条件である。また K2E のコンポーネントは、応力情報を出力することができ、前述したように Rod コンポーネントの場合は各節点に生じるモーメントや曲げ応力度を取得できる。取得したデータは、解析の各ステップにおいて更新ベクトルを計算する過程で保存され、随時更新されたものが出力されるため、リアルタイムで応力状態の変化を確認することができる。

○解析例について

以上のコンポーネントを組み合わせ、例としてシミュレーションを行った（fig.3.2.13-16）。（fig.3.2.13）は、直線を元データとし、それを線分に分割し、任意の支持点に対してケーブルを配置したものを入力モデルとした。一方、（fig. 3.2.14）は、2 本の直線を元データとし、それを線分に分割し、最も上の線分の両端同士を繋ぐケーブルを配置したものを入力モデルとして設定した。両方とも各線分に対して Bar と Rod の軸剛性を与え、線分間の目標角度を 180° として直線を維持するように設定した。支持条件に関しては、下端の節点を拘束し、Direction によって下端の線分を垂直に保つように支持角度に制約を与えた。ケーブルにより強制変位を与えると部材が曲がり、安定方向に進むことが確認できた。

（fig.3.2.15,16）は、単一直線ではない、複数の線分が形成するフレーム（フレームの角度を屈折角度と呼ぶ）を元データとして用いた例である。いずれも屈折角度 90° のフレームとし､短辺と長辺をそれぞれ分割しモデル化した。支持点を設け、ケーブルを、フレームの端部の 2 点を支持点に引き付けるように配した。次に節点に各制約を与えるが、2 例とも、Bar と Rod を適用するが、（fig.3.2.15）は、屈折角度の目標値を 90° 、（fig.3.2.16）は、屈折角度の目標値を 180° としている。結果を見てわかるように、（fig.3.2.15）では変形後の形状も 90° を維持し、3 角形に近い形状で安定し、（fig.3.2.16）では、入力モデル上の初期屈折角度 90° をインプットしても、180° に戻ろうとする挙動が再現された。

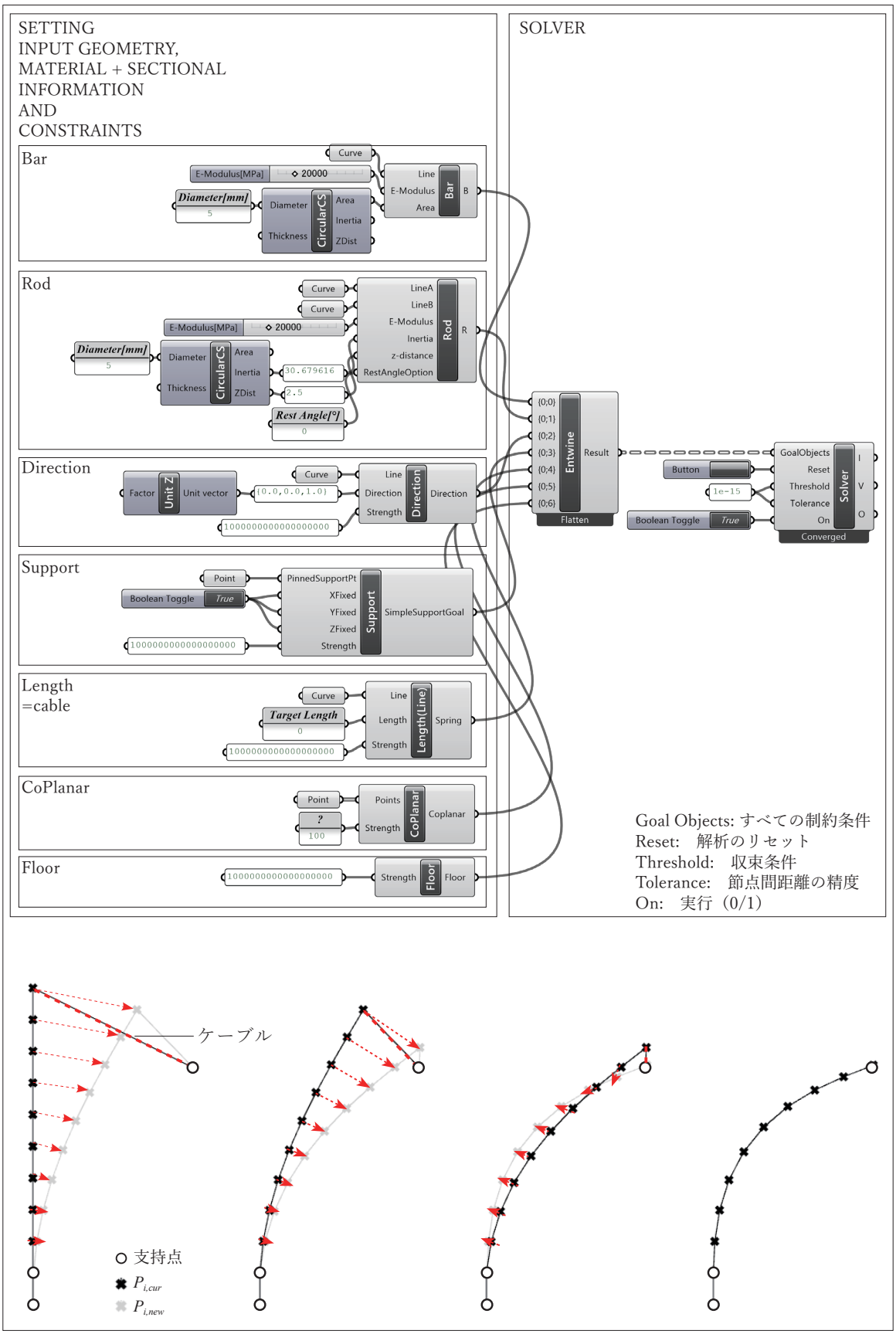


fig. 3.2.12: 単純な部材の曲げ挙動検証のためのプログラムの全体

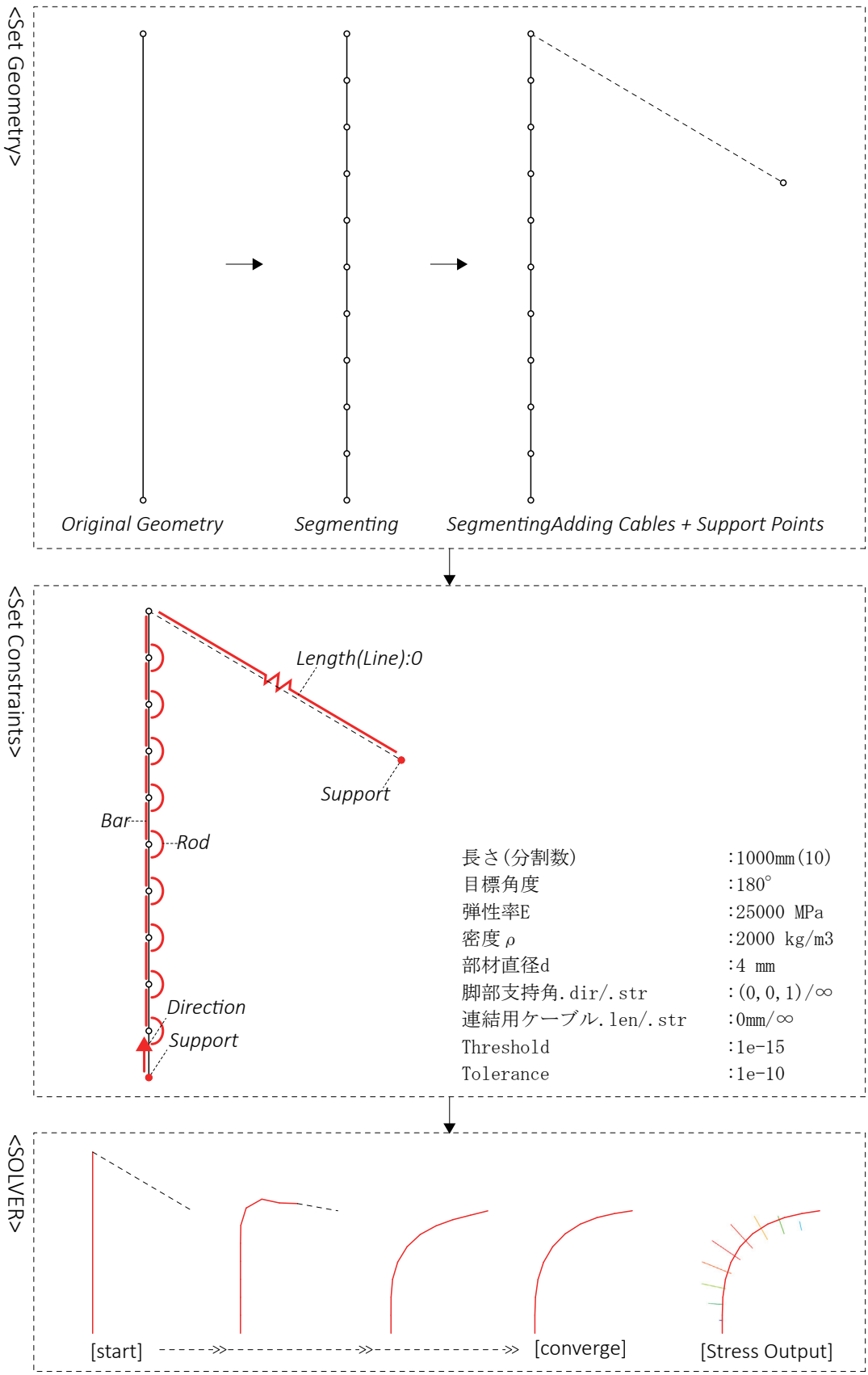


fig. 3.2.13:　棒要素の曲げシミュレーション例

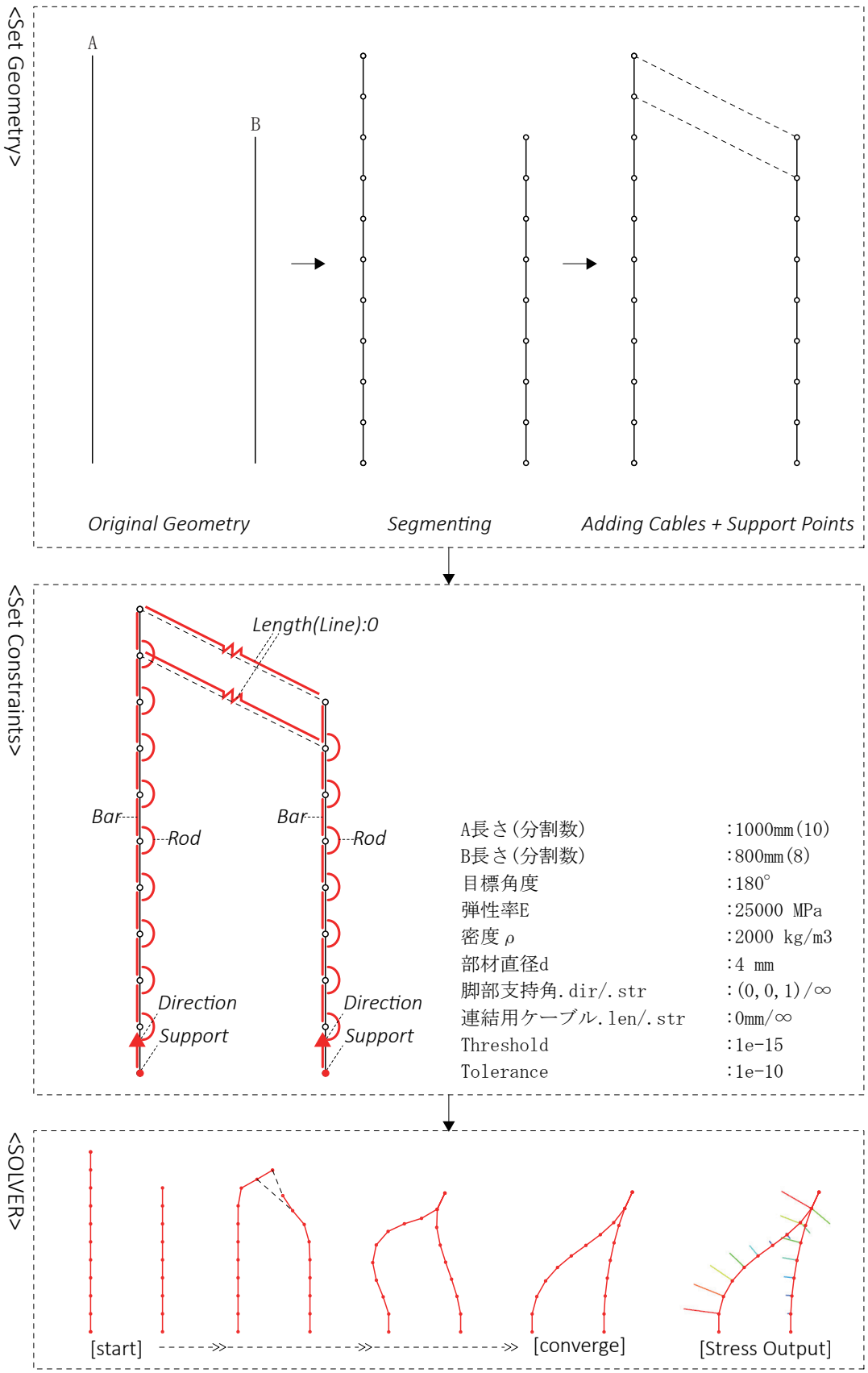


fig. 3.2.14: 複数の棒要素の曲げ合わせのシミュレーション例

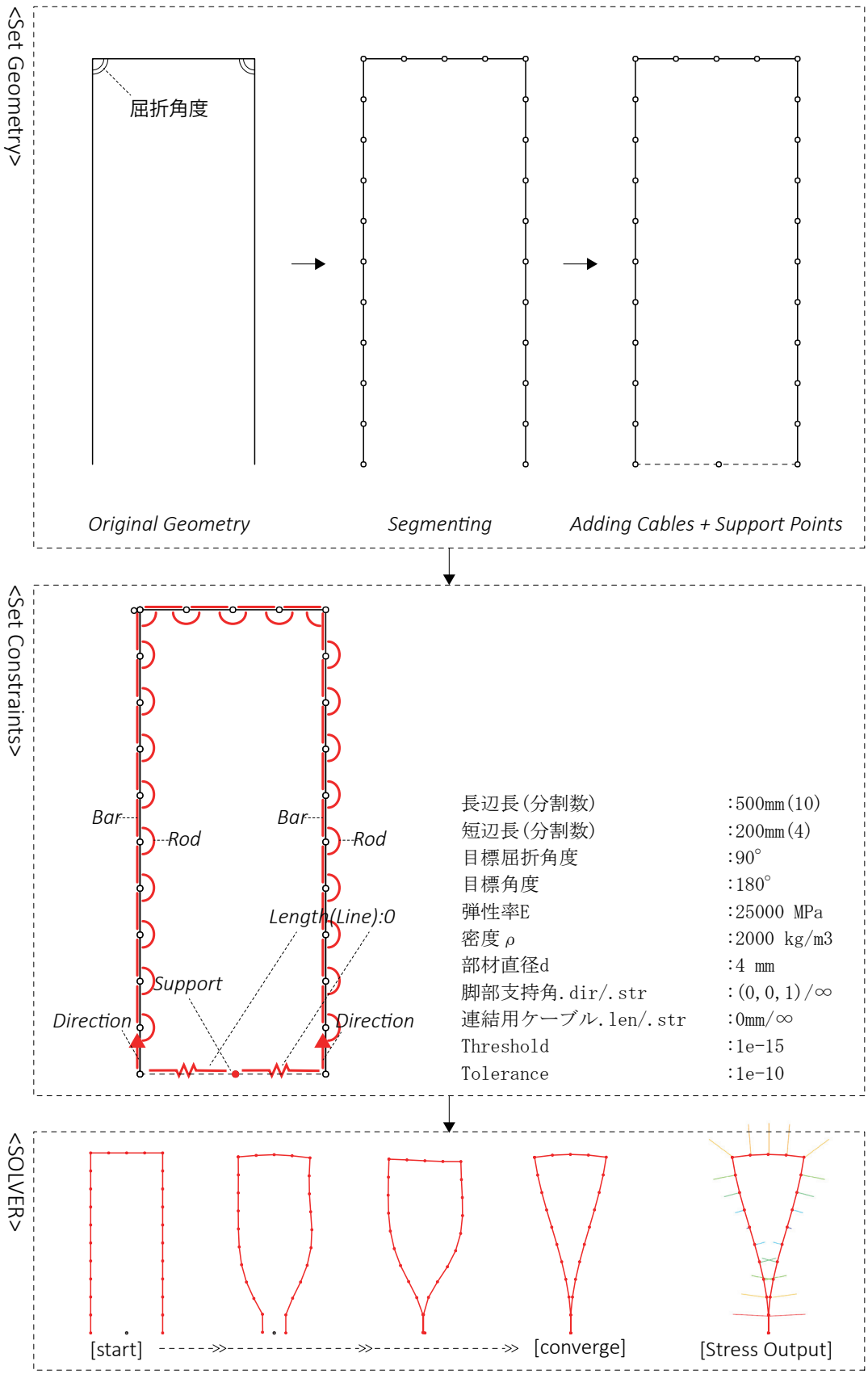


fig. 3.2.15: フレーム脚部引き寄せのシミュレーション例 1

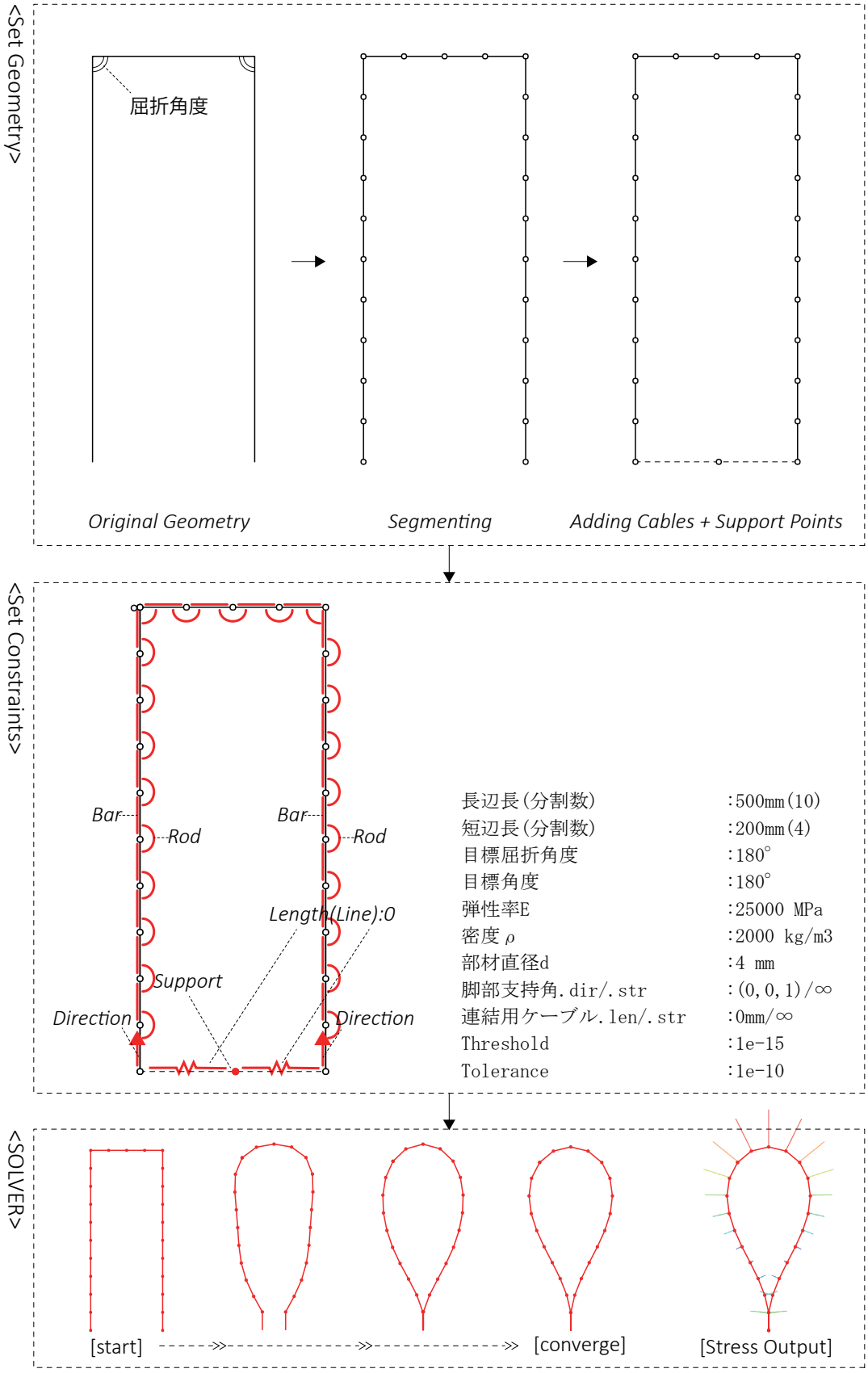


fig. 3.2.16: フレーム脚部の引き寄せのシミュレーション例 2

3.2.2.　フレーム連結架構の形状決定と可変形態の操作

前項で確認した設定を 3 次元的に応用する。その設定プロセスは、前項と同様に①入力モデルの設定、②制約条件の設定、③実行である。

○入力モデルの設定

提案する架構を構成する各フレームの初期モデルの設定は、前項でみた単フレームの設定と概ね等しい。架構を構成する必要分のフレームを環状に配置し、隣り合うフレームと連結するためのケーブルを配置する。フレームの長さ、屈折角度、上部の連結の長さなどは個々に設定できる。(fig. 3.3.1) に見るように、平面上にフレームを配置するモデル化を採用した。理由は、上空から下にひきつけることで、生成される形状に近い形で解析が開始されるため、収束スピードが速く、形状も安定しやすいためである。

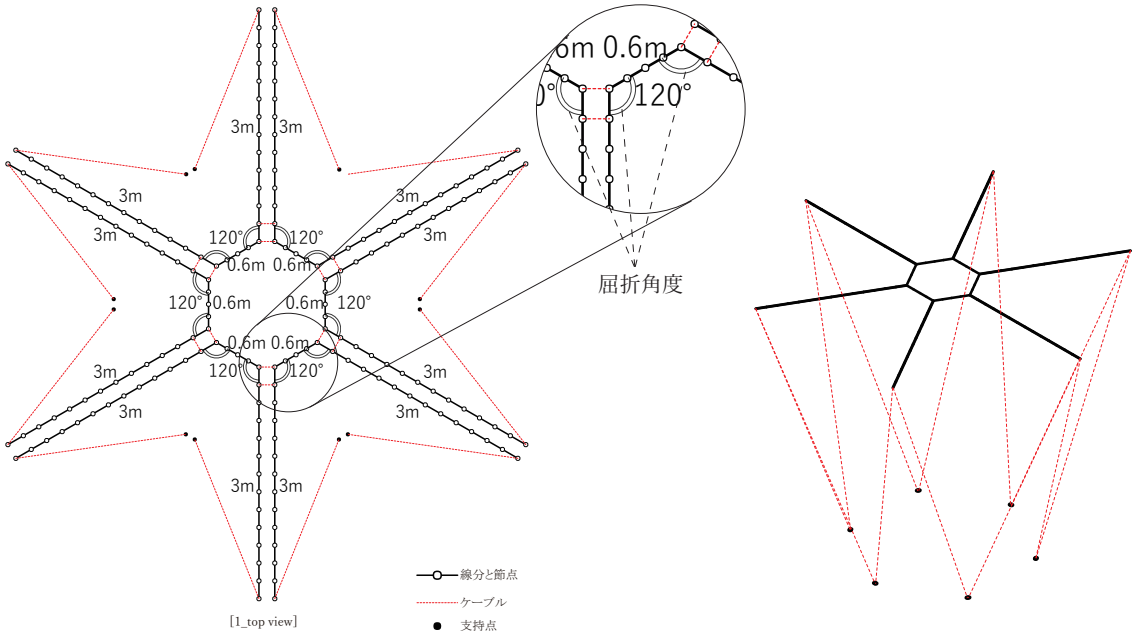


fig. 3.2.17: フレーム連結架構のシミュレーションにおける入力モデル

○制約条件の設定

節点に対して挙動の制約を与えていくが、これも前項でみたフレームの設定と概ね同じである。部材に軸剛性と曲げ剛性にあたる制約式を与え、支持点に対して固定度と指示角度を与える。部材脚部と支持点を結んだケーブルに対して、長さを縮小する設定を加えることで、図のような状態に移行す

る。ここでさらに追加した制約は、フレームとフレームを連結するケーブルであり、これに対しても長さを縮小する設定を与える。

○実行

解析を実行し、全体形状が生成される。

K2 では、解析中に制約の条件を変更しても、随時解析に反映される。部材径が小さい場合、曲げ剛性も小さくなり、節点位置を更新するベクトルの長さも短くなる。そのため部材径が小さくて解析速度が遅い場合は、径を大きくすることで、高速で全体系を生成することができる。ある程度全体形が成形されてきたら、部材断面をもとの数値に戻すことでその断面に見合った形状に再成形される。形状変化についても同様に解析が一度終わってからであっても、ケーブルに対して短くなるような設定に変更することで形状変化を確認することができる。

○解析例について

以上の方法で行ったシミュレーション例を次頁 (fig. 3.2.20-22) に示す。

(fig. 3.2.20) では、円を 6 分割した点を構造の支持位置とし、6 つの同一形状のフレームからなる形状の生成例であり、(fig.3.3.21) は、円を 4 分割した点を支持点とし、4 つの異なる長さのフレームによる形状を生成する例を示している。また、(fig.3.3.22) は、円を 8 分割した点を支持点とし、8 つの異なる長さのフレームによる形状を生成する例を示している。いずれも入力モデルは、フレームを円周配置し、そのコーナーの部分の節点同士と、その下に当たる節点同士を繋ぐケーブルを配置したものとしている。また、フレーム脚部と支持点を繋ぐケーブルも配置している。フレームにおける制約は軸剛性と曲げ剛性、自重、およびフレーム間の連結要素を適用し下端部と支持点をケーブルで引き付けるシミュレーションを行っている。加えて支持点に接する線分の方向を Direction コンポーネントによって、地面に対して垂直に拘束している。

シミュレーションの結果としては、第 2 章でみた形態に近い形状が生成され、また、個々のフレーム長を変えてもシミュレーションできること、またケーブルを開口部に配置することで変形の操作が可能であることが確認された。

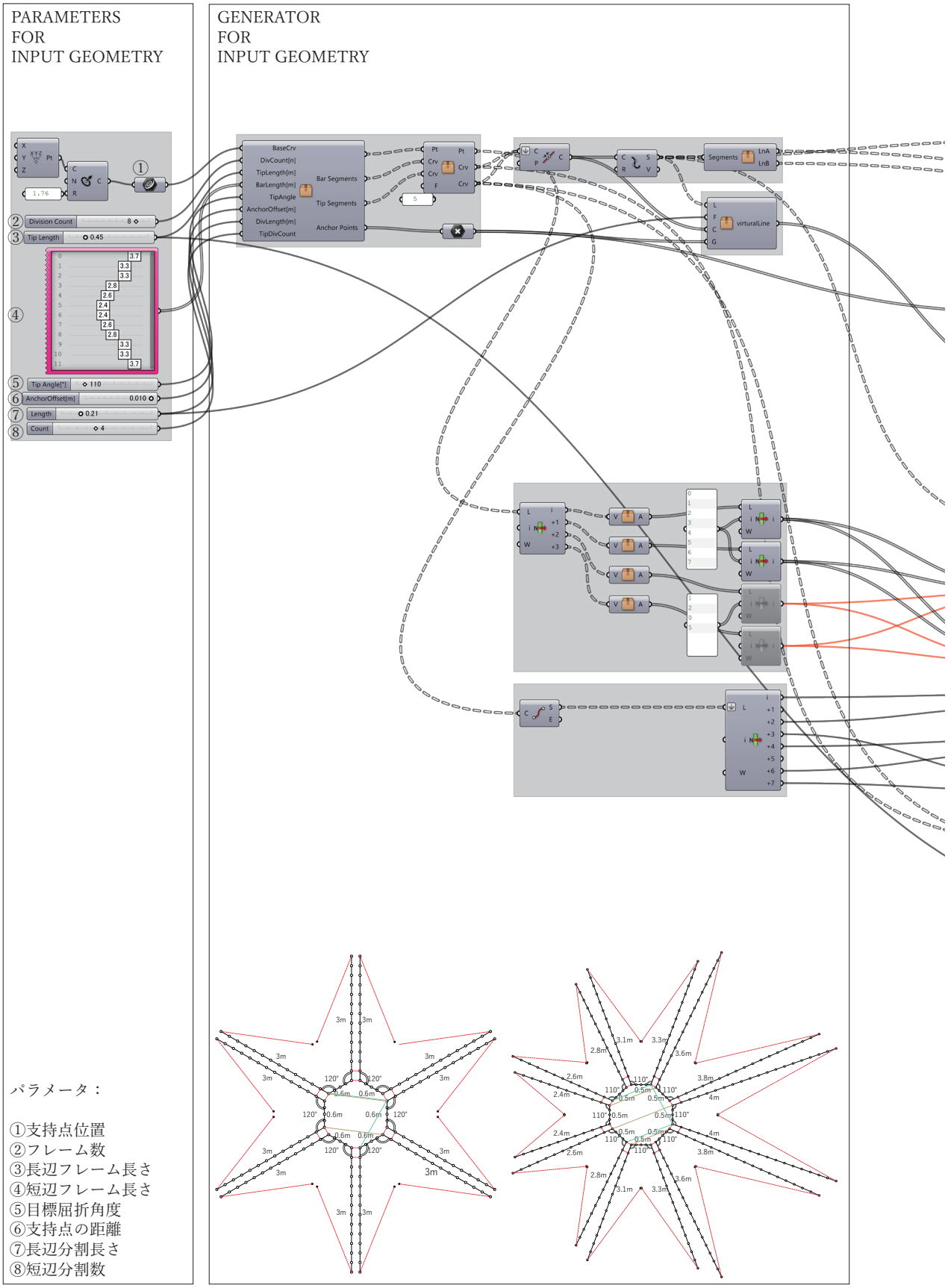


fig. 3.2.18: フレーム連結架構のシミュレーションシステムの全体系（前半：初期入力モデルの設定）

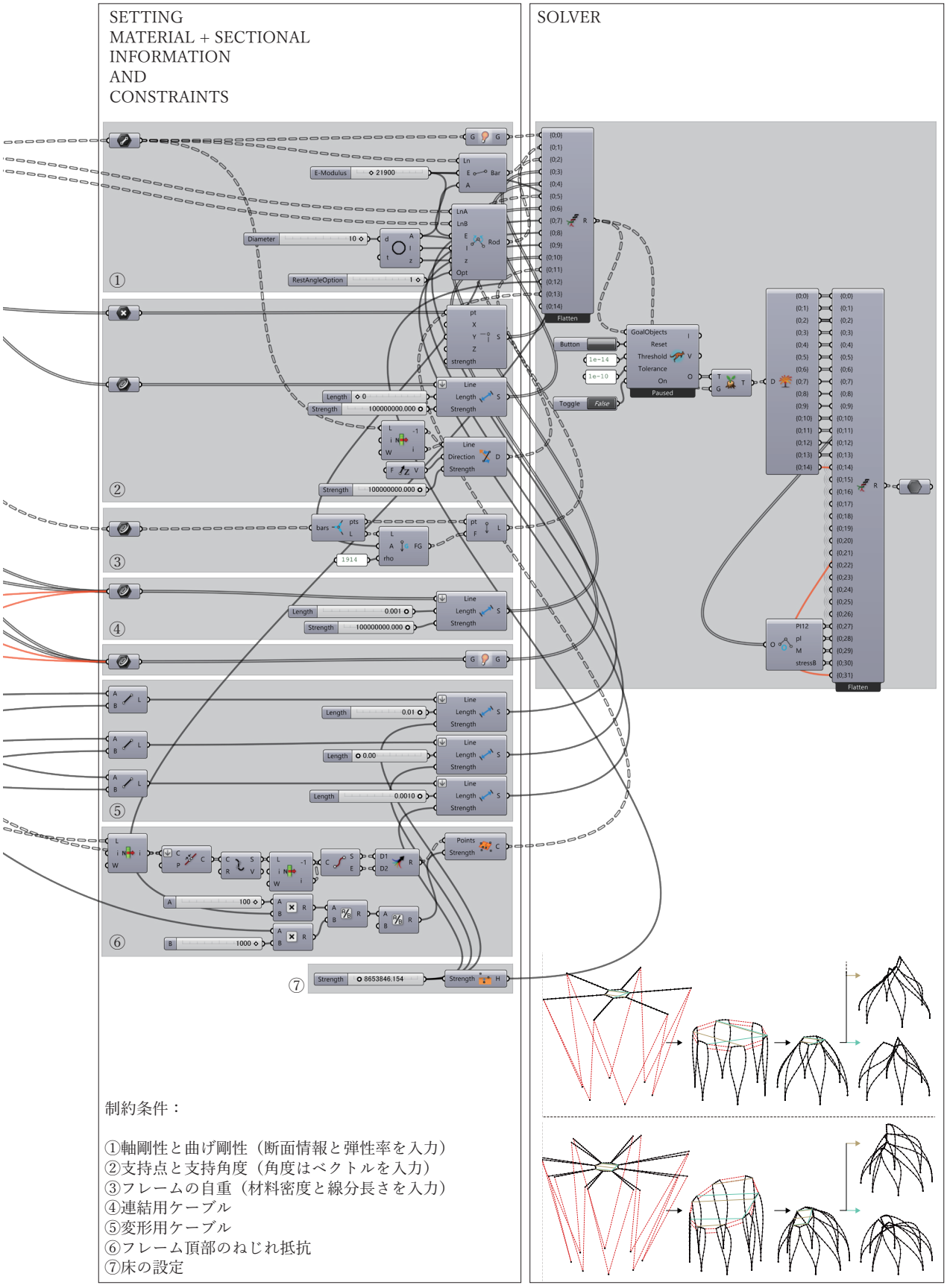
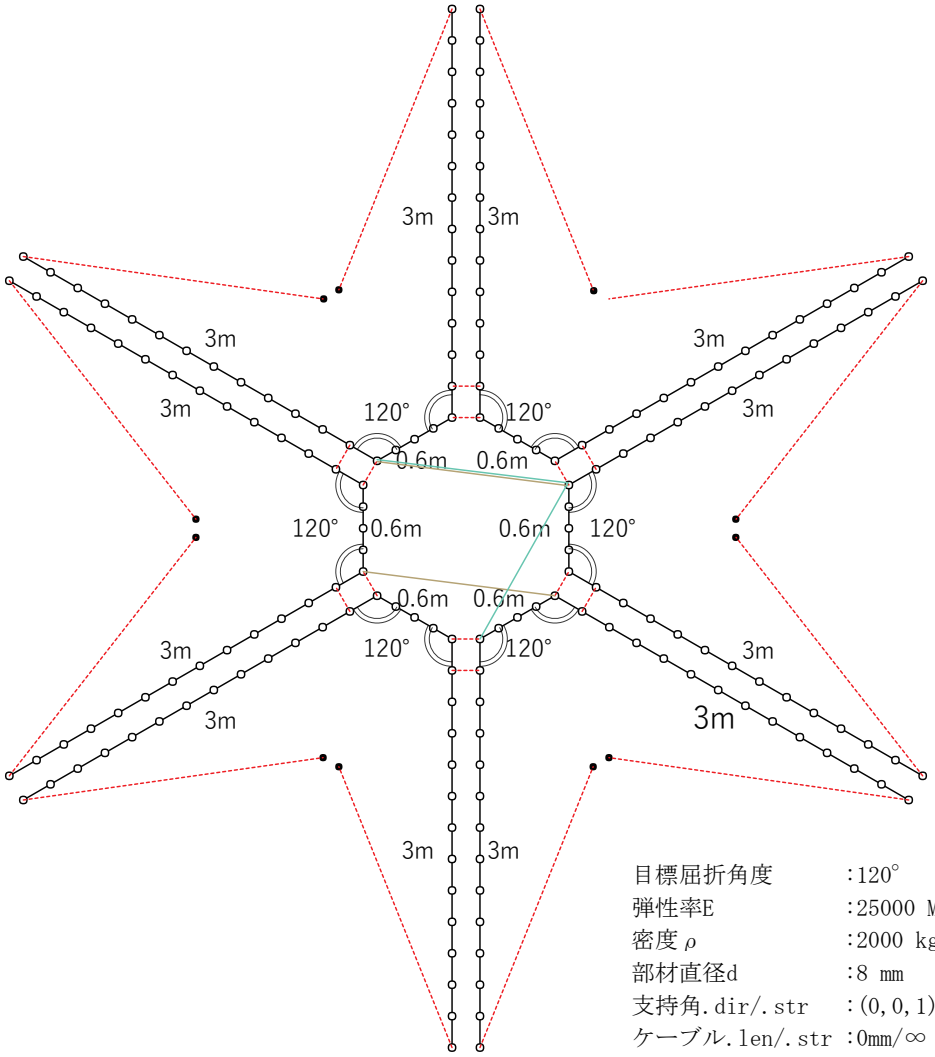


fig. 3.2.19: フレーム連結架構のシミュレーションシステムの全体系（制約条件の設定と形状決定）

<Input Geometry + Constraints>



目標屈折角度	:120°
弾性率E	:25000 MPa
密度 ρ	:2000 kg/m3
部材直径d	:8 mm
支持角.dir/.str	:(0,0,1)/∞
ケーブル.len/.str	:0mm/∞
Threshold	:1e-15
Tolerance	:1e-10

<SOLVER>

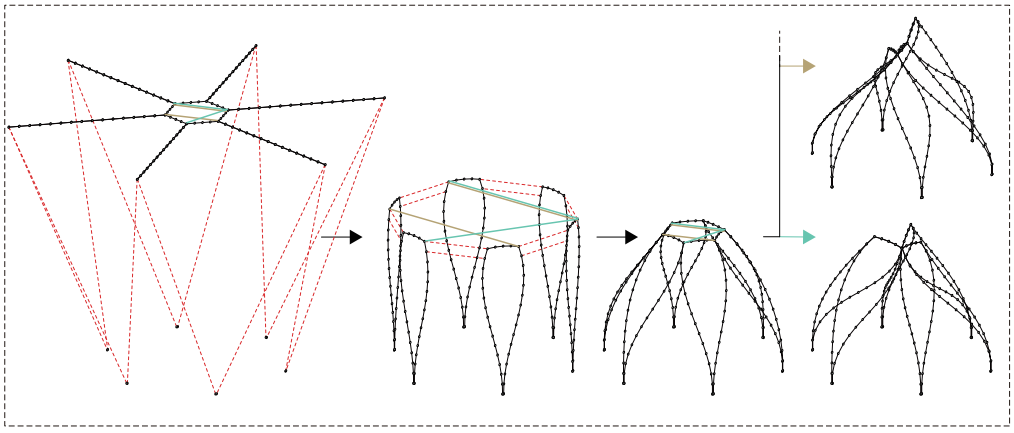


fig. 3.2.20: フレーム連結架構の形態生成の例 1

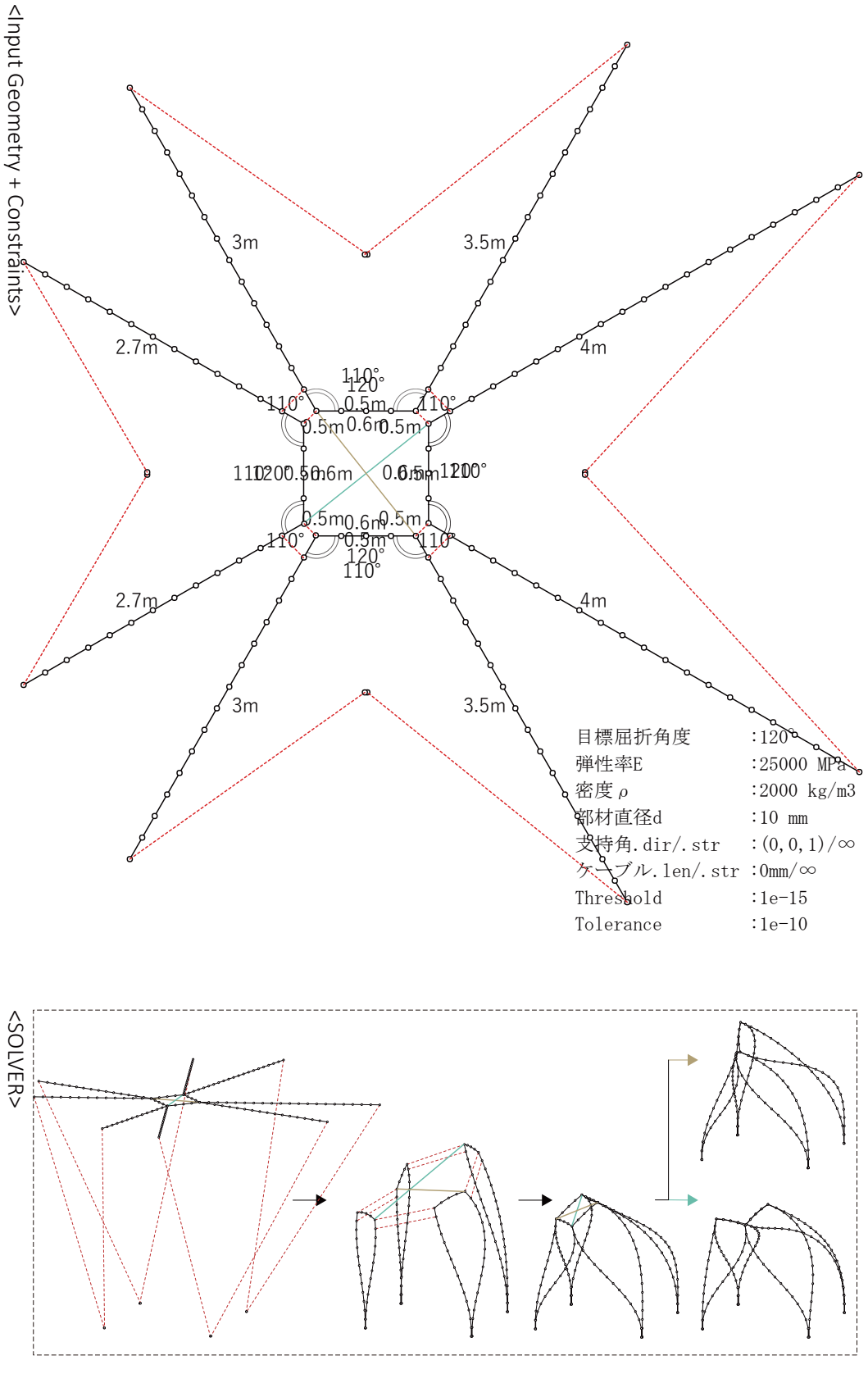


fig. 3.2.21: フレーム連結架構の形態生成の例 2

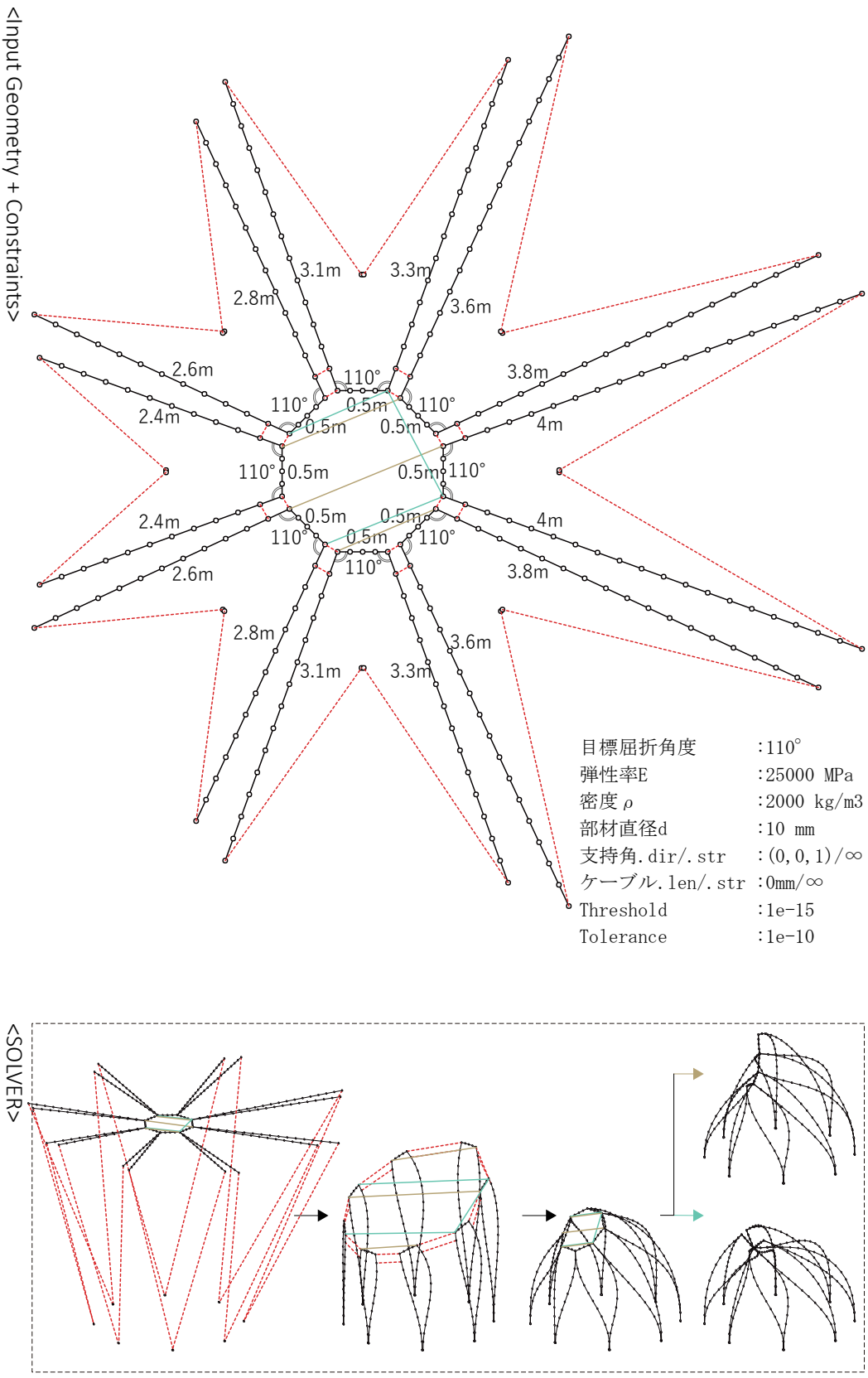


fig. 3.2.22: フレーム連結架構の形態生成の例 3

3.3.　膜の挙動のシミュレーション

本節では膜要素のモデル化を行う。膜を張る時に、膜がたるまないよう張力を与える必要があるが、その張力の影響により、FRP フレームの形状が変化することが見込まれる。そのため、膜としなやかな部材を組み合わせたときに、膜の適切な張力を探ることが一つの重要事項として挙げれる。

ここでは、屈折角度を持つフレームの端部を曲げ合わせた形状に膜を張ることを考える (fig.3.3.1)。まず、前述した方法でフレームを生成し、そのフレームで囲われる部分に対して膜に相当する線分モデルを生成する。膜に相当する線分モデルは、2 方向の直行グリッドとし、膜の線分モデルの端部は、フレームの節点と一致している必要があるため、初めに、③に示されるように、フレームの長辺の 2 つポリラインの節点同士を繋ぎ、フレーム短辺の分割数と等しくなるように分割する。次に、分割した点を縦に連結させ、④のように 2 方向のグリッドを構成する。フレームの入力情報は [Simulation1] により変形したものを入力データとしているが、各節点における挙動の制約も再度設定する必要がある。軸剛性および曲げ剛性については [Simulation1] と同様の値を与え、支持点の設定と支持角度も同様に設定することで、[Simulation1] で発生した応力を担保したまま膜を追加したシミュレーションが可能になる。

フレーム連結モデルに対して膜を追加する場合も同様にフレームのみで生成した架構に対して膜を追加することで形状を得る (fig.3.3.2)。

また、形状の変形操作については、前節と同様に開口部にケーブルを配置し縮小することによって形状を変えることができる (fig.3.3.2)。

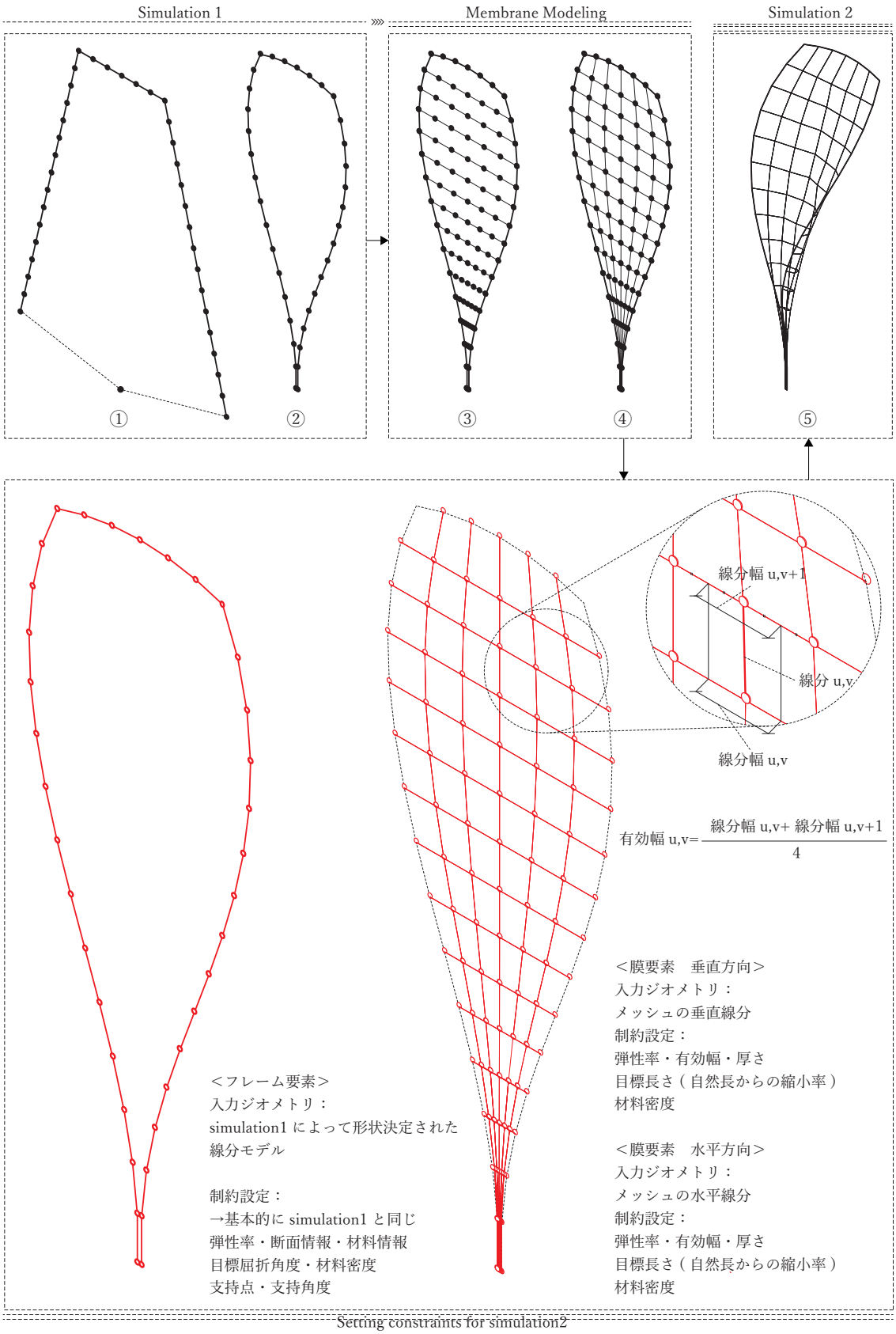


fig.3.3.1: 膜のモデル化とシミュレーションの流れ

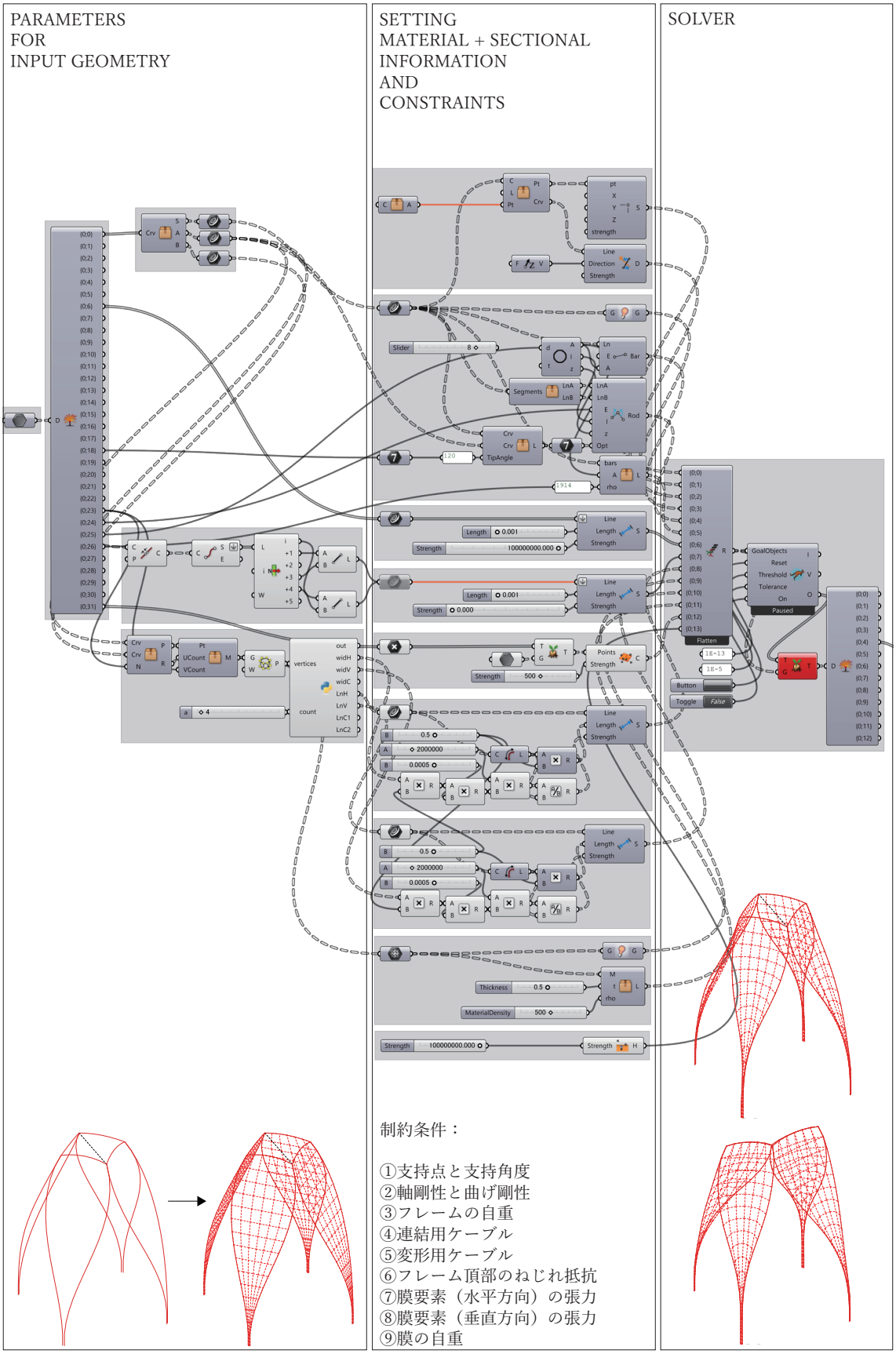


fig.3.3.2: 膜の挙動を再現するシミュレーションシステムの全体

3.4.　小結

第 3 章では、曲げ挙動および膜の挙動を考慮した 3 D モデリングのために位置ベースの物理シミュレーションツール Kangaroo2 を用いて、その理論とモデリングの手順を示し、いくつかのモデリング例を提示した。解析速度も速く、概ね再現できていることが伺える。

以上のシミュレーション方法を用いて、第 4 章では小模型における節点位置の実測値とシミュレーション結果を比較することでのその精度を検証する。また前述したように Kangaroo2 では、3 自由度の拘束のみしか与えられないため、部材のねじれは考慮されておらず、完全に正確なシミュレーションであるというわけではない。そのため、大幅にねじれが発生する場合には、その抵抗を再現するため CoPlanar という制約式を加えて補うが、ねじれ抵抗の強さ Cp.str の適切な値は現状不明であるため、同様に次章で検証する。

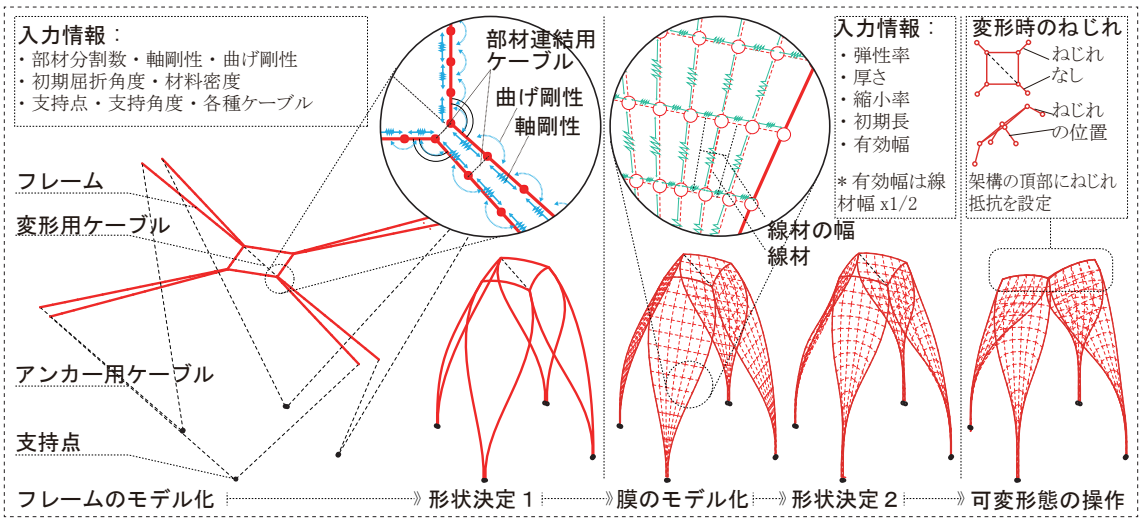
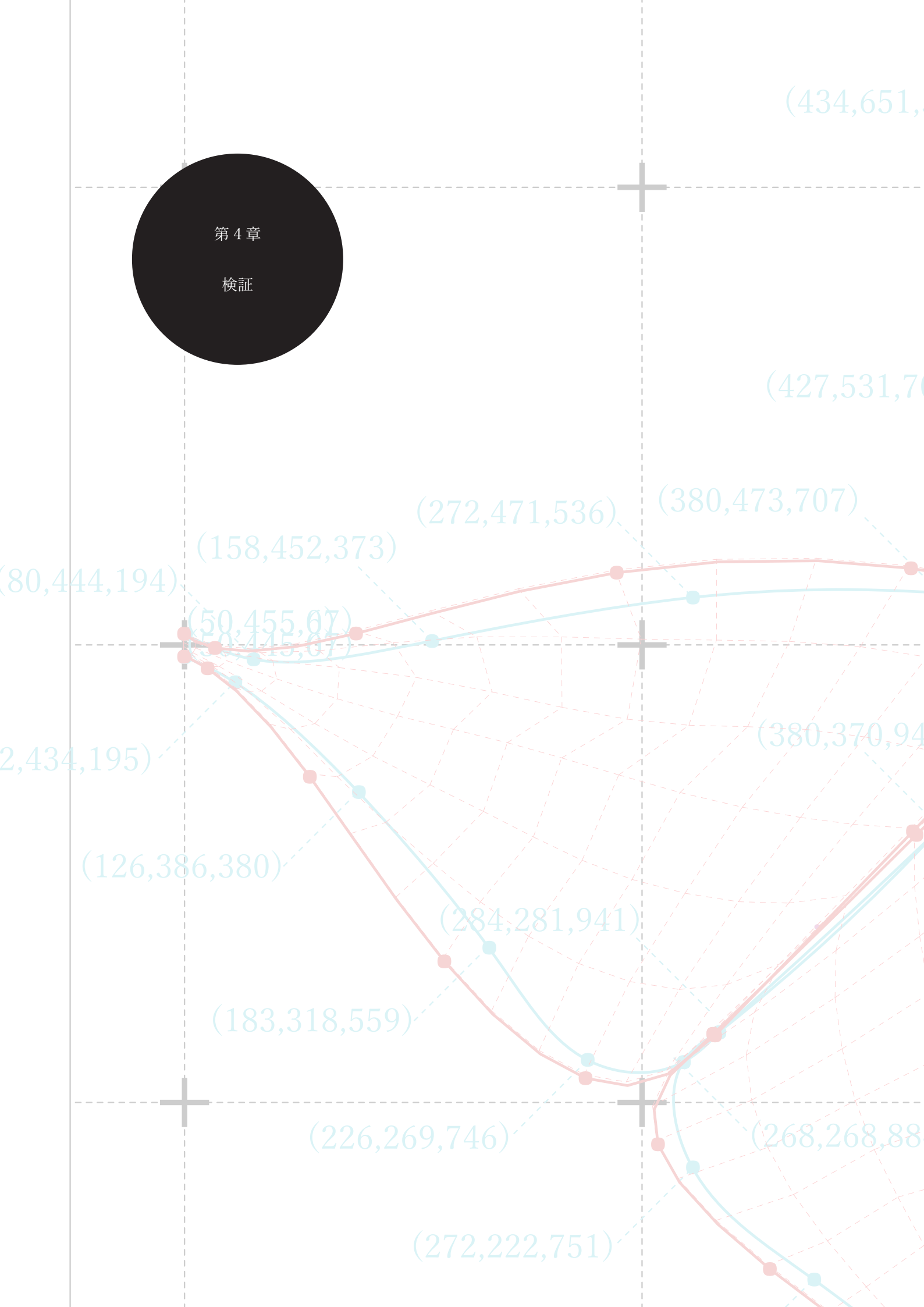


fig.3.4.1: シミュレーション・フロー

第 4 章

検証


(434,651,
(427,531,7
(380,473,707)
(272,471,536)
(158,452,373)
(80,444,194)
(380,370,94
2,434,195)
(126,386,380)
(284,281,941)
(183,318,559)
(226,269,746)
(268,268,88
(272,222,751)

4.0. 本章の概要

4.1. 試験体制作と材料特性
4.1.1. GFRP
4.1.2. 膜

4.2. 曲げ挙動の検証
4.2.1. 棒
4.2.2. フレーム
4.2.3. フレーム連結架構

4.3. 膜の挙動の検証

4.4. 小結

4.0.　本章の概要

本章では、部材の曲げ挙動および膜の伸縮による挙動の精度の妥当性および第 3 章で記述した架構頂部のねじれ抵抗の適切な値を定めることを目的としている。そのため、実際に GFRP を材料とした柔軟性のある部材を製作し、その強度と硬さを実験を行い確かめた上で、シミュレーションと模型における挙動を比較し検証を行う。

最終的には、以下の (fig.4.0.1) に示す 4 つのフレームからなる高さ 900mm 程度、スパン 800mm 程度の架構を構築し、架構の形状を変化させる前と変化させた後の状態において膜なし・膜ありの計 4 状態において実測し比較検証を実施する。
フレーム連結モデル膜ありにおける実際にしなやかな材料として GFRP を用いて小模型を製作し

また、として、以下の図に示す 4 つの小模型を製作し、実測値と解析値の比較検証を行う。

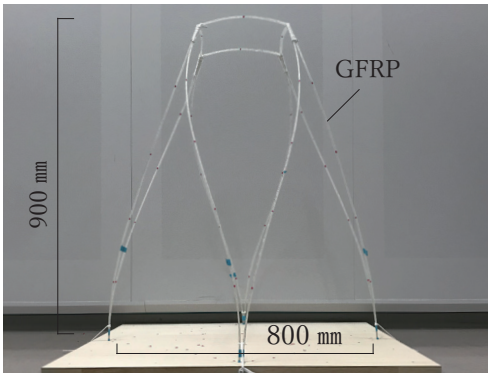
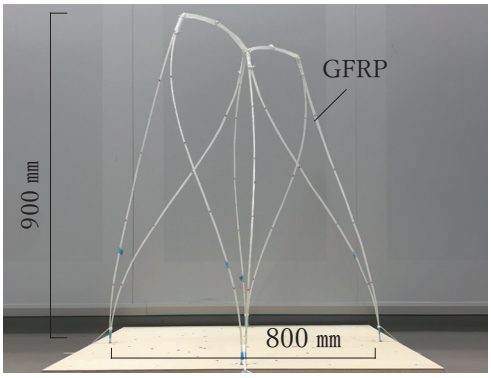
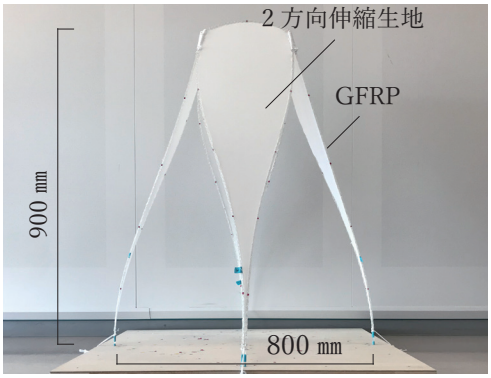
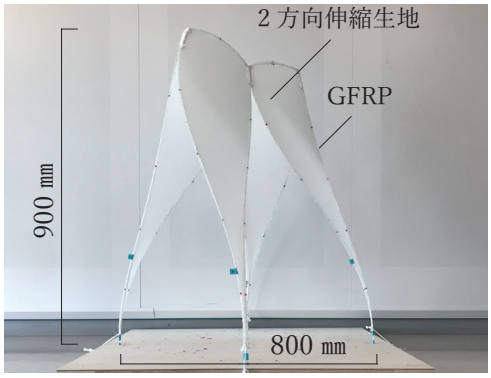
	type1 **上部の開口を開いた状態**	**type2** **上部の開口を閉じた状態**
膜なし		
膜あり		

fig.4.0.1: 検証の対象となる架構の 4 つの状態

4.1.　部材制作

4.1.1.　GFRP

本ケーススタディでは、実際に 1/1 の構造体を製作することを考慮し、自由な成型が容易であり、比較的安価な GFRP を主材料として用いて製作を行った。ここでは、その使用材料、製作方法、強度について報告する。

○使用材料

・補強材：ガラスロービング

ロービングは、ナトリウムやカリウムなどのアルカリ成分を含まない無アルカリガラスのストランド（ガラスの単繊維に集束剤を塗布し集束したもの）又はストランドを引きそろえたものであり、通常はロールにまかれている。ロービング 1 本は、数百本のガラス繊維が束ねられたもので、今回使用したものは、直径 2mm 程度のロービングである。

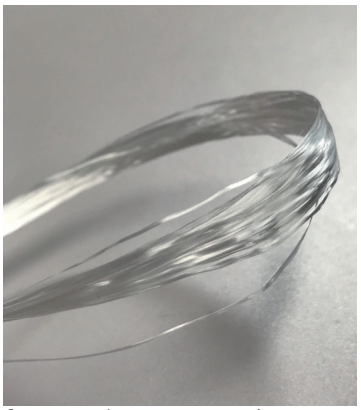


fig.4.1.1: ガラスロービング

・母材：オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂

不飽和ポリエステル樹脂は、FRP 制作における代表的なプラスチック原料であり、樹脂の原料にはそれぞれ種類があるが、今回用いるオルソフタル酸系を原料とした不飽和ポリエステル樹脂は、酸やアルカリによって加水分解する性質があり、耐食性には優れない。種類としては、より耐熱性や耐候性などに優れた高性能なイソフタル酸系の樹脂も他にあるが、今回は一時的な利用であり、特に影響が考えられないことに加え、安価であるためをオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂を使用する。

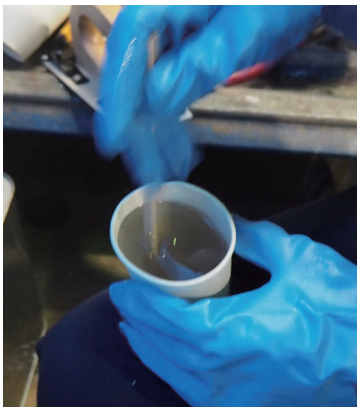


fig.4.1.2: ポリエステル樹脂と硬化剤を反応させている様子

・硬化剤：メチルエチルケトンパーオキサイト｜ MEKPO

ポリエステル樹脂などを硬化させるために添加する一般的な硬化開始剤。

・コーティング剤：空気硬化剤（パラフィン）

パラフィンは、FRP の表面部分をコーティングするために使用される。今回使用する樹脂は、ノンパラと呼ばれ、製品にパラフィンが含まれない樹脂であるため、コーティング時に樹脂に添加したのち、硬化剤と混ぜて使用する。

○制作方法

①ガラス繊維を支持するフレームの設置 (fig.4.1.3)

ガラス繊維の両端部に引張力を与え直線を保つため、木材で固定枠を制作し設置する。

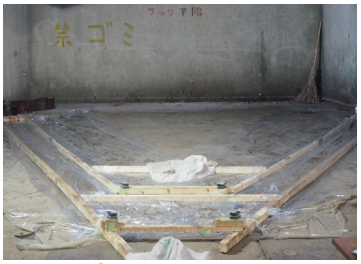


fig.4.1.3: ①固定枠の設置

②ガラス繊維の配置 (fig.4.1.4)

ガラス繊維のロービングを固定枠に配置する。この時、可能な限り繊維のたるみを少なく配置することに注意する。

fig.4.1.4: ②ガラス繊維の配置

③溶剤の製作 (fig.4.1.2)

容器にオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂（以下､樹脂）を入れる。樹脂に硬化剤 MEKPO（以下、硬化剤）を 0.5%－1.0%の割合で添加し、反応不良とならないよう攪拌する。

fig.4.1.5: ④樹脂の塗布の様子

④ガラス繊維への塗布 (fig.4.1.5)

ガラス繊維が透明になることを目安に樹脂を全体に浸透させる。樹脂の塗布は、ゴム手袋を着用した上、手で浸透させた。

fig.4.1.6: ⑥空気中で自然硬化

⑤樹脂を塗布したロービングをねじる

そのまま塗布した状態で硬化させると、重力によって垂れ下がり、GFRP の断面形状が歪んだ仕上がりになる場合が多い。ロービングをねじることで､断面のゆがみを均一にする。また、ロービングをねじることで、余分な樹脂を取り除き、樹脂の量をフレーム上で均一にする。

⑥空気中で自然硬化 (fig.4.1.6)

空気中で放置し硬化させる、効果速度は加えた硬化剤の量と温度によって変動するが、概ね 3 時間程度で全体が固くなり、10 時間程度で完全に硬化した状態となった。樹脂塗布及び硬化は、約 20℃～ 30℃の条件下で行った。

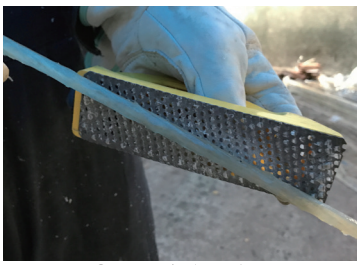


fig.4.1.7: ⑦仕上げ（研磨）

⑦表面仕上げ (研磨及びコーティング)(fig.4.1.7,8)

GFRP が成形された後、固定枠から取り外し凹凸のある部分や､毛羽立っている部分を研磨し､滑らかにした。その後､コーティングをすることで完成となる。コーティング剤には、③の過程で用いたものと同じ樹脂と硬化剤を用いるが、樹脂に硬化剤を加える前にパラフィンを樹脂の 5%添加したものを扱った。

fig.4.1.8: ⑦仕上げ (コーティング)

○簡易曲げ試験

前述した方法で製作した GFRP を用いて簡易な曲げ試験を行い、シミュレーションに必要な弾性率と降伏曲げ応力度及び終局強度を求める。

・試験片

曲げ試験を行った試験片は、全 5 体である。試験片の外形は (fig.4.1.9) の通り。それぞれの部材の直径をノギスで計測し、全長および重さも同様に計測し、個々の密度を算出した。各数値は、(table.4.1.2) にまとめている。部材表面を見ると多少凹凸があるものがあるが、一定の断面であると仮定する。

・方法

GFRP を (fig.4.1.10) のように台座に掛け、単純梁（支点距離 400mm）とみなし、に対して中心部分をばねばかりで鉛直上向きに引張り、曲げ試験を行った (fig.4.1.11)。GFRP は原則椅子に固定しないが、位置がずれないように、養生テープで支持位置を仮止めした状態で開始した。

予備実験では、荷重と変位の大まかな関係と読み取りのステップ数を確認するため試験片 #1 を対象として 2kg 毎にその変位を記録した。その結果から 22kg 時点で終局を迎え、変位は 76mm であった。直径 8.5mm の部材に対してこれ以上スパンが短くなると変位の読み取りが困難になり、一方でスパンが広くなると、部材が大きく変形してしまうことから、簡易試験における試験片の支持長については適切であると考えられる。一方で、読み取りのステップに関しては、全体の傾向こそはつかめたものの、降伏点を読み取るには粗かった。そのため、本試験では、1kg 毎に変位を読み取ることとした。

なお荷重と変位の読み取りは実験の様子を正面方向から動画で記録し、実験後、動画から音声と目視によって読み取った。

・結果

試験から読み取った値を (table.4.1.2) および (fig.4.1.13) に示している。予備試験も含め、いずれの試験片も徐々に荷重に対するたわみ量も大きくなることが確認された。試験では、試験片 #0、#2 および #3 において破断時まで検証することができたが他 2 体は、破断前で支持位置が大幅にずれてしまったため、終局まで検証できなかった。部材が破断すると

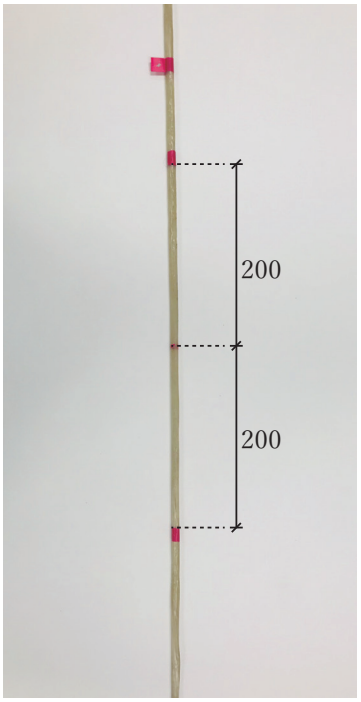


fig.4.1.9: 試験片概要

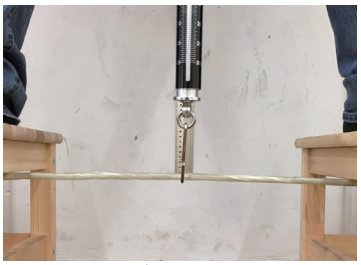


fig.4.1.10: 曲げ試験のセットアップ

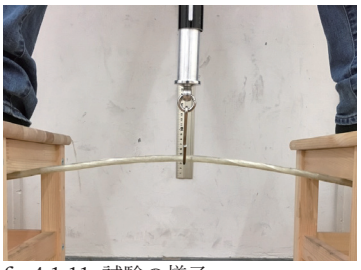


fig.4.1.11: 試験の様子

(fig.4.1.12) のように硬化されていた繊維がさけ、白くなり脆性的に折れるという繊維質の材料にみられる典型的な破壊が生じた。

各試験片の弾性率および降伏曲げ応力度も同様に表に示しているが、試験ごとに硬さと強さのばらつきはあるものの概ね近しい値を得ることができた。そのなかでも試験片 #1 及び #4 が弾性率に対して高い曲げ強さであったが、これは材料の制作において十分に樹脂がガラス繊維に対して浸透し、硬化していること、余分な樹脂が絞られ断面当たりのガラス繊維の密度が高くなっていることが影響していると考えられる。一方で破断した 3 体を観察すると、部材に白い部分が残り、樹脂が浸透していない部分があることが確認できる。

実際に制作する過程でいずれの場合も発生しうると考え、今回、弾性率及び降伏曲げ応力度は、各結果の平均値をとり、21.9GPa と 229MPa と設定する。なお、参考として終局時の曲げ強さを 375MPa, 比重は平均値 1.914 を採用した。

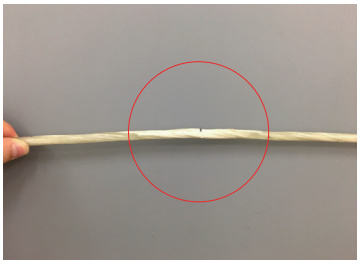


fig.4.1.12: 破断部分の様子

table.4.1.1: 結果の平均

比重:1.9
弾性率:21.9GPa
降伏強度:229MPa
終局強度:375MPa

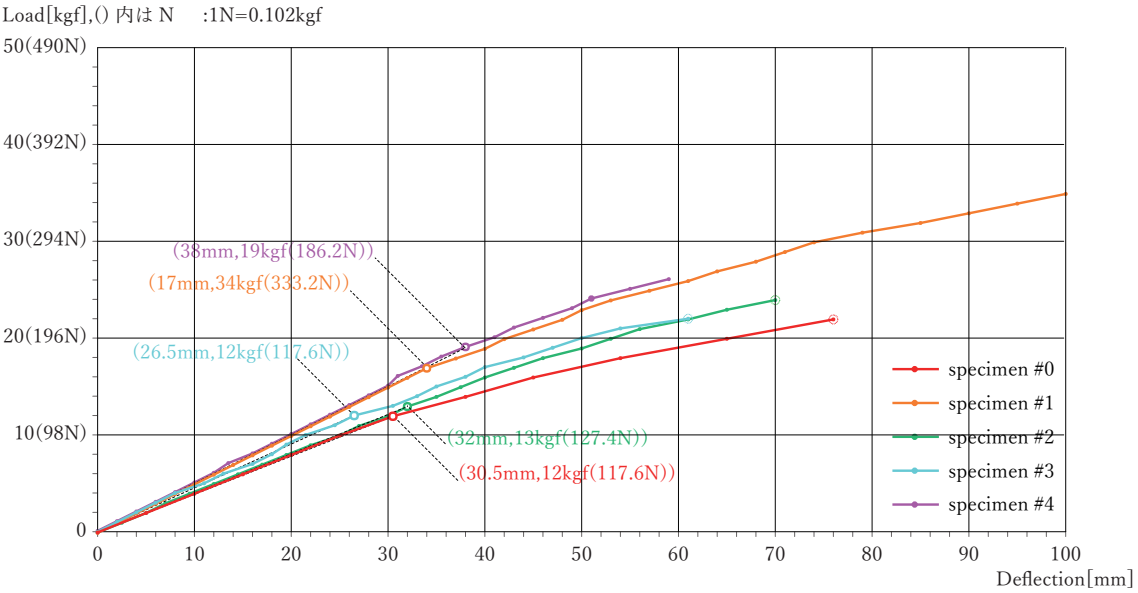


fig.4.1.14: 実験結果　各試験片の荷重と変形の関係（白抜きの○が降伏点、破線の○が破断点を示す）

table.4.1.2: 各試験片の曲げ試験結果と材料特性（赤塗が降伏点を示し、赤字が終局を示す）

試験片 #0	
直径　8.5[㎜]	
比重　1.939	
荷重kgf(N)	変位㎜
0　(0)	0
2　(19.6)	5
4　(39.2)	10
6　(58.8)	15
8　(78.4)	20
10 (98)	25
12 (117.6)	30.5
14 (137.2)	38
16 (156.8)	45
18 (176.4)	54
20 (196)	65
22 (215.6)	76
弾性率:20.1GPa	
降伏強度:195MPa	
終局強度:364GPa	

試験片 #1	
直径　9.0[㎜]	
比重　1.789	
荷重kgf(N)	変位[㎜]
0　(0)	0
1　(9.8)	2
2　(19.6)	4
3　(29.4)	6
4　(39.2)	8
5　(49)	10
6　(58.8)	12
7　(68.6)	14
8　(78.4)	16
9　(88.2)	18
10 (98)	20
11 (107.8)	22
12 (117.6)	24
13 (127.4)	26
14 (137.2)	28
15 (147)	30
16 (156.8)	32
17 (166.6)	34
18 (176.4)	37
19 (186.2)	40
20 (196)	42
21 (205.8)	45
22 (215.6)	48
23 (225.4)	50
24 (235.2)	53
25 (245)	57
26 (254.8)	61
27 (264.6)	64
28 (274.4)	68
29 (284.2)	71
30 (294)	74
31 (303.8)	79
32 (313.6)	85
33 (323.4)	90
34 (333.2)	95
35 (343)	100
36 (352.8)	-
37 (362.6)	-
38 (372.4)	-
39 (382.2)	-
40 (392)	-
弾性率:20.3GPa	
降伏強度:233MPa	
終局強度:-	

試験片 #2	
直径　8.5[㎜]	
比重　1.950	
荷重kgf(N)	変位[㎜]
0　(0)	0
1　(9.8)	2.5
2　(19.6)	5
3　(29.4)	7
4　(39.2)	9.5
5　(49)	12
6　(58.8)	14.5
7　(68.6)	17
8　(78.4)	19.5
9　(88.2)	22
10 (98)	25
11 (107.8)	27
12 (117.6)	30
13 (127.4)	32
14 (137.2)	35
15 (147)	37.5
16 (156.8)	40
17 (166.6)	43
18 (176.4)	46
19 (186.2)	50
20 (196)	53
21 (205.8)	56
22 (215.6)	61
23 (225.4)	65
24 (235.2)	70
25 (245)	
26 (254.8)	
27 (264.6)	
28 (274.4)	
29 (284.2)	
30 (294)	
31 (303.8)	
32 (313.6)	
33 (323.4)	
34 (333.2)	
35 (343)	
36 (352.8)	
37 (362.6)	
38 (372.4)	
39 (382.2)	
40 (392)	
弾性率:20.7GPa	
降伏強度:211MPa	
終局強度:398MPa	

試験片 #3	
直径　8.5[㎜]	
比重　1.907	
荷重kgf(N)	変位[㎜]
0　(0)	0
1　(9.8)	2
2　(19.6)	4
3　(29.4)	6
4　(39.2)	8
5　(49)	11
6　(58.8)	13
7　(68.6)	16
8　(78.4)	18
9　(88.2)	19.5
10 (98)	21.5
11 (107.8)	24.5
12 (117.6)	26.5
13 (127.4)	30.5
14 (137.2)	33
15 (147)	35
16 (156.8)	38
17 (166.6)	40
18 (176.4)	44
19 (186.2)	47
20 (196)	50
21 (205.8)	54
22 (215.6)	61
23 (225.4)	
24 (235.2)	
25 (245)	
26 (254.8)	
27 (264.6)	
28 (274.4)	
29 (284.2)	
30 (294)	
31 (303.8)	
32 (313.6)	
33 (323.4)	
34 (333.2)	
35 (343)	
36 (352.8)	
37 (362.6)	
38 (372.4)	
39 (382.2)	
40 (392)	
弾性率:23.1GPa	
降伏強度:195MPa	
終局強度:364MPa	

試験片 #4	
直径　8.5[㎜]	
比重　1.986	
荷重kgf(N)	変位[㎜]
0　(0)	0
1　(9.8)	2
2　(19.6)	4
3　(29.4)	6
4　(39.2)	8
5　(49)	10
6　(58.8)	12
7　(68.6)	13.5
8　(78.4)	16
9　(88.2)	18
10 (98)	20
11 (107.8)	22
12 (117.6)	24
13 (127.4)	26
14 (137.2)	28
15 (147)	30
16 (156.8)	31
17 (166.6)	33.5
18 (176.4)	35.5
19 (186.2)	38
20 (196)	41
21 (205.8)	43
22 (215.6)	46
23 (225.4)	49
24 (235.2)	51
25 (245)	55
26 (254.8)	59
27 (264.6)	-
28 (274.4)	-
29 (284.2)	-
30 (294)	-
31 (303.8)	-
32 (313.6)	-
33 (323.4)	-
34 (333.2)	-
35 (343)	-
36 (352.8)	-
37 (362.6)	-
38 (372.4)	-
39 (382.2)	-
40 (392)	-
弾性率:25.5GPa	
降伏強度:309MPa	
終局強度:-	

4.1.2.　膜

fig.4.1.13: 伸縮膜

○使用材料

2 方向に伸縮性のある生地（ナイロン 80% 、ポリウレタン 20%、以下 A 膜とする）および 1 方向に伸縮性のあるニット生地（ポリエステル 100%、以下 B 膜とする）に対して引張試験を行った。

○簡易引張試験

・試験片

A 膜および B 膜から、縦方向と幅方向に 120mmx50mm の寸法で 1 枚ずつ切り出し、合計 4 枚の膜を対象に引張試験を行う (fig.4.1.14)。A 膜の厚みは 0.5mm、B 膜の厚みは 0.3mm 程度である。

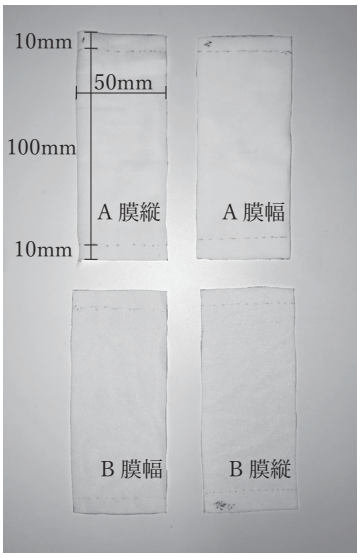


fig.4.1.14: 試験片

・方法

引張試験のセットアップ図を (fig.4.1.15) に示す。各試験片の一端から 10mm のところをクランプした状態でもう一端にクリップを挟み、ばねばかりを引掛けた。ばねばかりによって 0.1kg ごとに引張を与え、その時の膜の伸びを記録することで実験を行った (fig.4.1.16)。なお、実験中クランプした部分が抜けないように注意して実験を行った。

fig.4.1.15: 引張試験のセットアップ図

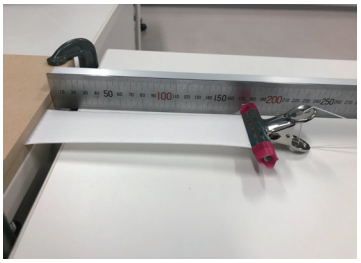


fig.4.1.16: 引張試験の様子

・結果

試験結果を (fig.4.1.18) および (table4.1.13) に示す。結果から分かる通り、A 膜は 2 方向に伸縮性があるが、その方向よっても伸びやすさに若干の違いがある。しかし、いずれも 140% 程度伸びたところから非線形に硬さが変わることがグラフから確認できる。今回は、140%程度以内の伸縮をファブリケーションで扱うと想定し、弾性率はこの範囲で算出した。

また B 膜については、縦方向と幅方向では 3-5 倍伸びやすさが異なり、縦方向では 140%程度、幅方向では 110%程度に伸びたところで同じく非線形に剛性が上がる。この場合も上記の程度の伸縮を想定して、1 次線形段階とみなせる範囲の弾性率を採用した。

比重は計測できなかったため、解析では、いずれの膜においても 0.5 とした。

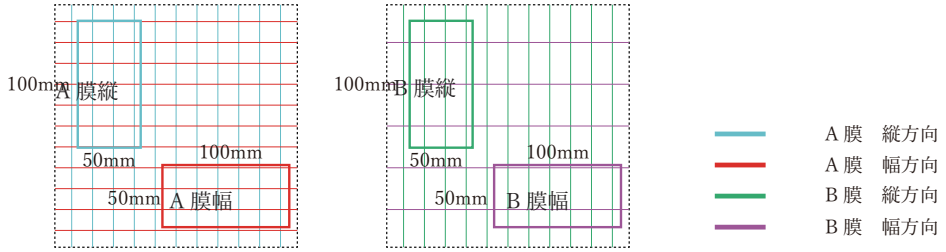


fig.4.1.17: 試験片の膜の種類と向きの対応

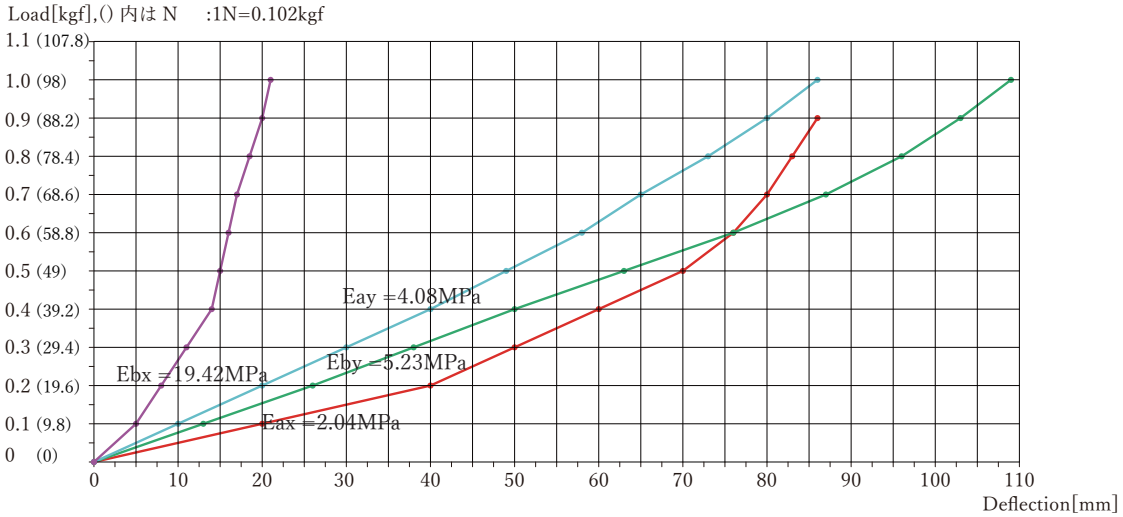


fig.4.1.18: 実験結果　各試験片の荷重と変形の関係

table.4.1.3: 各試験片の引張試験結果と材料特性（赤線までを対象に弾性率を算出）

specimen A膜縦 支持間長*幅*厚 100㎜*50㎜*0.5㎜	
荷重kgf(N)	変位㎜
0.0 (0)	0
0.1 (0.98)	10
0.2 (1.96)	20
0.3 (2.94)	30
0.4 (3.92)	40
0.5 (4.9)	49
0.6 (5.88)	58
0.7 (6.86)	64
0.8 (7.84)	72
0.9 (8.82)	78
1.0 (9.8)	84
弾性率:4.08MPa	

specimen A膜幅 支持間長*幅*厚 100㎜*50㎜*0.5㎜	
荷重kgf(N)	変位㎜
0.0 (0)	0
0.1 (0.98)	20
0.2 (1.96)	40
0.3 (2.94)	50
0.4 (3.92)	60
0.5 (4.9)	70
0.6 (5.88)	76
0.7 (6.86)	80
0.8 (7.84)	83
0.9 (8.82)	86
1.0 (9.8)	-
弾性率:2.04GPa	

specimen B膜縦 支持間長*幅*厚 100㎜*50㎜*0.3㎜	
荷重kgf(N)	変位㎜
0.0 (0)	0
0.1 (0.98)	13
0.2 (1.96)	26
0.3 (2.94)	38
0.4 (3.92)	50
0.5 (4.9)	63
0.6 (5.88)	76
0.7 (6.86)	87
0.8 (7.84)	96
0.9 (8.82)	103
1.0 (9.8)	109
弾性率:5.23MPa	

specimen B膜幅 支持間長*幅*厚 100㎜*50㎜*0.3㎜	
荷重kgf(N)	変位㎜
0.0 (0)	0
0.1 (0.98)	5
0.2 (1.96)	8
0.3 (2.94)	11
0.4 (3.92)	14
0.5 (4.9)	15
0.6 (5.88)	16
0.7 (6.86)	17
0.8 (7.84)	18.5
0.9 (8.82)	20
1.0 (9.8)	21
弾性率:19.4MPa	

4.2.　曲げ挙動の検証

4.2.1.　棒

予備的な検証として単純な GFRP 棒を用いた検証を行った。

○方法

土台に支持された GFRP 棒を手で曲げ (fig.4.2.5)、その様子を撮影した画像とシミュレーションによるモデルの結果を重ね合わせることで比較する。なお、部材が固定されている土台表面から､指先の位置までの長さ (計測長) をシミュレーションの入力値として設定する (fig.4.2.1)。

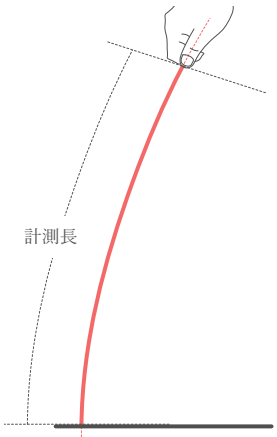


fig.4.2.1: 計測長

○試験片

直線状の GFRP を用いる。試験片の直径は 5.0mm、計測長は 533mm である。

○シミュレーション設定

部材を直立させ、その上端と画像上の変異点（指の先の位置）を結ぶ仮想ケーブルを配置し強制的に変位を与える (fig.4.2.2)。部材は 30 分割した線材モデルを入力データとした。

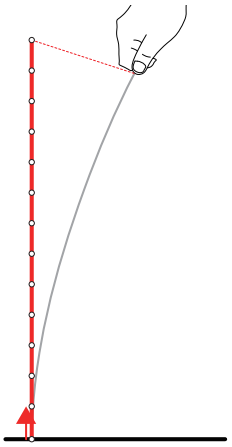


fig.4.2.2: シミュレーション設定

○結果と考察

模型実験による曲げの挙動とシミュレーションによる曲げの挙動を重ね合わせた図を (fig.4.2.3,4) に示した。各固定位置においても、実験の写真に対してシミュレーションが極めて近い結果となった。ここまで高い精度を得れたのは、形状の単純さに加え、ねじれが発生しない純曲げの変形であるからと考えられる。

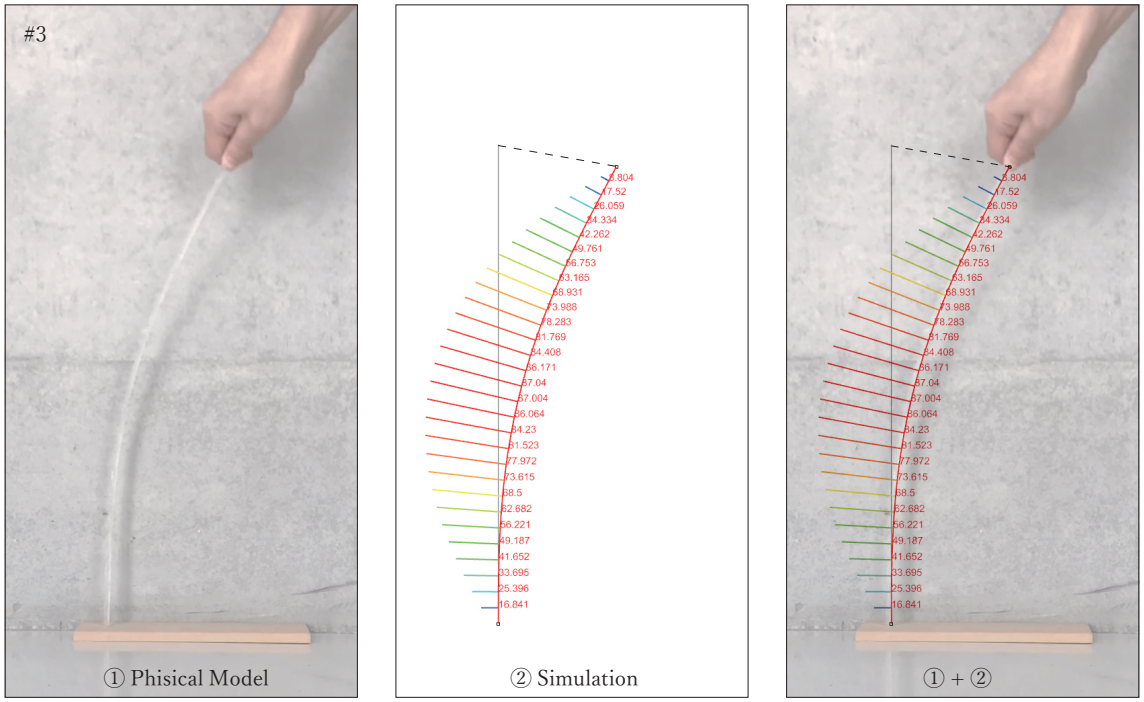


fig.4.2.3: 棒要素の曲げ挙動 #3 における模型とシミュレーションの比較

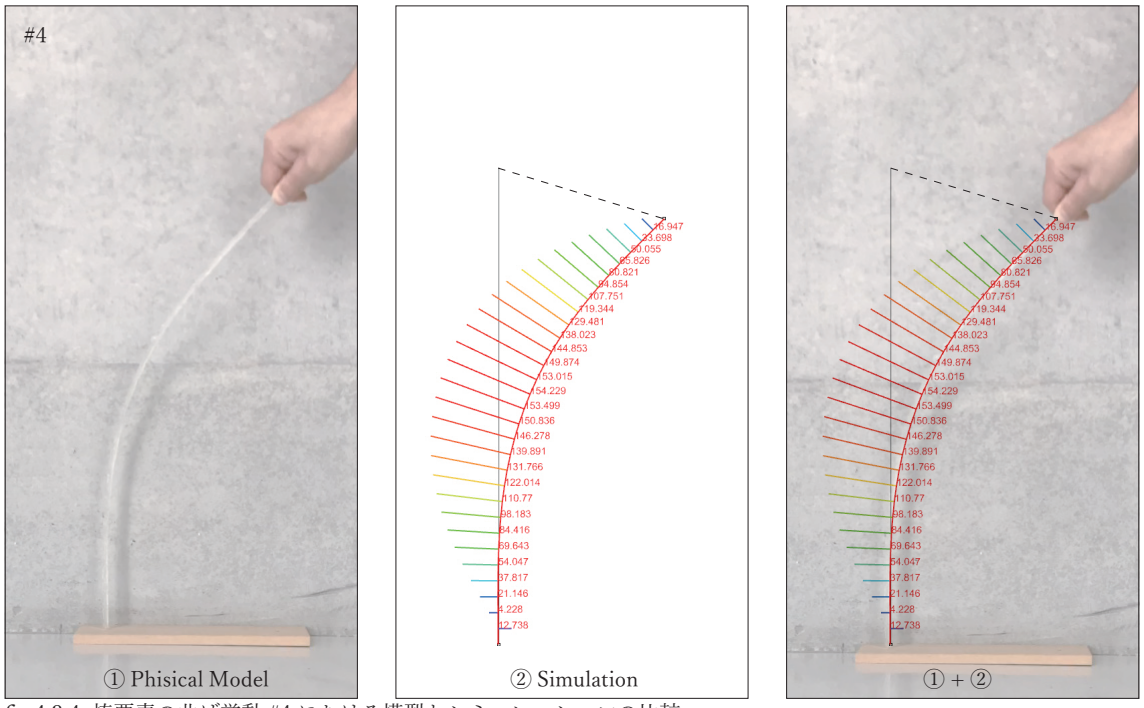


fig.4.2.4: 棒要素の曲げ挙動 #4 における模型とシミュレーションの比較

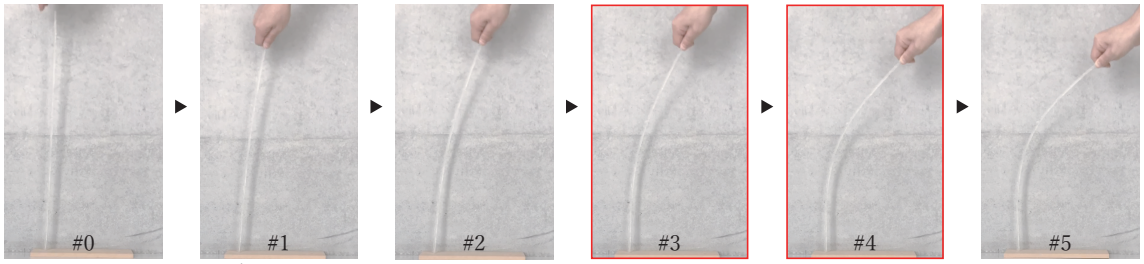
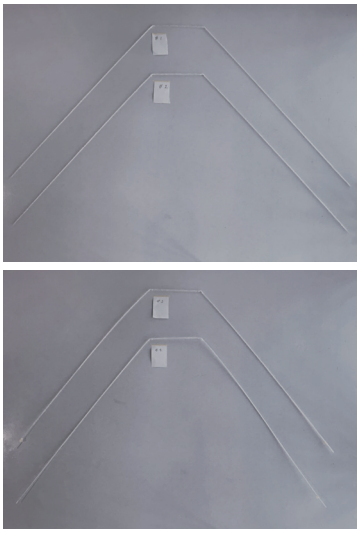


fig.4.2.5: GFRP 棒の曲げ挙動

4.2.2.　フレーム



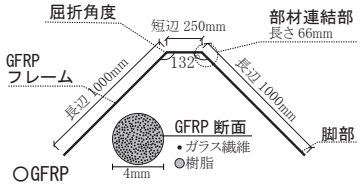


fig.4.2.6: 4 つ試験片および寸法

○概要と試験片

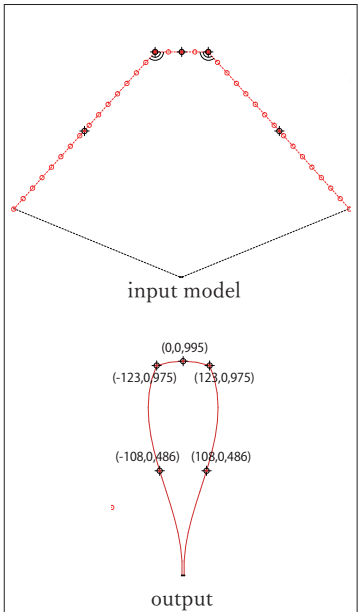
フレーム上に屈折角度を持つ部材について検証を行う。また、それぞれのフレーム同士を比較することで、製作精度も確認する。フレームは GFRP で製作する。フレームの直径は 4mm 程度を想定し、固定枠に 6 本のロービングを配置し、硬化させ、4 つのフレームを製作した (fig.4.2.6)。製作した試験体を計測した結果、試験体によって、あるいは場所によって、直径に 0.5mm 程度の誤差がみられた。フレーム頂部の角度は、135° をターゲットとして制作したが、計測したところ約 132° 程度であった。フレーム長さは短辺 250mm、長辺 1000mm であった。

○検証方法

まず、試験体の両端部を土台に固定する。部材が自重で若干傾いてしまうため、直立した状態で頂部を壁に弱く固定した (fig.4.2.8 左上)。この状態で正面から撮影した画像から GFRP のトレース線を作画し、シミュレーション結果を重ね合わせたのち、同等に細分割し、対応しあうそれぞれの点間の距離を計測し、その最大と平均を算出することで検証する。

○シミュレーション設定

詳細を (fig.4.2.7) に示す。直線のフレーム形状の端部を固定点に引き付け、脚部の角度が垂直になるように拘束する設定を行った。分割数は長辺の 15 分割､短辺 4 分割とした。フレーム角度を 132° とし、直径は、多少のばらつきがみられたが、シミュレーションでは考慮せず、一様に 4mm とした。



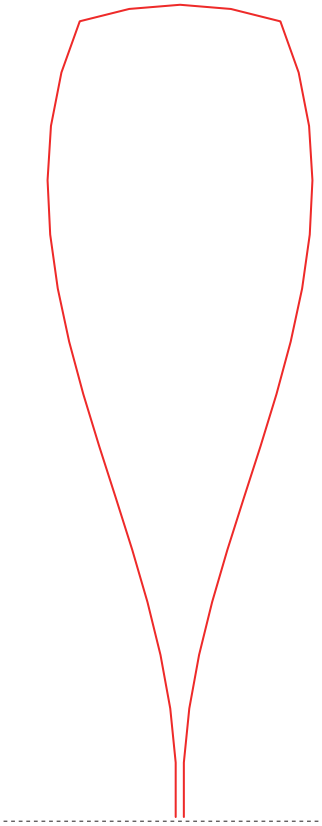
長辺長さ (分割数)	:1000mm(15)
短辺長さ (分割数)	:250mm(4)
フレーム角度 θ	:132 °
弾性率 E	:21900 MPa
材料密度 ρ	:1914 kg/m3
部材直径 d	:4 mm
Direction.direction	:(0,0,1)
Direction.strength	: ∞
Threshold	:1e-15
Tolerance	:1e-10

fig.4.2.7: シミュレーション設定

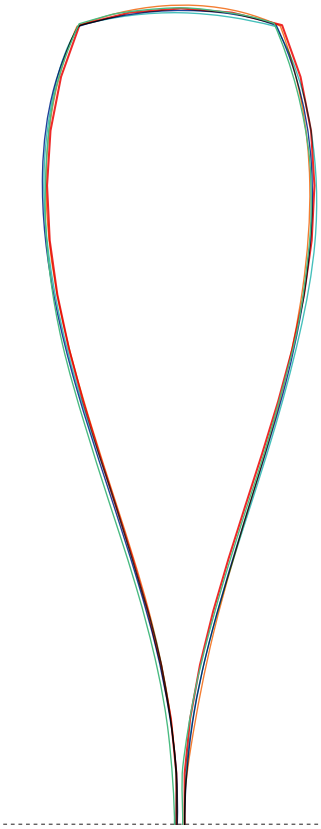
○結果と考察

試験体の画像とシミュレーション結果を重ね合わせた図および測定誤差の最大値と平均値を (fig.4.2.8) に示す。4 体のずれの最大は約 7-11mm で、試験体 #2 のみ他と比較し 3mm-4mm 大きい結果となったが、シミュレーション結果を重ね合わせた画像から判断すれば、大きい誤差でないことがわかる。平均値もそれぞれ約 3-4mm と小さいため、シミュレーションの精度の高さを確認できる。また試験体間の計測の誤差も微差であるため製作精度の高さも伺える。

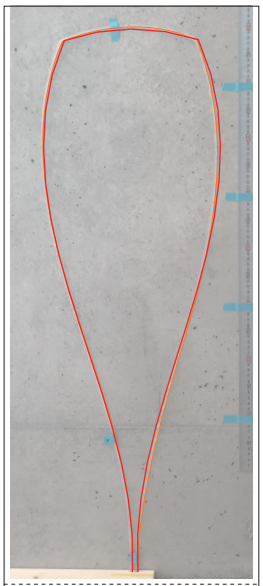
フレームのセットアップ図



シミュレーション結果

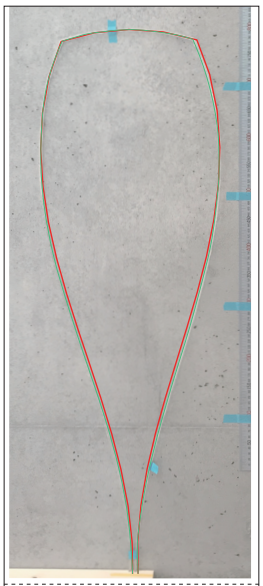


シミュレーション結果と
4 試験片のトレースの重ね合わせ



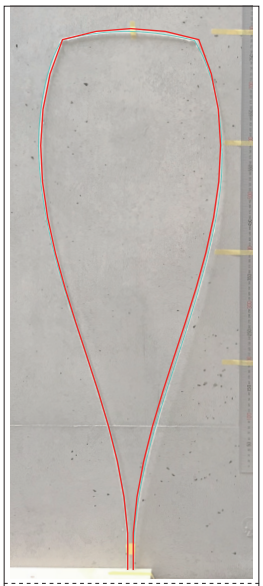
試験片 #1

測定誤差
最大：7.47mm
平均：3.07mm



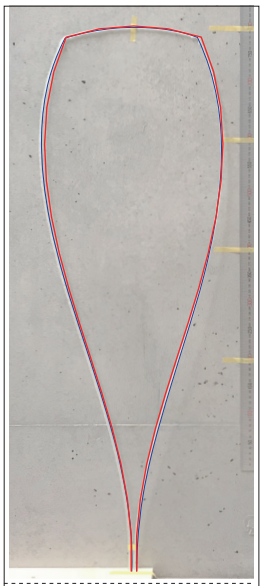
試験片 #2

測定誤差
最大：11.3mm
平均：4.41mm



試験片 #3

測定誤差
最大：6.68mm
平均：3.57mm



試験片 #4

測定誤差
最大：7.80mm
平均：3.57mm

fig.4.2.8: 検証結果

4.2.3.　フレーム連結モデル

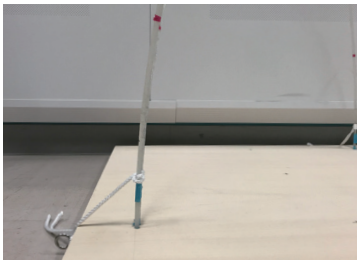


fig.4.2.9: 脚部の固定

fig.4.2.10: フレーム同士の連結

○概要と試験体

4 つの GFRP のフレームを環状に配置し、連結された架構（以下、フレーム連結架構と呼ぶ）を製作し、上部の開口が開いた変形させる前の状態（typeA）と開口が閉じた変形させた後の状態（typeB）の 2 状態において、フレーム上に記した実測点の位置を計測し、シミュレーションとの差を比較する (fig.4.2.12)。また、変形に伴うフレーム頂部のねじれ抵抗を再現する制約条件である CoPlanar（Cp）の適切な強さ Cp.strength(以下 Cp.str と記す) を検証する。

構造体の大きさはスパン 800mm とし、前項の case1000 における 4 つのフレームを用いて構成する。フレーム連結架構の組み立てについて説明する。900*900*24mm のシナ合板を土台として使用し、穴をあけ、フレーム脚部を挿入した。脚部の傾きを抑えるために、角度を固定した (fig.4.2.9)。フレーム間の連結部分はナイロン紐で結束した (fig.4.2.10)。

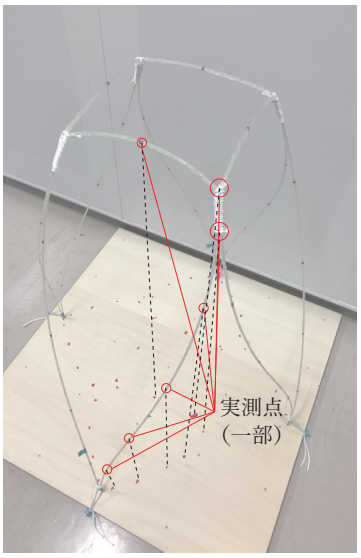


fig.4.2.11: 実測点（一部）

○実測方法

部材状の実測点は、フレーム長辺 200mm 毎、フレーム短辺中心部分、さらにフレーム連結部分の両端の位置を対象とし、フレーム連結架構を組む前に部材上に記した (fig.4.2.11)。

実測は、①部材上の実測点に対して垂直になるように定規を当て、高さ Z を目視で読み取り、②次に定規の設置部分をマークし、マークした部分の XY 座標を記録していく (fig.4.2.13)。この作業を、typeA においては、全 44 箇所、typeB においては、全 42 箇所に対して行う。なお最終的な実測点の高さは、土台の高さ分 24mm を加えた値とした。

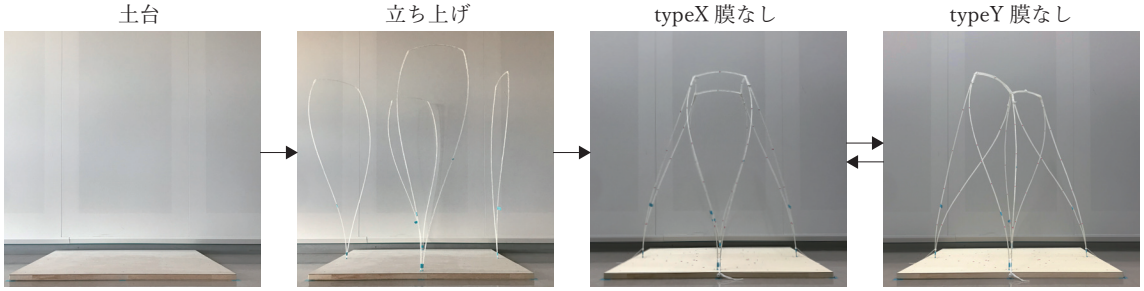


fig.4.2.12: フレーム連結架構の構成過程

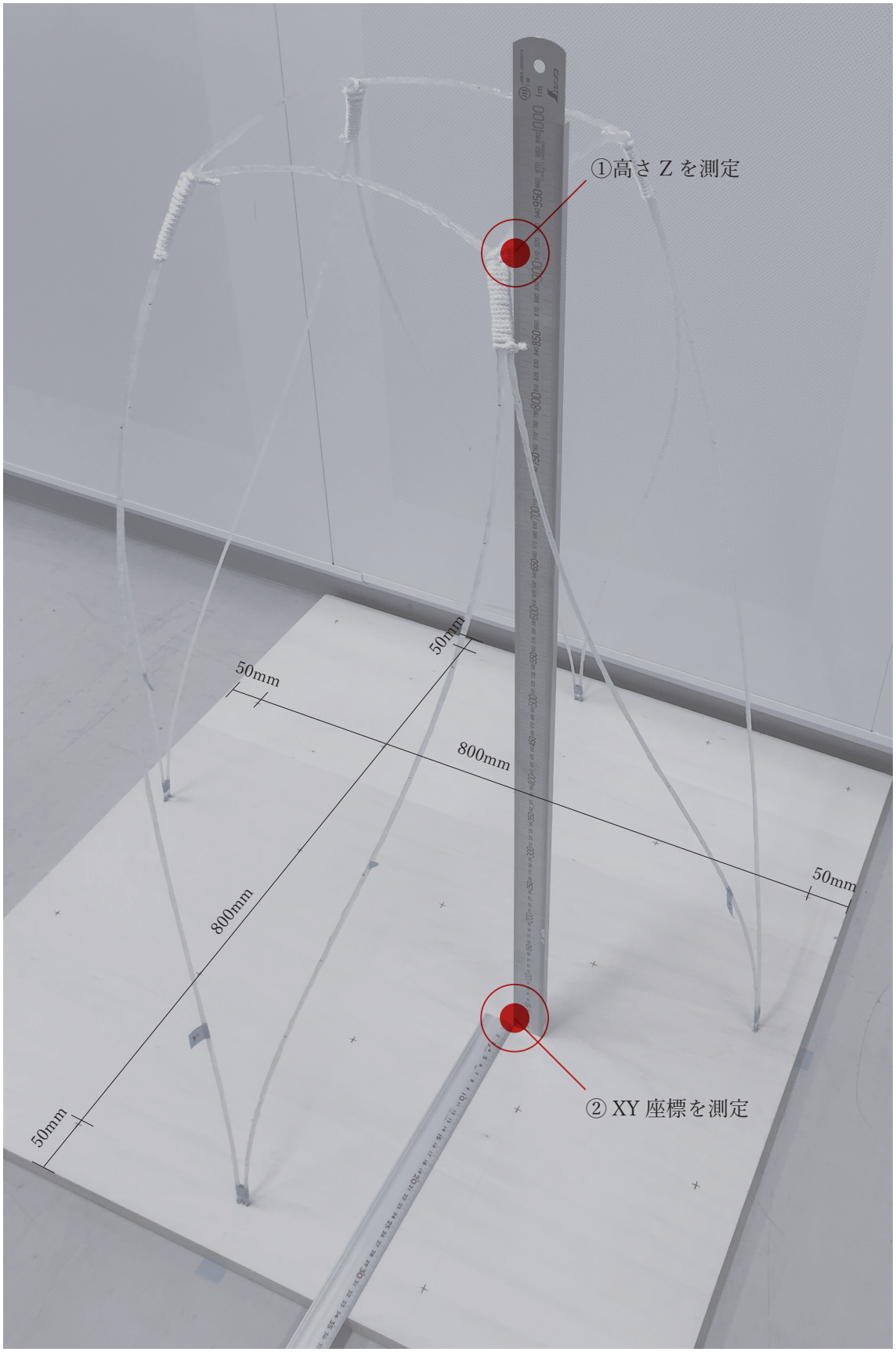


fig.4.2.13: 実測の様子

○検証方法

実測した点の位置情報をもとに、3D-CAD(Rhinoceros) 上で Interpolated Curve(fig.4.2.14) によって、模型のジオメトリを再現し、シミュレーションとの差を視覚的に確認する。Interpolated Curve とは、区分的多項式曲線（3 次スプライン補間）のことを差し、与えられた点群の情報をもとに、隣り合う点との間をスプラインによって補間する操作である。参考として、(fig.4.2.15) に模型における実測点をもとに生成した 3 次スプライン補間（水色）と、シミュレーション（赤）を重ね合わせた図を示す。

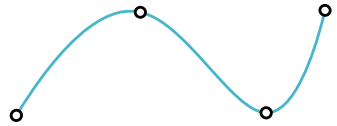


fig.4.2.14: Interpolated Curve

また、各フレームにおける 2 つの長辺部材と 1 つの短辺部材に対して、3 次スプライン補間とシミュレーションの結果の両方の曲線を同等数に細かく等分した時に、対応しあう各点間距離のうち最大値に着目し、すべての最大値のから最大・平均・標準偏差を見ることによってずれの程度を数理的に確認する。今回は各長辺に対して 50 分割、各短辺に対して 10 分割し、距離の差を評価する。

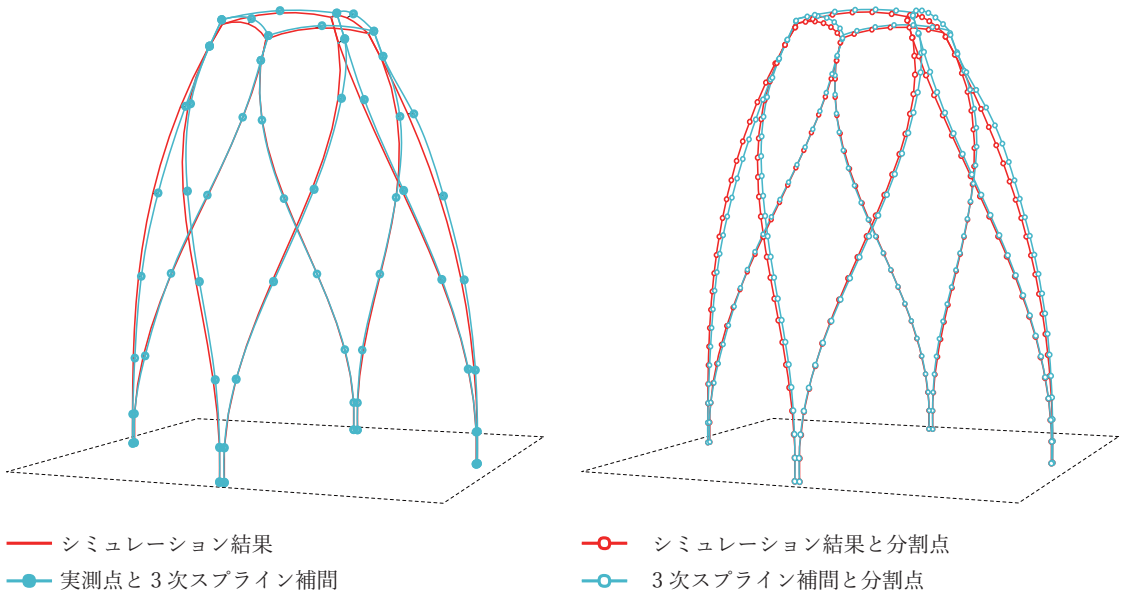
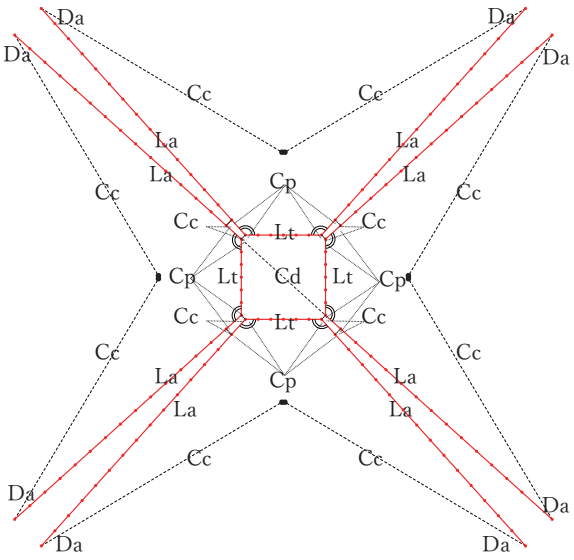


fig.4.2.15: 比較検証方法の概念図

○シミュレーション設定

シミュレーション設定の詳細を (fig.4.2.16) に示す。

検証の流れは、まず上部の開口が開いた状態 typeA でのシミュレーションと模型との比較を行いその精度を確かめる。typeA では、架構頂部に大きなねじれが発生しないと仮定し、その抵抗力をインプットせずにシミュレーションを行い、曲げ挙動のみのシミュレーション精度を確認する。その上で形状変化させた状態 typeB の検証を行う。typeB では、架構頂部のねじれに対して、フレーム抵抗するため、頂部のみにねじり抵抗に当たる制約（Cp）を与えた。参考としてその強さを 0、10000 で挙動を検証したのち、実測値をベースとしたスプライン補間曲線と比較しながら、差が少なくなるように強さを調整した。



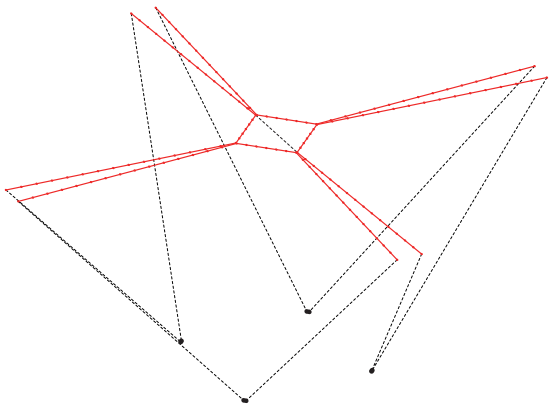
共通設定

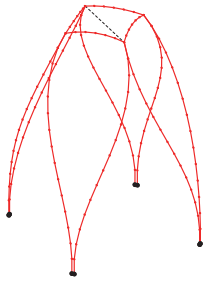
部分長 La(分割数)	:1000 mm (15)
部分長 Lt(分割数)	:250 mm (6)
屈折角度 θ	:132 °
フレーム連結長	:6.66(1 線分分)
弾性率 E	:21900 MPa
密度 ρ	:1914 kg/m3
部材直径 d	:4 mm
脚部固定角 (Da).dir/.str	:(0,0,1)/ ∞
連結用ケーブル (Cc).len/.str	:10 mm/ ∞
Threshold	:1e-15
Tolerance	:1e-10

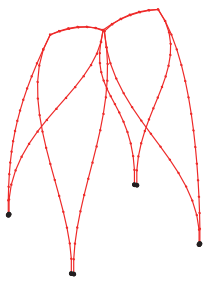
Simulation2 での追加設定

変形用ケーブル (Cd).len/.str	:10 mm/ ∞
頂部ねじり抵抗 (Cp).str	: 検証対象 (0/800/10000)

segment
node
anchor points
virtual cable







[1]Setting Input Data　[2]Simulation 1　[3]Simulation 2

fig.4.2.16: 膜のシミュレーション・ダイアグラム

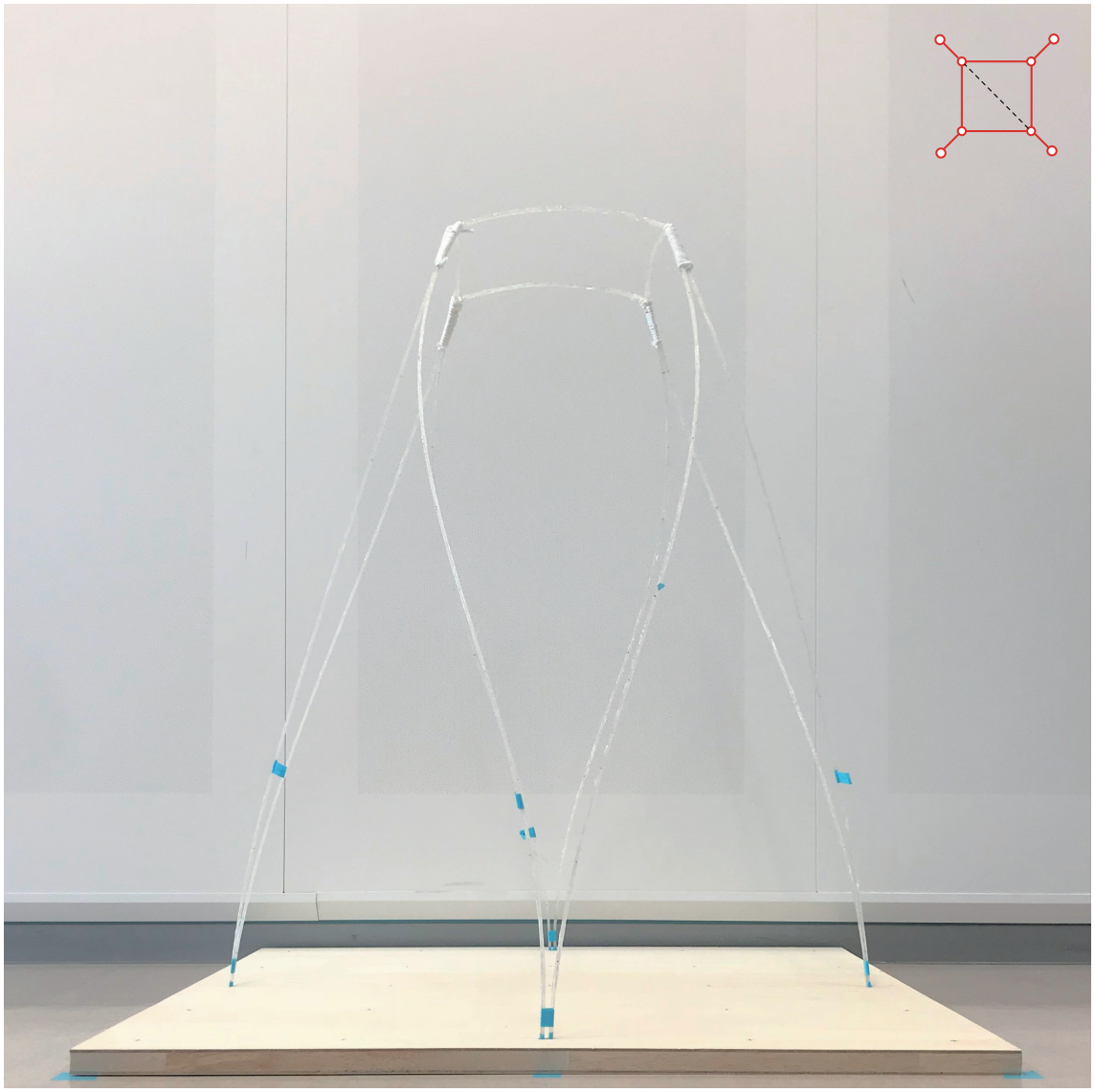
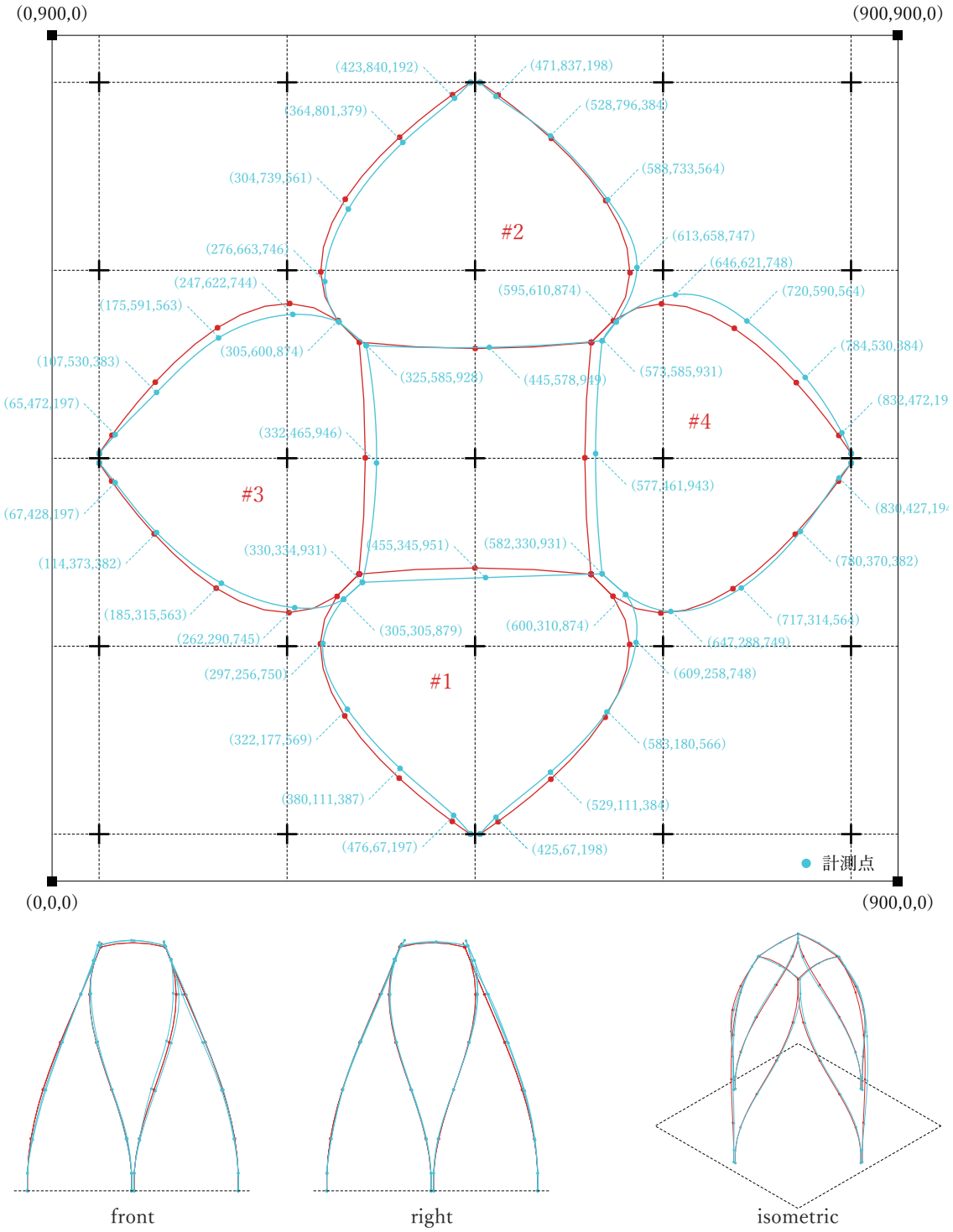


fig.4.2.17: フレーム連結架構膜なし　-typeA

○結果と考察　フレーム連結架構膜なし -typeA

　実測したデータおよびスプライン補間曲線とシミュレーション結果の重ね合わせを (fig.4.2.18) に示す。また、検証結果も図中に記載した。検証の結果、辺毎の誤差の最大値の平均は 15.5 ｍｍと小さく、ばらつきも 1.5mm と微差であった。また全体の最大値も 18.3mm と小模型のスケールに対して約 2%程度の誤差であることから、架構頂部にねじれが発生していないとみなすことができる状態においては、高い精度でフレームの曲げ挙動が再現できていると言える。



分割点比較による位置の差

最大値	18.3mm	最大値の標準偏差	1.53mm
最大値平均	15.5mm	全体平均	8.88mm

fig.4.2.18: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜なし　-typeA)

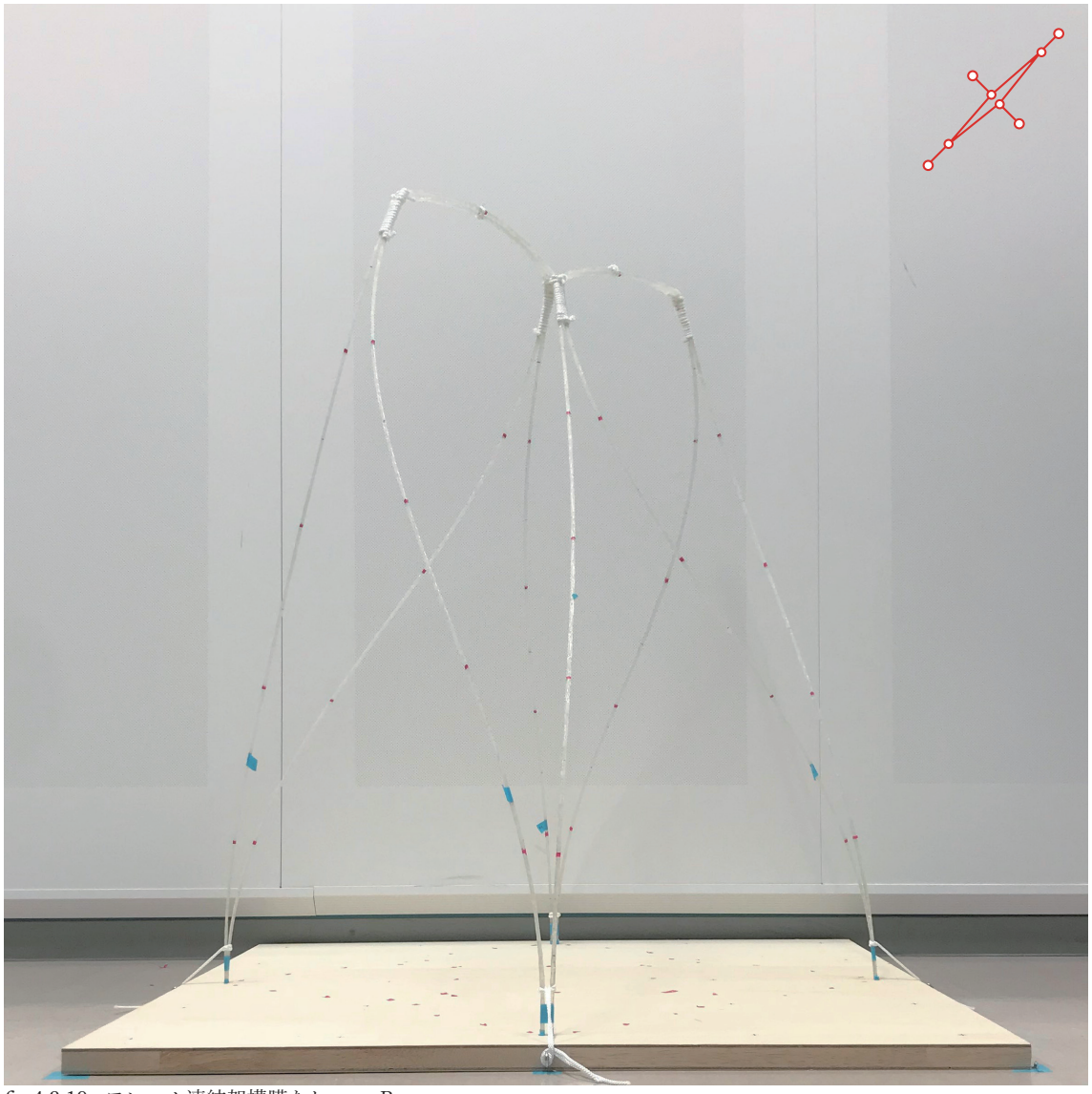


fig.4.2.19: フレーム連結架構膜なし -typeB

○結果と考察　フレーム連結架構膜なし -typeB

(fig.4.2.21) は、ねじり抵抗の強さ Cp.str = 0、つまりねじれを見込まずに検証した結果であるが、架構の中央部でスプライン補間曲線に対してシミュレーションが大きく膨らんでおり、ずれの最大値も 33.6 と大きいことが明らかである。また (fig.4.2.22) は Cp.str = 10000 として解析した結果都の重ね合わせを表示しているが、中央部分での開きが小さくなりすぎていることがわかる。またこの時の誤差の値が非常に大きく最大 45mm もずれてしまうという結果になった。

以上は、参考として行った検証であるが、このパラメータを変え実測結果と比較したところ、Cp.str = 400 ～ 800 とし

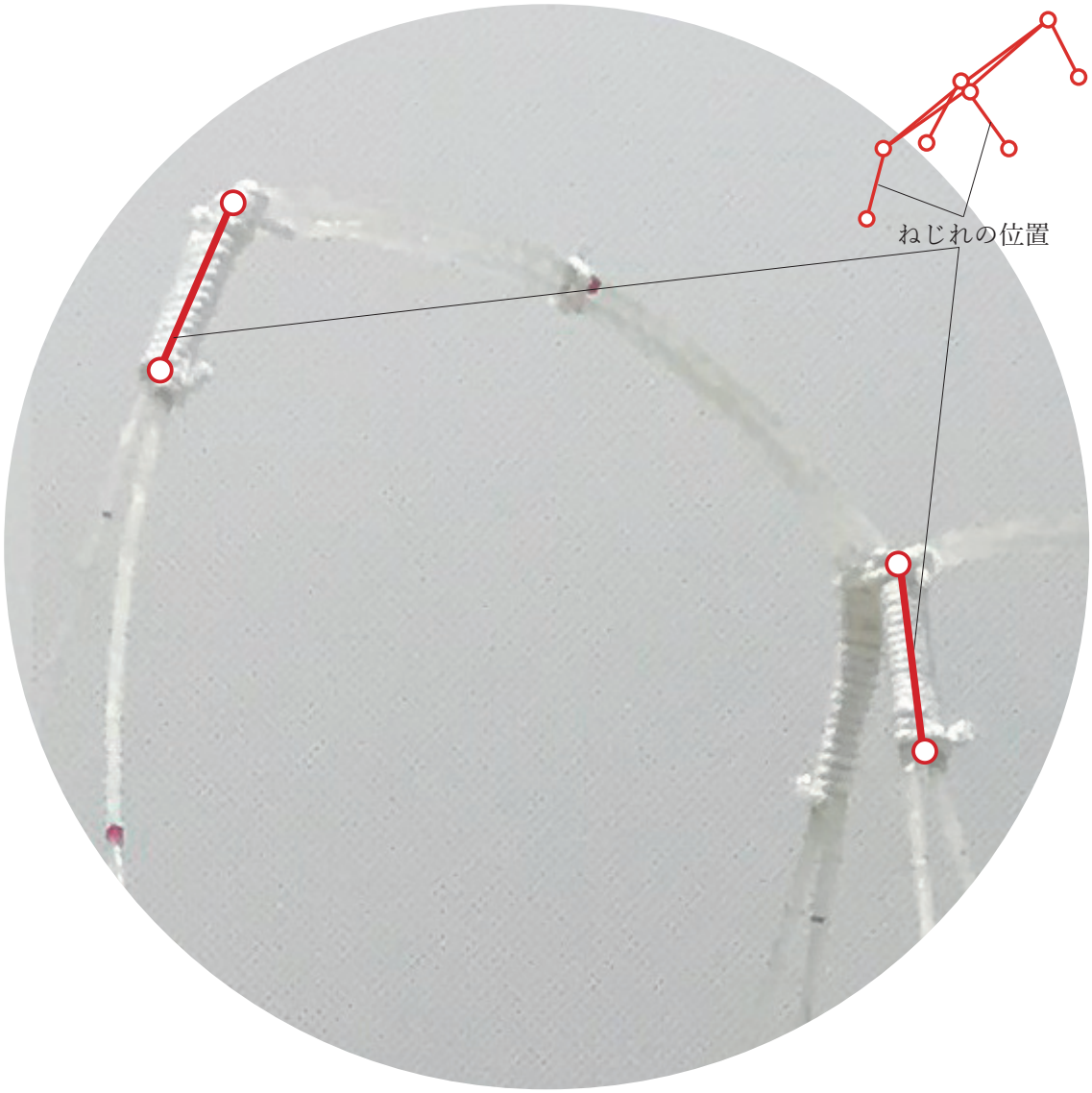
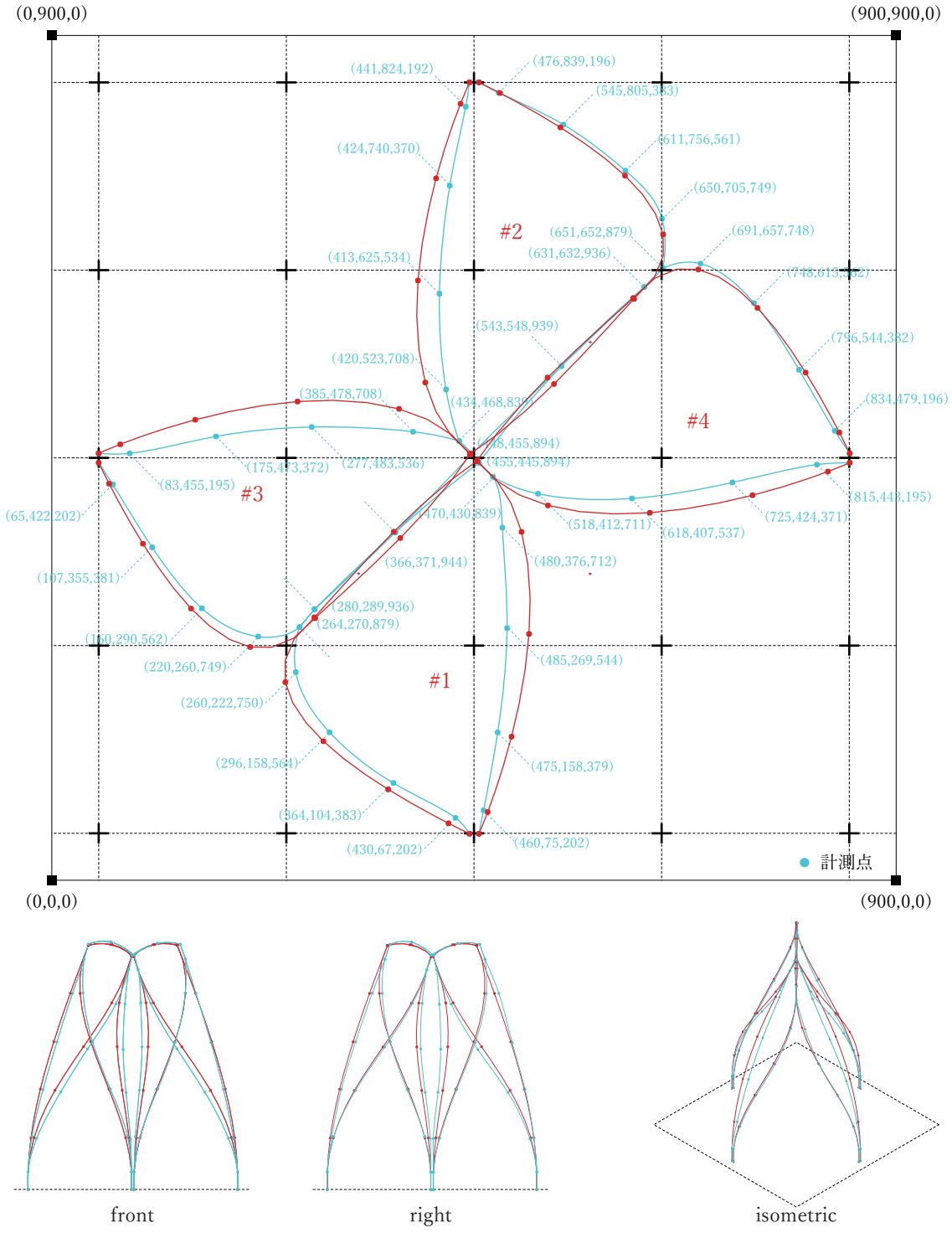


fig.4.2.20: 変形時のフレーム頂部のねじれの様子

た時、フレームの開きが実測結果に近くなり、全体のずれも小さくなることが分かった。(fig.4.2.23) は Cp.str = 800 とした検証結果、(fig.4.2.24) は Cp.str=500 とした検証結果であるが、いずれの結果においても辺毎の誤差の最大値の平均は 14mm 程度で標準偏差も 2mm 程度と typeA のように誤差・ばらつきともに少さくなっていることがわかる。両者を比較すると辺毎の誤差の最大値において若干 Cp.str = 500 の方が有利であることから、この値を次の膜の検証に対しても採用する。

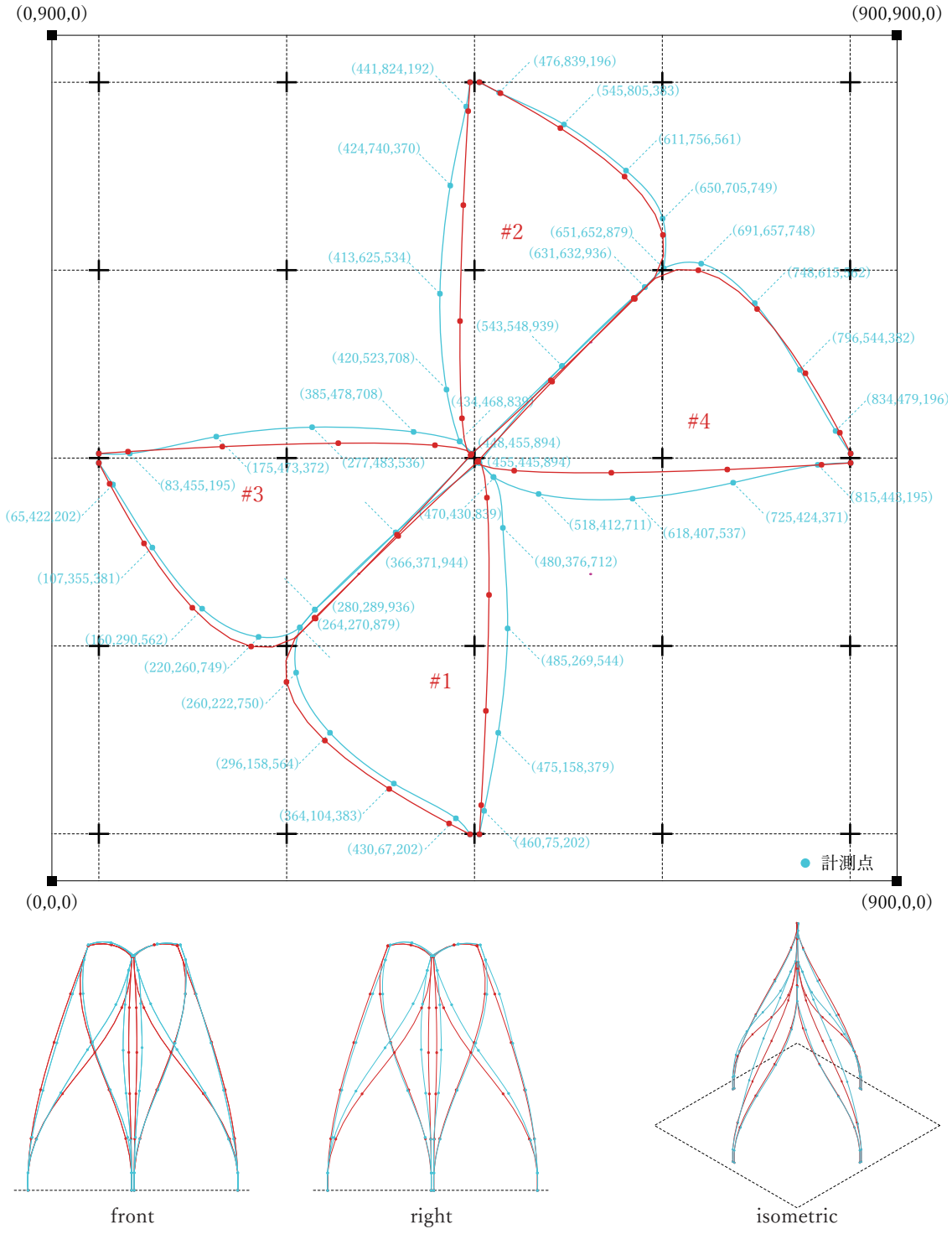


シミュレーション結果
実測点および3次スプライン補間による曲線

分割点比較による位置の差

最大値	33.6mm	最大値の標準偏差	6.9mm
最大値平均	19.8mm	全体平均	12.5mm

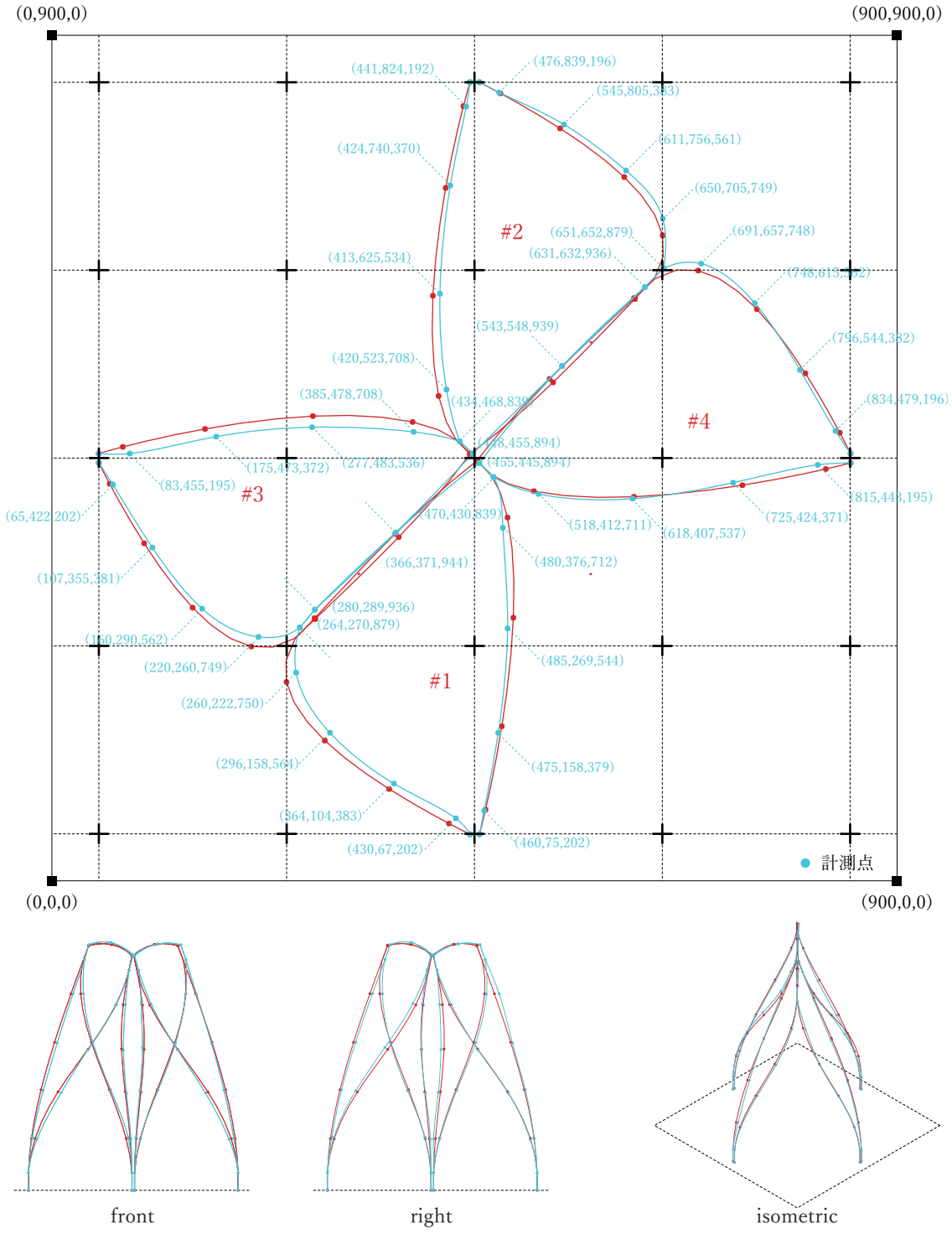
fig.4.2.21: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜なし　-typeB)/Cp.str = 0



分割点比較による位置の差

最大値	45.6mm	最大値の標準偏差	12.5mm
最大値平均	23.0mm	全体平均	13.9mm

fig.4.2.22: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜なし　-typeB)/Cp.str = 10000

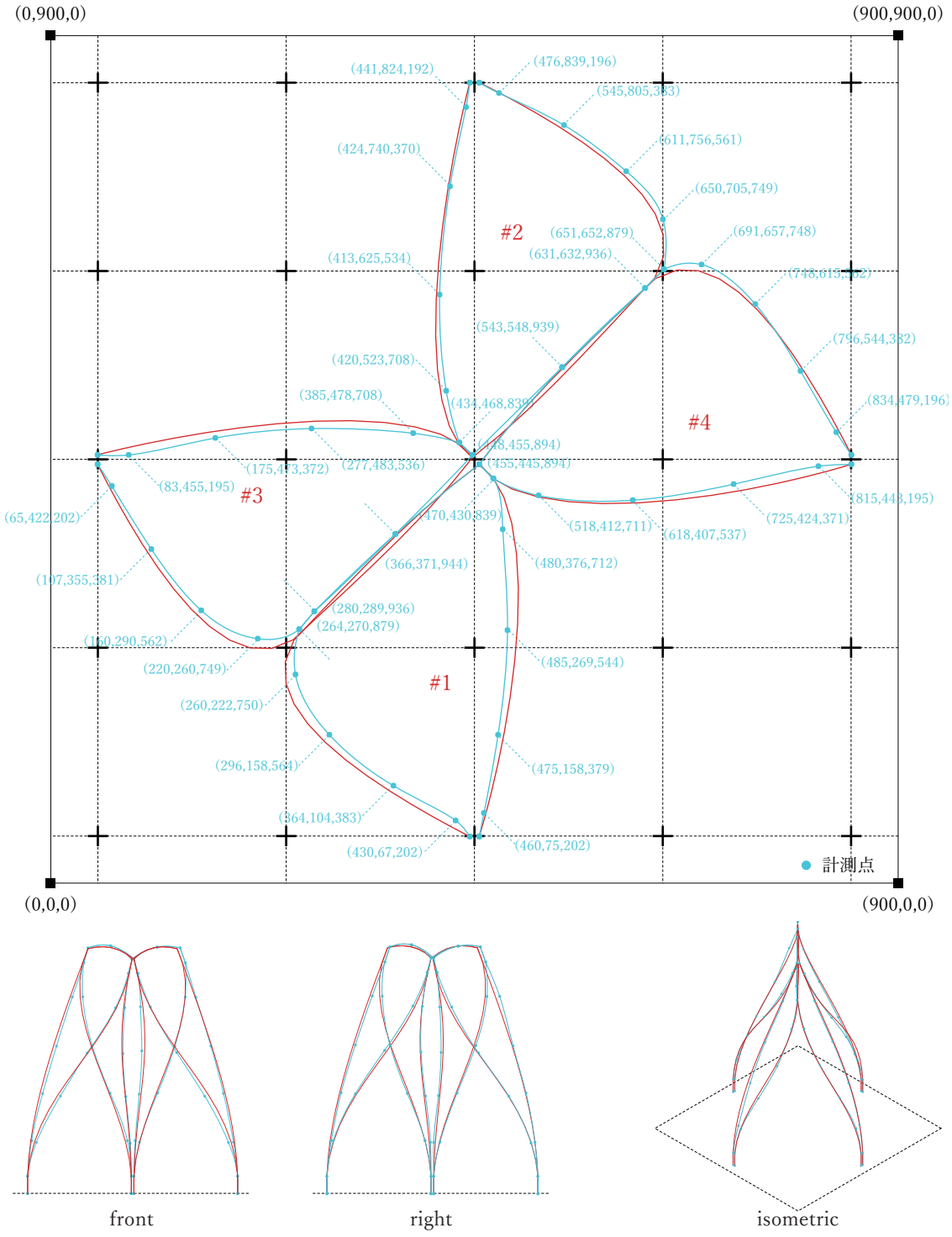


シミュレーション結果
実測点および3次スプライン補間による曲線

分割点比較による位置の差

最大値	17.3mm	最大値の標準偏差	2.54mm
最大値平均	14.1mm	全体平均	7.81mm

fig.4.2.23: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜なし　-typeB)/Cp.str = 800



シミュレーション結果
実測点および3次スプライン補間による曲線

分割点比較による位置の差

最大値	16.3mm	最大値の標準偏差	2.3mm
最大値平均	14.0mm	全体平均	7.3mm

fig.4.2.24: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜なし　-typeB)/Cp.str = 500

4.3.　膜の挙動の検証

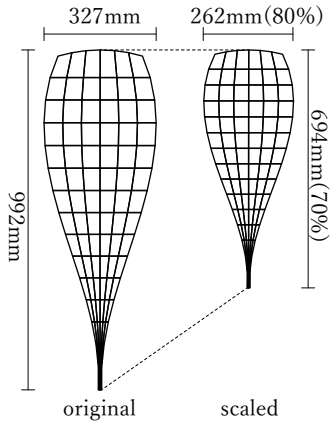


fig.4.3.1: 試験体の設置図

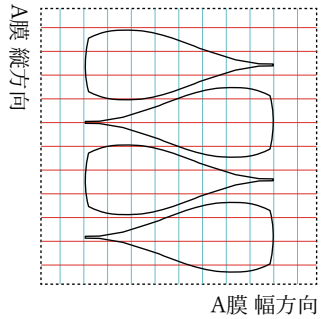


fig.4.3.2: 試験体の設置図

○概要と試験体

4.2.3 項で扱ったフレーム連結架構の各フレームに対して、膜を張りあてた状態の模型における定常状態と変形後の状態を実測対象として検討を行った。

製作する膜の形状は、フレーム連結架構の開口部分が開いた状態をベースとして、各フレームに対して第 3 章で記した方法によって生成したグリッドメッシュを平面展開し、展開したメッシュの長手方向に 70%、短手方向に 80% 縮小したものとした。膜の寸法は、(fig.4.3.1) の通り。縮小後のメッシュのアウトラインを出力し型紙を製作する。なお、膜は 2 方向に伸縮性のある生地（A 膜）を用い、(fig.4.3.2) のように長手方向を伸縮性の高い方向、つまり生地の幅方向として切り出した。フレームに対しては、糸でエッジ部分を篝縫いにより縫合した。

製作した模型は (fig.4.3.3)

○計測方法

膜自体の実測はせず、膜の影響を受ける GFRP の測定を行った。計測方法は 4.2.3 項に同じ。

○検証方法

検証方法は 4.2.3 項に同じ。

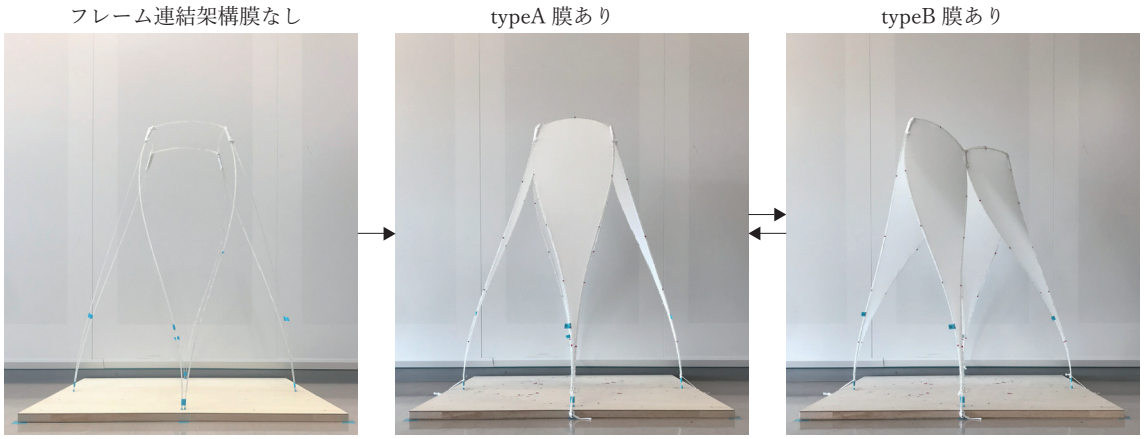


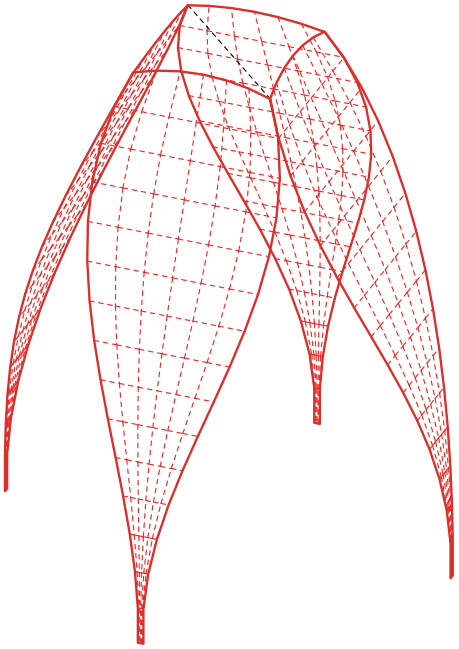
fig.4.3.3: フレーム連結架構に対して膜を追加した様子

○シミュレーション設定

前述したように膜を加味したシミュレーションは、フレームの形状決定の後で行う。各種設定を（fig.4.3.4）に示す。

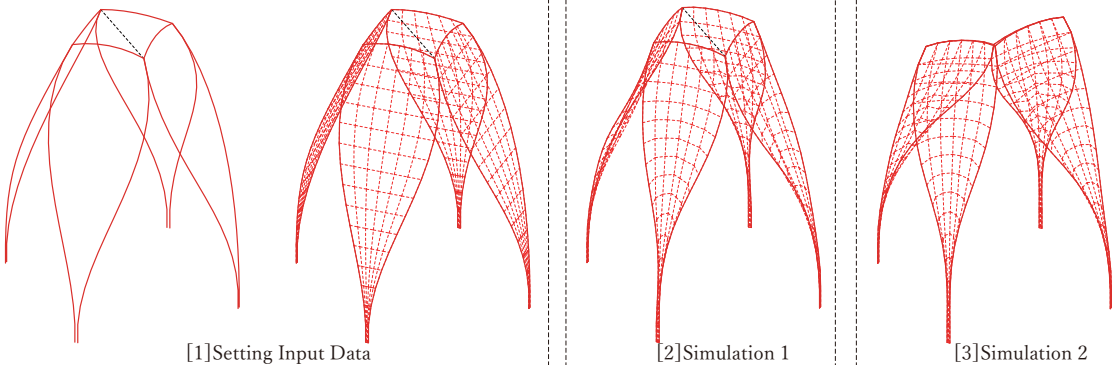
フレーム自体の制約条件の設定は、前節と同じである。またメッシュの生成方法に関しても前述した方法により、メッシュ長手方向の分割数 15、メッシュ短手方向の分割数 6 として斜材のないクアッドメッシュを生成した。メッシュを追加するにあたり新たに設定する必要があるパラメータは、メッシュの各線分の伸縮率､弾性率および断面積である。断面積は、生地の厚みと各線分の有効幅（メッシュピッチの 1/2）を入力する。

また形状 typeA,B のいずれの場合も部材頂部のねじれ抵抗に対する係数 Cp.str は前節で検証した通り、500 とする。



シミュレーション設定

フレーム：	
フレーム角度 θ	:132 °
弾性率 E	:21900 MPa
密度 ρ	:1914 kg/m3
部材直径 d	:4 mm
脚部固定角 (Da).dir/.str	:(0,0,1)/ ∞
連結用ケーブル (Cc).len/.str	:10 mm/ ∞
頂部ねじり抵抗 (Cp).str	:800
メッシュ設定：	
弾性率縦方向	:4MPa
弾性率横方向	:2MPa
密度 ρ	:500kg/m3
厚さ	:0.5mm
Simulation2 での追加設定	
変形用ケーブル (Cd).len/.str	:10 mm/ ∞
Threshold	:1e-15
Tolerance	:1e-10



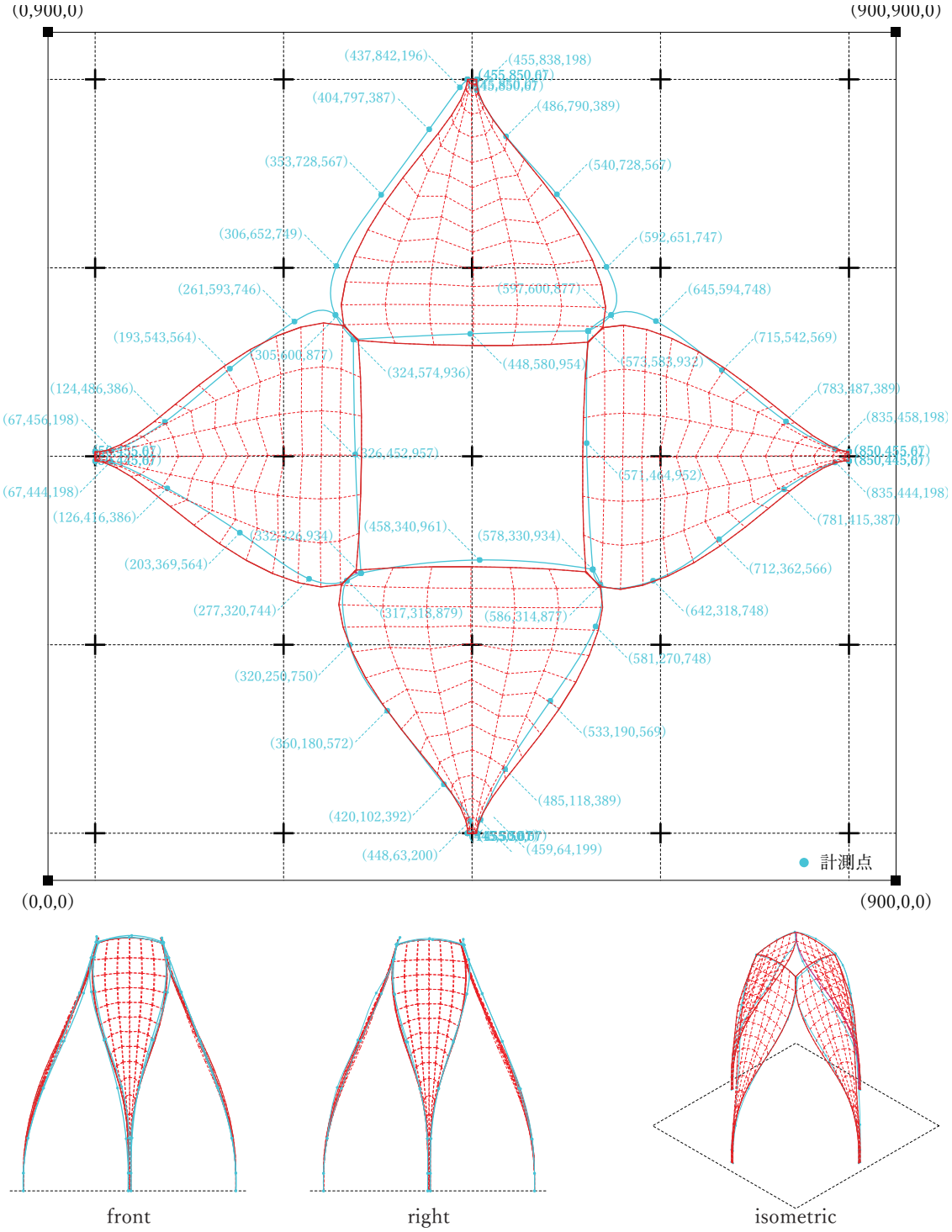
[1]Setting Input Data　[2]Simulation 1　[3]Simulation 2

fig.4.3.4: シミュレーション設定

fig.4.3.5: フレーム連結架構膜あり -typeA

○結果と考察　フレーム連結架構膜あり -typeA

実測モデルとシミュレーションモデルの誤差は、最大値が24.8mm とフレームのみの比較検証の結果と比較し大きくなっている。原因として、膜の弾性率を検証する際、1 方向のみから引っ張った時の弾性率のみを確認し、膜を 2 方向に同時に引っ張ったときの膜の正確な復元力について検証されていないため解析にそれが加味されていないことが考えられる。しかし、模型のスケールに対して 3% 以下と小さく、また平均16.7mm、標準偏差 4mm と小さいことから、膜の影響は概ね再現されていると言える。



分割点比較による位置の差

最大値	24.8mm	最大値の標準偏差	4.0mm
最大値平均	16.7mm	全体平均	9.0mm

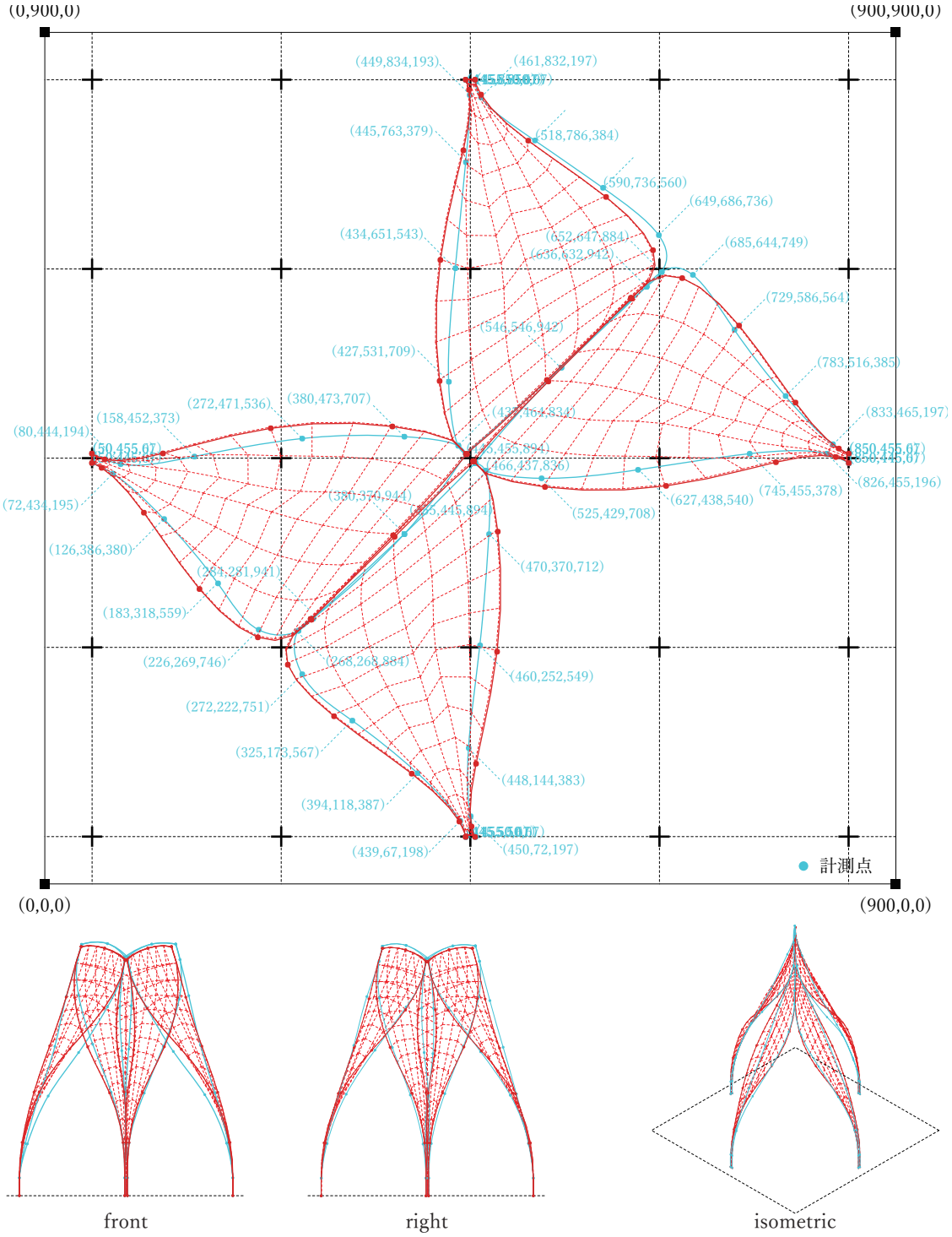
fig.4.3.6: 実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜あり　-typeA)/Cp.str = 500

fig.4.3.7: フレーム連結架構膜あり -typeB

○結果と考察　フレーム連結架構膜あり -typeA

上部の開口を閉じた状態の膜ありモデルでは、誤差の最大値 30.0mm と他の結果に比べ大きくなった。また、最大値の平均 20.8mm、標準偏差 5.1mm とこちらも他の結果と比較すると大きく表れている。理由は、前述した前述したとおりであるが、この場合も小模型の全体のスケールに対して最大約３%程度の誤差であるため概ね再現できていることが分かる。

以上２つの検証結果の平面図を見るとメッシュがジグザグ状になっていることがわかる。これは、実際の挙動にはあ笑われていないため、メッシュのモデル化に関しても、斜交成分を追加するなど改善の余地がある。



分割点比較による位置の差

最大値	30.0mm	最大値の標準偏差	5.1mm
最大値平均	20.8mm	全体平均	11.5mm

fig.4.3.8:　実測結果とシミュレーション結果の比較図 (フレーム連結架構膜あり　-typeB)/Cp.str = 500

4.4.　小結

本章では、シミュレーション精度の検証とねじれ抵抗の強さを定めることを目的とした検証を行った。一定の断面を保ちながら成形しやすい GFRP を材料として用い、検証する模型の部材製作を実施した。また材料特性の試験を通して、シミュレーションに採用する GFRP と膜の弾性率・強度を確かめた上で比較検証を行った。

検証は GFRP 棒で予備的な検証を行いシンプルな曲げ挙動における高い一致度が確認できた。

続いて、架構の構成部材である 4 つのフレームを用いた比較検証により、部材に屈折角度がある場合でも実際の模型とのよい対応が見られた。また、4 つのフレームを重ね合わせたところ、(fig.4.4.1) のように、非常に誤差が少ないことがわかる。このことから、それぞれの製作精度も高く、架構を構成しても誤差の影響は小さいことが考えられる。

最後に、4 つのフレームを組み合わせた連結架構の上部の開口が開いた状態（typeA）と閉じた状態 (typeB) において、それぞれ膜なしと膜ありの状態で比較検証を行った (fig.4.4.2)。検証の結果、膜なしモデルの typeA は、誤差・ばらつきが小さく架構頂部にねじれが発生しない形状における高い一致が見られた。一方で頂部にねじれが想定される膜なしモデルの typeB では、ねじれ抵抗の強さ Cp.str = 500 として解析を行うことで、同様に良い対応が確認された。同じ抵抗値を膜ありモデルの 2 つの形状に対しても適用したところ、形状変形前後の形状ともに膜なしの場合よりも誤差・ばらつきが大きく表れた。理由として 2 方向に同時に膜を引張った時の膜の正確な復元力の強さが解析に反映されていないことやメッシュのモデル化の問題が考えられるが、小模型の全体のスケールに対して最大でも約 3% 程度の誤差であるため概ね再現できたといえる。

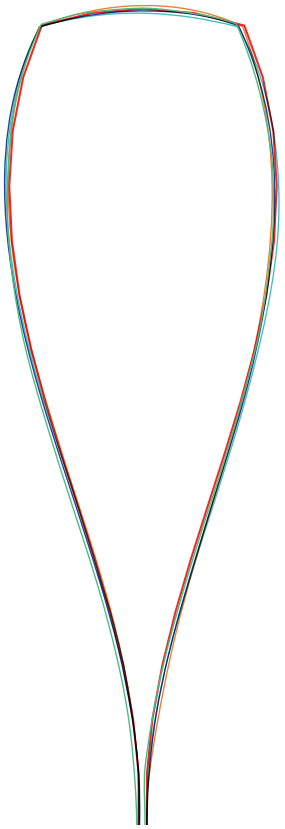


fig.4.4.1:
シミュレーション結果と 4 つのフレームの重ね合わせ

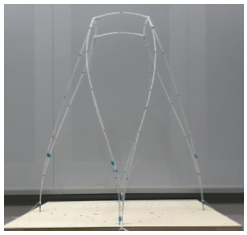
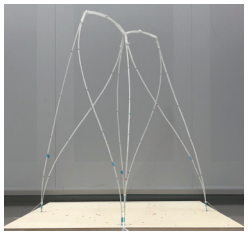
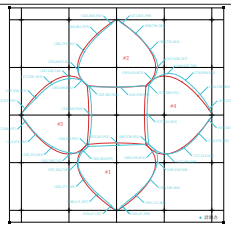
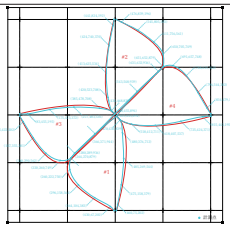
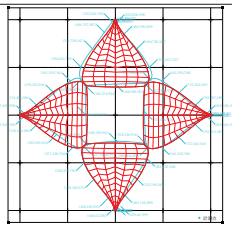
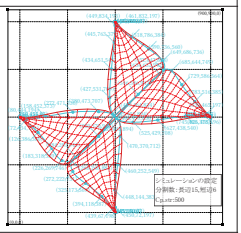
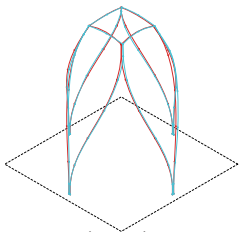
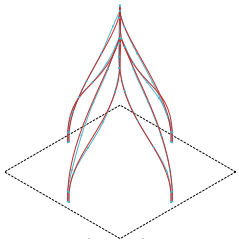
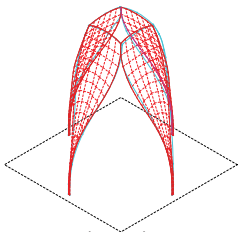
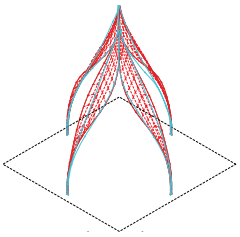
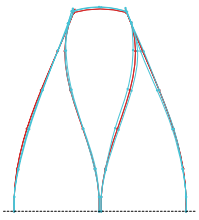
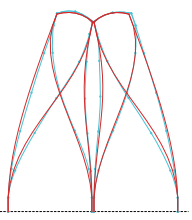
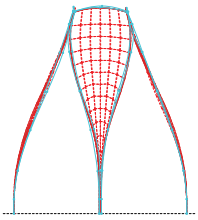
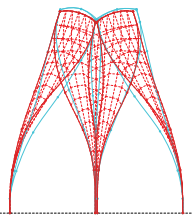
状態	typeA 膜なし 上部開口：開	typeB 膜なし 上部開口：閉	typeA 膜あり 上部開口：開	typeB 膜あり 上部開口：閉
対象模型				
比較図 （平面）				
比較図 （AXO）				
比較図 （立面）				
Cp.str	0（ねじり見込まず）	500	500	500
平均誤差	15.5mm	14.0mm	16.7mm	20.8mm
標準偏差	1.5mm	2.3mm	4.0mm	5.1mm
最大誤差	18.3mm	16.3mm	24.8mm	30.0mm

fig.4.4.2: 検証結果まとめ

第 5 章

実践

©ERINA UETA

5.0. 本章の概要

5.1. 設計
- 5.1.1. 設計条件
- 5.1.2. 提案概要
- 5.1.3. 形状決定

5.2. 製作
- 5.2.1. 概要
- 5.2.2. プレファブリケーション
- 5.2.3. 設営

5.3. 空間利用

5.4. 小結

5.0.　本章の概要

本章では、前章で検証したシステムを実施プロジェクトに対して適応し、実際に小規模な可変な空間の設計と施工を行うことで、実際の設計における意義を検証する。

5.1.　設計

5.1.1.　設計条件

○用途

主として茶席として扱える空間を想定した空間。

○規模

２畳を基本とする 4mx4mx2.5m 程度の空間。3、4 人が入れる程度の空間を想定し、架構スパンは 3.6m、高さ 2.4m 程度のシェル構造を最大規模として設定した。

○その他要求

外部から点前の様子が見えること。

5.1.2. 提案概要

○平面計画と基本形状

正方形プランを基本する。畳 2 畳（今回は京間としたため 2 畳分の大きさは 1820x1820 ㎜）を取り囲むように板間を配置した 3640x3640 ㎜が床の大きさである。そこになるべく大きい架構を設置する。銀座三越 9 階テラスに計画されたため、(fig.5.1.1) に示す平面図のように店内通路に面して、正客の出入り口となる躙り口を設け、観客席側から点前の様子が見えるような計画とした。また水屋は、亭主や補助員のためのバックヤードであり、水屋―空間の出入りの頻度が高いため、茶道口を水屋側に向けて配する計画とした。点前の際にお湯を沸かすための釜を空間内に設置する必要があったため、釜の位置をバックヤードに近い位置とし配線は、畳縁から床下の土台を通す計画とした。茶室において床は非常に重要であるが、その位置を正客に対し右側または左側におけるよう全体構造を考える。

以上の手がかりから架構の形状を検討し、まずは、構成するフレーム数を決定した。構成するフレーム数が奇数の場合、構造を完全に閉じる操作を行えないため偶数とした。フレー

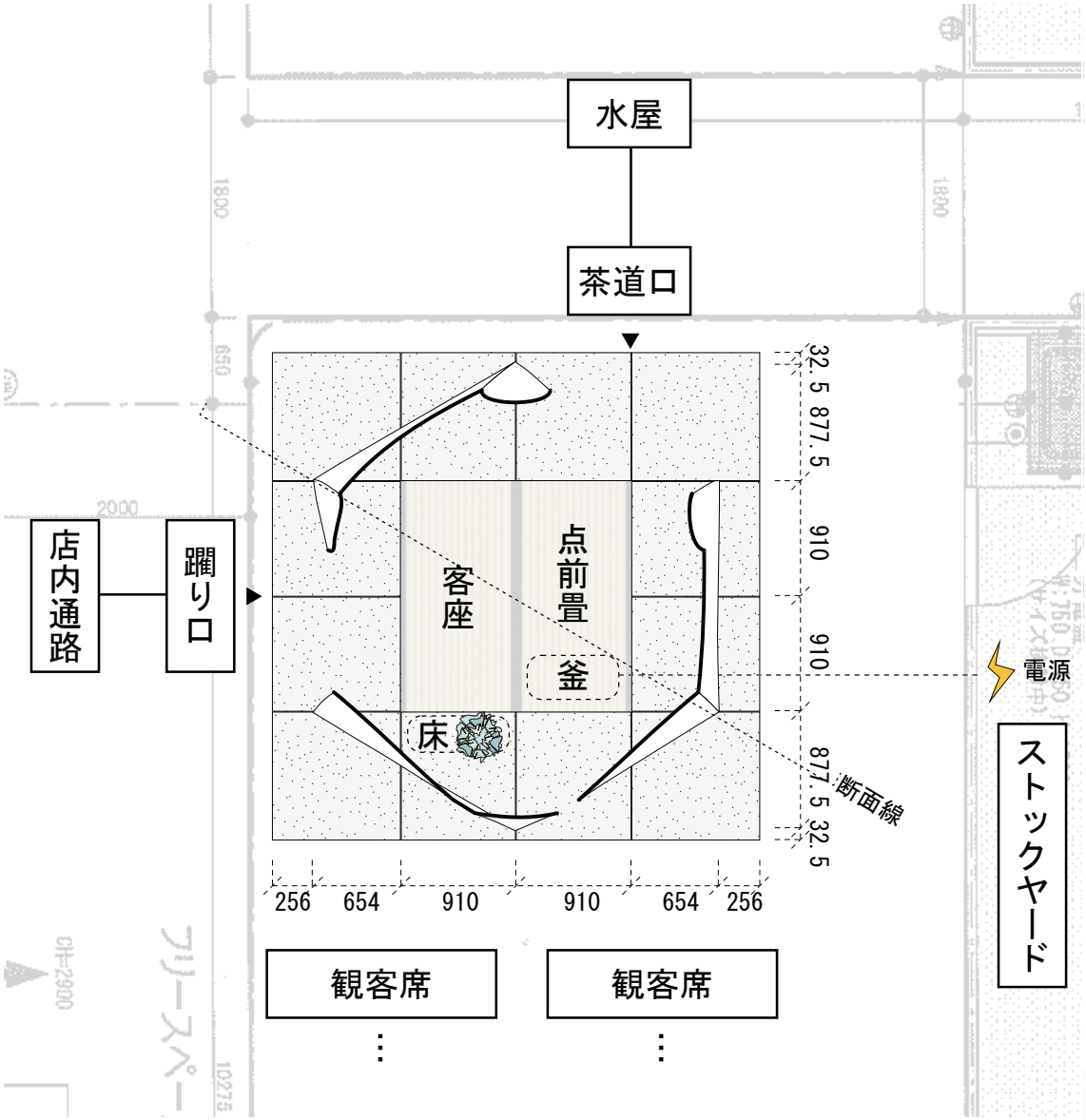
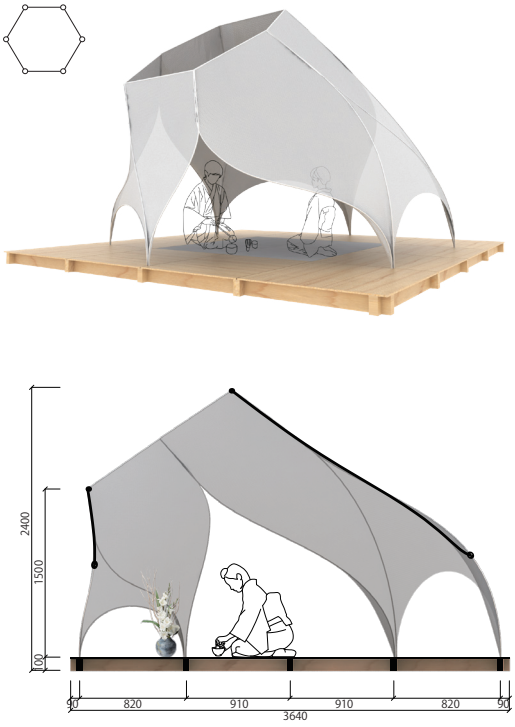


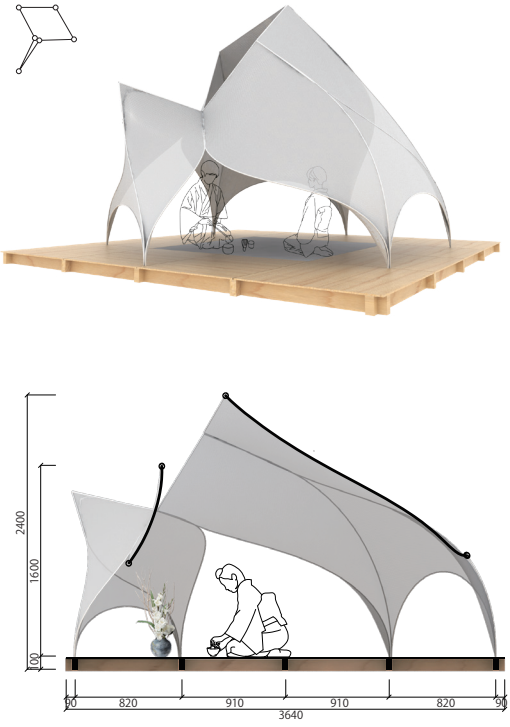
fig.5.1.1: 平面図と周辺概要（銀座三越 9 階テラス）

ム数が 4 つでは、間口が広くなってしまうことに加えて、変形パターンが少ないため、今回は、平面計画の条件と多用な変形の可能性を示すという条件から、6 フレームによって構成されるシェルを基本的な構成を目指した。プライバシーを確保するため、(fig.5.1.2,3) のようにフレーム間の隙間にアーチ材を配置し、アーチと二つのフレームによって囲われる領域に対しても膜を追加した(以下､三角膜という)。全体の形状は、空間にメリハリをつけることを目的として、第 2 章で検討した偏心モデルを基本形状とし、最大 12 パターンの変形動作が可能な構造を目指す。

開 1：開口が大きく開いたおおらかな空間



半開 1：開口が客座上部に開いた状態



閉一 1：開口を斜めに、客座側に高く閉じた状態

閉二 1：開口を中心に寄せて閉じた、小さい空間

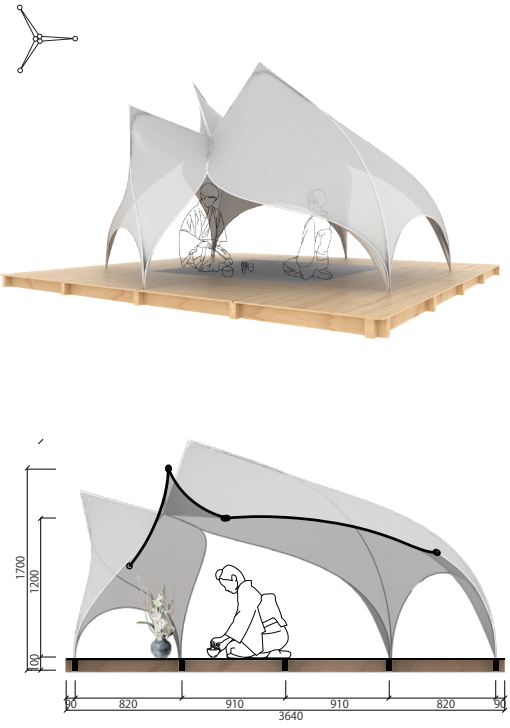
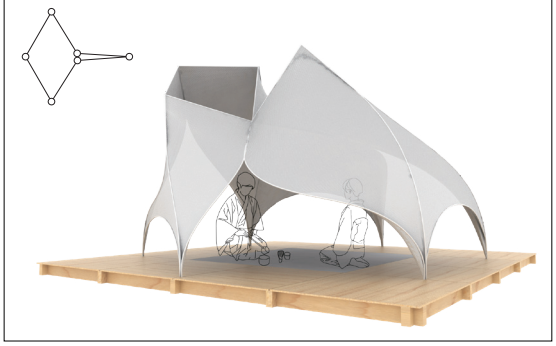


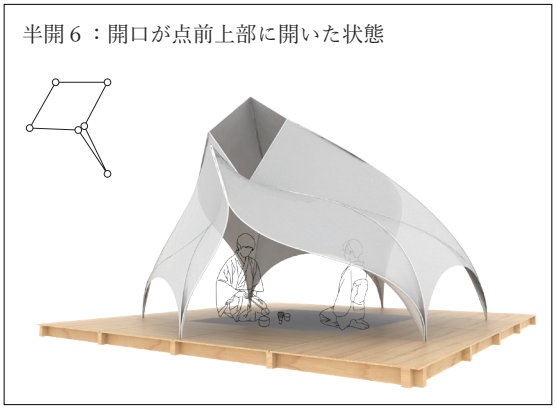
fig.5.1.2: 提案時の代表的な 4 形状における形状イメージと断面計画図

半開 2：開口が点前上部に開いた状態



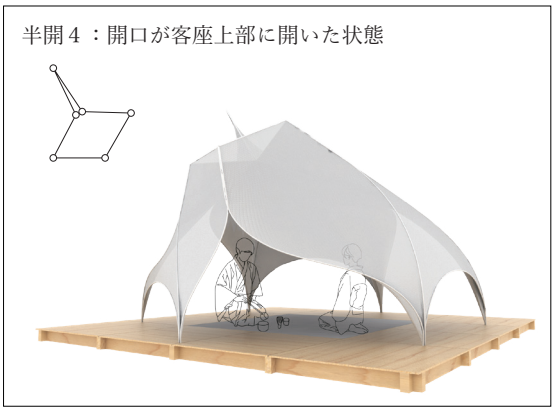
半開 3：開口が点前上部に開いた状態

半開 6 ：開口が点前上部に開いた状態

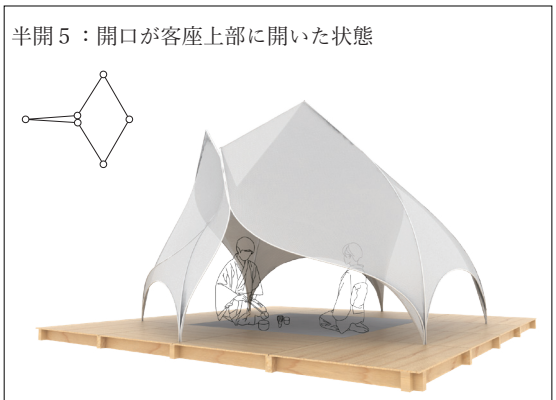


閉一 2 ：開口を斜めに点前側に高く閉じた状態

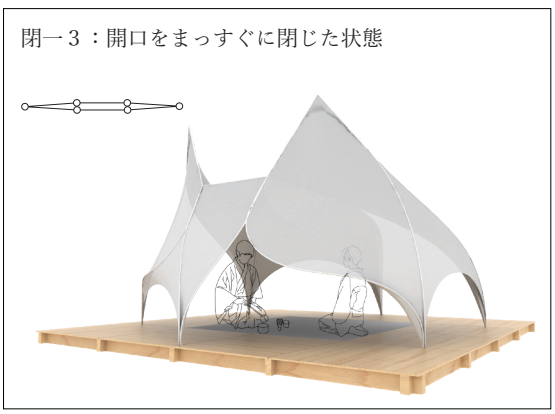
半開 4 ：開口が客座上部に開いた状態



半開 5 ：開口が客座上部に開いた状態



閉一 3 ：開口をまっすぐに閉じた状態



閉二 2 ：開口を中心に寄せて閉じた、小さい空間

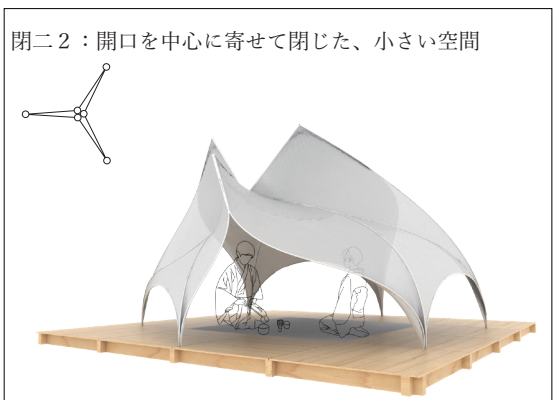


fig.5.1.2: 提案時の形状イメージ

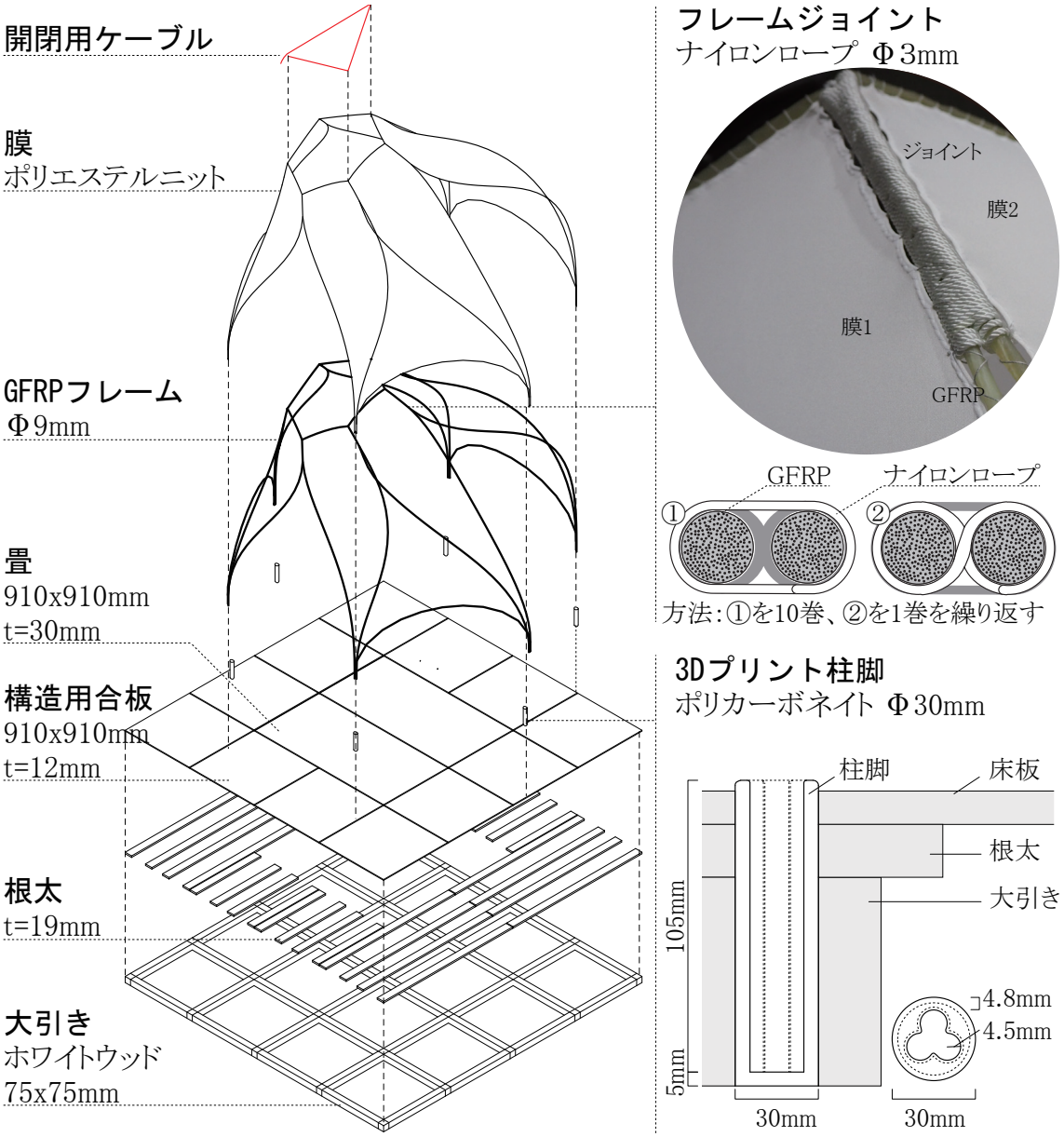


fig.5.1.4: 構成図

○材料と構成

構成図と材料の詳細を (fig.5.1.4) に示す。

材料は、前章で扱った GFRP を主構造部材とし、１方向伸縮生地を膜材とした。材料特性も前章での各材料試験の結果を使用し、シミュレーションを行う。また、木材で基礎を製作し、GFRP と基礎の接合は、ポリカーボネートで３D プリントしたジョイント材を用いることを考え提案した。

◯コンセプト

実際に可変形態を利用してどのような空間の在り方を提案できるかという視点は、その可能性を引き出しうる。茶室空間を検討するにあたり、以下のことをを空間の可能性を示すコンセプトとして考案した。

—

例えば、茶室の窓と住宅の窓を比較したときに住宅の窓は、通気や採光といった空間環境的な機能性が重要視されるが、茶室の窓は、円窓や突き上げ窓など意匠性が空間の雰囲気を構成する強い要素とされることが多い。そのため雨が降れば窓を閉じ、晴れれば窓を開け、さわやかな空気を取り入れるといった当たり前で平凡なひとつひとつの所作が、特別であることで、お茶というひとときを通したその空間体験の豊かさが一杯のお茶を引き立たせる。それは、訪れる人の感動とも言い換えられる。

柔らかく形を変える茶室。

雨が降れば天窓を大きく閉じ、空間に響く雨音を感じながら雨という特別なひとときを楽しむ。雪が降れば小さく空間を閉じ、狭い空間でお茶の温かみが強調される。月が出れば天窓を開放し、風に揺れるおおらかな空間でお茶をたしなむ。窓の位置や大きさは、その瞬間の情景の入り方を細やかに変える。膜は光を通し、夜には大きな灯りとなる。構造物が時々刻々と形状を変え、空間の様相を変化させることは、周囲を取り巻く環境に対する選択性を与え、体験としての楽しさを増幅させることに繋がるのではないだろうか。

以上から、環境に応じるようにしなやかに形を変え、2畳という限られた空間を異なる空間形式で多様に彩る茶室、人間と環境を繋ぐ新しい媒体としての構造体を提案する。

—

5.1.3.　形状決定

○プロセス

以下の流れで目標形状を決定する。

⓪部材径と材料情報（弾性率・比重）を設定する

①フレーム長さとフレーム角度の検討

→高さの確認、上部開口部の大きさの確認。曲げ応力度の評価（降伏曲げ応力度よりも小さいかどうか）。組み合わせたとき全体系が安定するかどうかの確認。

②膜の強さの検討

→膜がたるまないかつフレームに影響を与えすぎない程度の伸縮率の確認。

③以上のパラメータを繰り返し検討し、形状決定

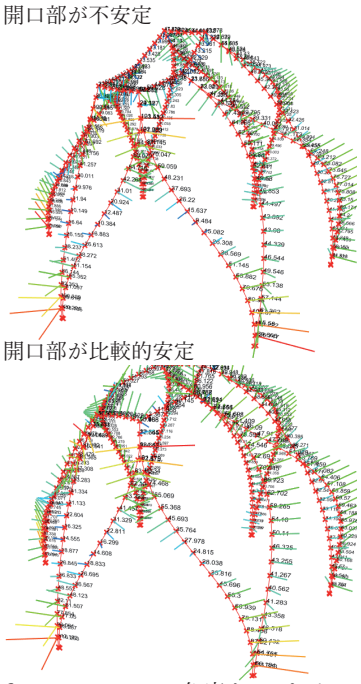


fig.5.1.5: フレーム角度を 100° とした場合（上）と 120° とした場合の例（下）

○曲げ応力度の確認

評価の基準となる曲げ応力度しては、第 4 章で確認した降伏曲げ応力度 $\sigma_{b,yi}$:229MPa 以下であることを確認する。第 3 章で開設したように、K2Engineering のアウトプットとしてモデル上の曲げ応力度が二つの隣り合う線分の現在の角度と初期角度から計算され与えられる。シミュレーションモデルにおけるすべての線分間の角度について着目し、その中の最大値を評価する。また、今回は形状変化させた後の応力度の状態についても確認し、その傾向を確認した。

○シミュレーション設定

第 4 章で検証した架構において、架構頂部のねじれ抵抗の大きさ Cp.str = 500 程度の時、実際の架構との誤差が小さくなった。今回スケールを挙げ、部材の断面形状も変化するため、ねじれの強さも異なってくることが考えられる。そのため、ねじれの強さは、部材径の 4 乗に比例し、フレーム短辺長に反比例すると仮定してシミュレーションを行った。

膜材に関しては、前述したように今回新たに三角膜を追加する方針とした。その初期形状の生成方法は、右図のようにフレーム間に線分の節点と一致する位置を端点とし、両端から連続する次の節点の方向に制御点を取り、生成する制御点の端点からの距離は上層に行くほど小さくなるような設定を行い曲線を生成した。次に前述したメッシュの生成方法と同様に描いたベジェ曲線を任意数に等分し、縦に線を引くこと

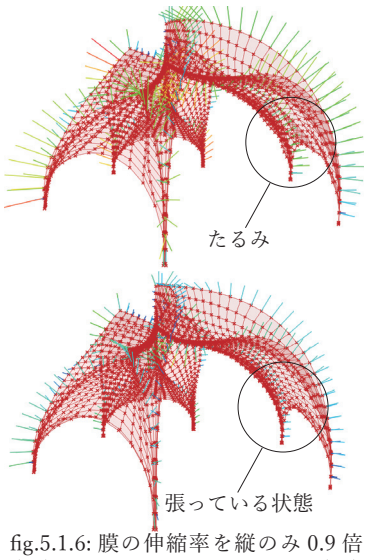


fig.5.1.6: 膜の伸縮率を縦のみ 0.9 倍（左）と縦横 0.9 倍とした場合（右）の例

でメッシュを構成する。

今回は 1 方向の伸縮生地を採用し、膜の縦方向の弾性率を 19MPa、横方向の弾性率を 5MPa、膜の厚みを 0.3mm と設定してシミュレーションを行った。しかし、図のように三角膜と接する GFRP が強く出すぎてしまい、膜が伸縮しやすい横方向に 0.9 倍に縮小しただけで、局所的に膜の影響を強く受けてしまい、いびつな形状となる部分が発生してしまった。そのため、膜材の有効幅を 1/2 から 1/4 に変えてシミュレーションを行い、局所的な強い変形を緩和した。この有効幅の変更は全体形状には大きな影響を与えないことを確認した上で採用している。

また、部材の分割数については、各長辺は 115mm 毎に分割し短辺は 6 分割とした。

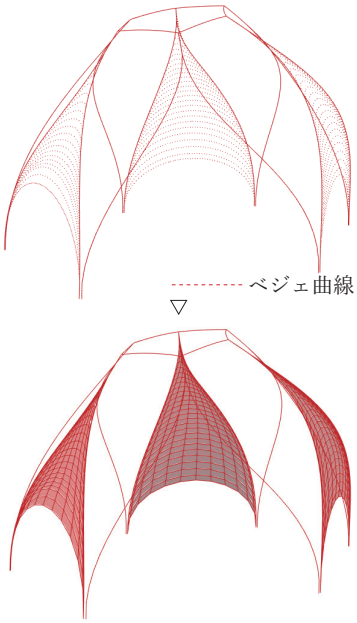


fig.5.1.7: 三角部分におけるメッシュ化

○最終形状

以上の検討プロセスから、(fig.5.1.8-11) に示す形状を最終形状として決定した。なお、12 パターンの変形タイプのうち代表的な変形タイプである 4 パターンについてのみ検討している。最大高さは、2.4-2.5m で断面図みるようにそれぞれのタイプで、上部の開口の閉じ方に伴って空間の大きさや形も変形する。type4 の変形パターンにおいて最も空間の高さが低くなるが、亭主および正客の頭が当たらないような高さになるように部材長さを設定した。シミュレーション結果も同様に示しているが、曲げ応力度の最大値が type1 において最も低くなり 170MPa 程度、type4 で最も高い数値が検出され、最大値 208MPa 程度であった。一方で最も応力度が高く表れた type4 について曲げ応力度の平均と標準偏差を見ると平均値 63MPa, 標準偏差 30MPa となった。つまり多くの節点における曲げ応力度は 100MPa 以下であることがわかり、局所的に強い応力度が発生している状態といえる。

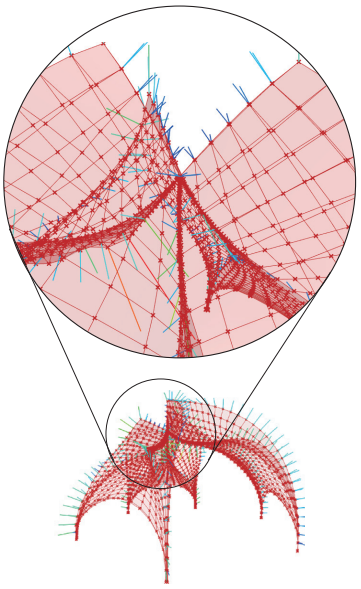
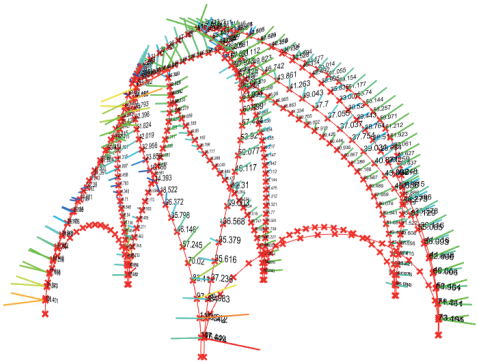


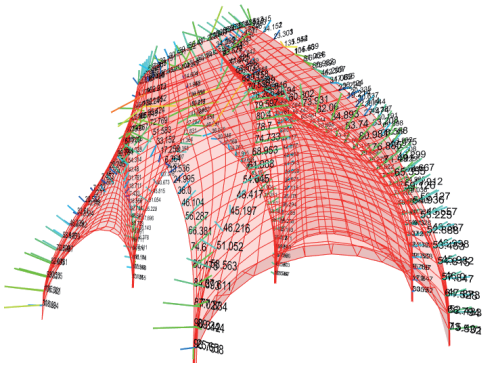
fig.5.1.8:GFRP の局所的な歪み

また、膜がないフレームのみの状態と比較し、膜がある状態は、曲げ応力度が高くなっていることがわかる。応力度は、部材の連結部分（頂部及び脚部）においてが高くなる傾向がみられるが、膜を追加することにより、当該箇所にさら曲げられるような挙動が起こっているためである。今後膜が構造に対してどのように影響しているのかを詳細に研究されたい。

以上のように、寸法を調整することで、すべての架構形状のパターンで基準を満たす構造物を設計することができた。

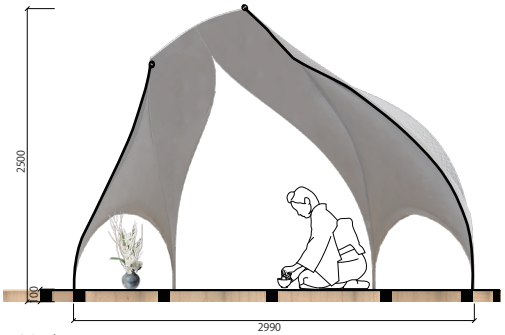


＜シミュレーション結果 - フレームモデル＞
曲げ応力度（赤が最大、青が最小、単位 MPa）
最大：129.4MPa/ 平均：49.8MPa/ 標準偏差：20.6MPa



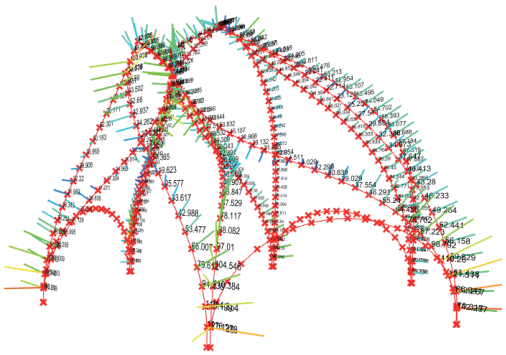
＜シミュレーション結果 - 膜ありモデル＞
曲げ応力度（赤が最大、青が最小、単位 MPa）
最大：169.9MPa/ 平均：55.2MPa/ 標準偏差：29.2MPa

＜透視図＞

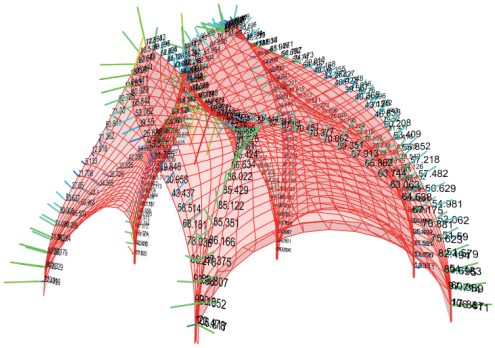


＜断面図＞

fig.5.1.9: 最終成果物 type1

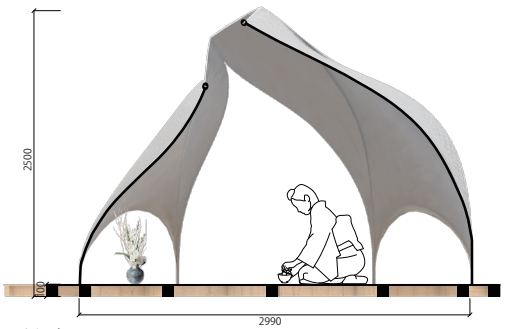


＜シミュレーション結果 - フレームモデル＞
曲げ応力度（赤が大、青が小、単位 MPa）
最大：153.8MPa/ 平均：55.4MPa/ 標準偏差：27.0MPa



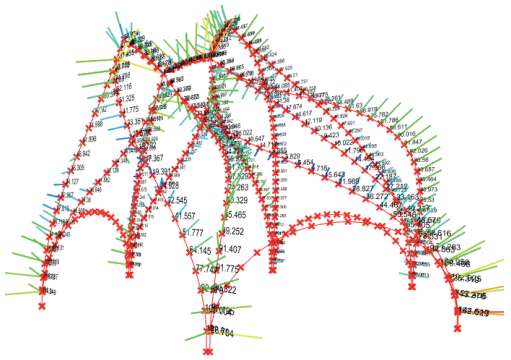
＜シミュレーション結果 - 膜ありモデル＞
曲げ応力度（赤が最大、青が最小、単位 MPa）
最大：203.4MPa/ 平均：60.3MPa/ 標準偏差：30.2MPa

＜透視図＞

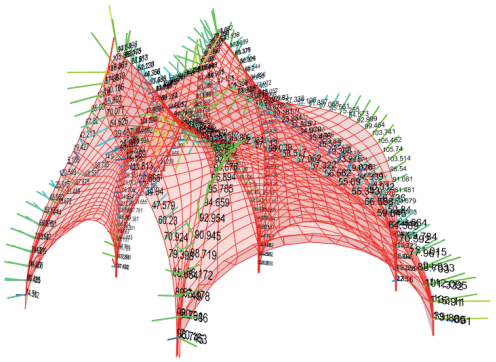


＜断面図＞

fig.5.1.10: 最終成果物 type2

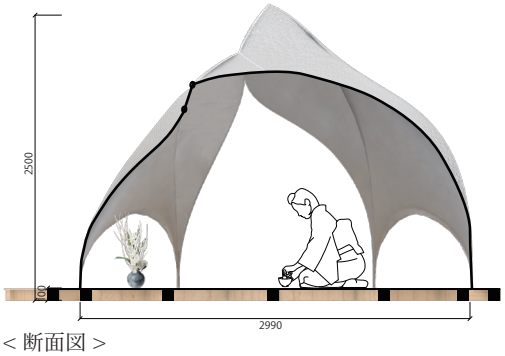


＜シミュレーション結果 - フレームモデル＞
曲げ応力度（赤が大、青が小、単位 MPa）
最大：168.3MPa/ 平均：61.7MPa/ 標準偏差：29.1MPa



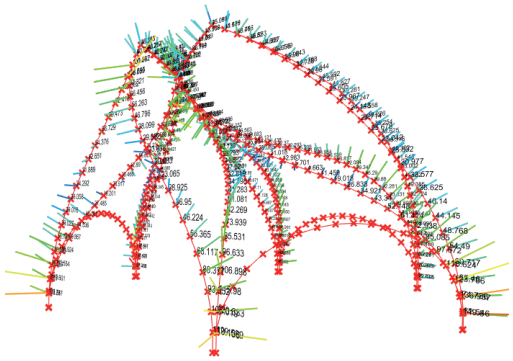
＜シミュレーション結果 - 膜ありモデル＞
曲げ応力度（赤が最大、青が最小、単位 MPa）
最大：194.9MPa/ 平均：64.0MPa/ 標準偏差：33.2MPa

＜透視図＞

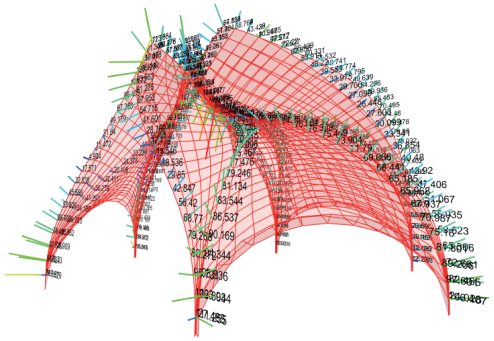


＜断面図＞

fig.5.1.11: 最終成果物 type3

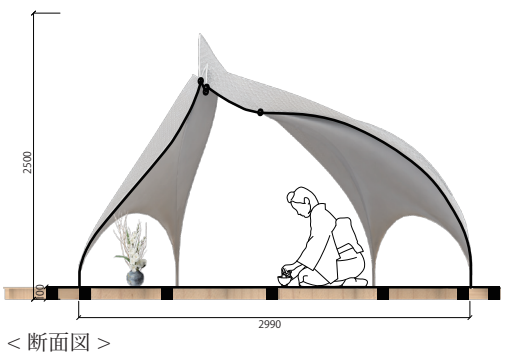


＜シミュレーション結果 - フレームモデル＞
曲げ応力度（赤が大、青が小、単位 MPa）
最大：161.5MPa/ 平均：58.5MPa/ 標準偏差：27.8MPa



＜シミュレーション結果 - 膜ありモデル＞
曲げ応力度（赤が最大、青が最小、単位 MPa）
最大：208.7MPa/ 平均：63.1MPa/ 標準偏差：30.1MPa

＜透視図＞



＜断面図＞

fig.5.1.12: 最終成果物 type4

○風圧力に対して

今回は、屋内での利用であったため、風圧力や積雪などの外力は設計において考慮していない。しかし、本構造においては、風荷重の影響を大きく受けることが想定され、今後屋外利用を考えるにあたり耐風設計が必要になる。そのため、現状発展途上であるが、参考として、風圧とその影響に関する解析を試みたことを報告する。

一般的にシェルのような曲面形状はボックス形状と比較し、風の抵抗を受け流しやすく風に対して有利であるが、実際にしなやかな部材によって構成される曲面形状がどのように風圧を受けるかを把握するために CFD（数値流体力学）による風解析を行った。解析は谷口景一朗氏の協力のもと行った。ソフトウェアに Cradle（株式会社ソフトウェアクレイドル）を使用した。(fig.5.1.13) は、基準風速 15m/s として y 軸正の方向に風を流した時に膜の面が受ける圧力を示し、赤が正圧、青が負圧を示している。この圧力をメッシュごとに取得し、メッシュに圧力を与える、構造解析ツールである Hogan（佐藤淳構造設計事務所）を用いて解析する。CFD ソフトウェアの関係上、メッシュに特定の位置における風圧の取得のために、ソフトフェアのインターフェース内で取得したい領域を一つ一つ手動で登録せざるを得ず、時間を要すことが判明した。そのため今回は (fig.5.1.14) のように細長いメッシュについては 3 分割に、フレームとアーチに囲まれる領域 (三角膜部分) は 1 分割として、その領域内の表と裏の圧力の平均を抽出して、メッシュに対して与えることとした。

取得した数値を (table.5.1.1) に示す。

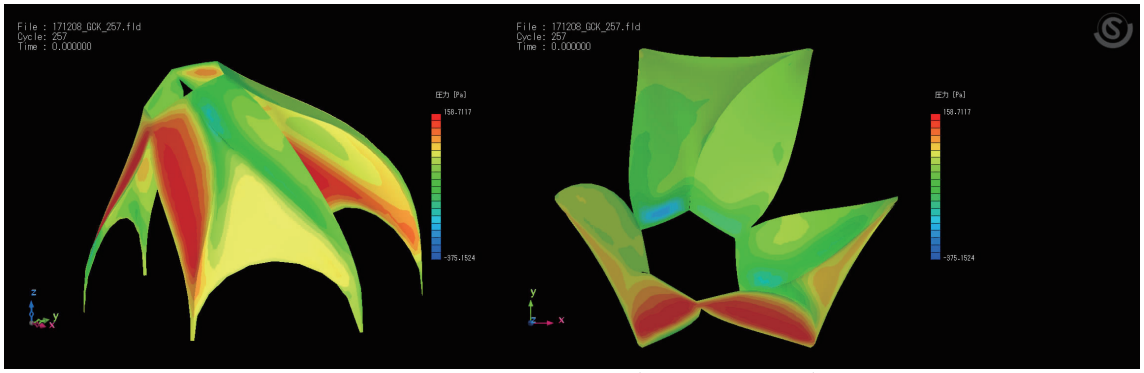


fig.5.1.13:CFD による解析結果（作成：谷口景一朗）

table.5.1.1: 各領域における風圧の平均値と表裏の加算値（作成：谷口景一朗、筆者編集）

			平均値			加算値		
			x[Pa]	y[Pa]	z[Pa]	x[Pa]	y[Pa]	z[Pa]
A	a	1_outside	-6.43E+00	6.53E+01	-2.39E+01	-9.41E+00	9.39E+01	-3.37E+01
		1_inside	-2.99E+00	2.85E+01	-9.74E+00			
		2_outside	-9.63E+00	8.64E+01	-3.52E+01	-1.15E+01	1.03E+02	-4.21E+01
		2_inside	-1.89E+00	1.67E+01	-6.85E+00			
		3_outside	-4.69E+00	8.65E+01	-2.74E+01	-5.34E+00	1.04E+02	-3.29E+01
		3_inside	-6.50E-01	1.77E+01	-5.57E+00			
	b	1_outside	6.09E+01	-7.06E+00	6.92E+01	2.44E+01	-2.32E+00	2.85E+01
		1_inside	-3.65E+01	4.73E+00	-4.07E+01			
		2_outside	4.62E+01	-2.22E+00	4.68E+01	2.29E+01	-8.11E-02	2.34E+01
		2_inside	-2.33E+01	2.14E+00	-2.33E+01			
		3_outside	5.71E+01	-4.55E+00	4.10E+01	1.94E+01	5.09E-01	1.85E+01
		3_inside	-3.76E+01	5.06E+00	-2.24E+01			
	c	outside	2.51E+00	2.66E+00	2.90E+00	-2.12E+01	1.36E+01	-5.42E+00
		inside	-2.37E+01	1.10E+01	-8.32E+00			
B	a	1_outside	1.90E+01	2.89E+01	5.82E+01	5.20E+00	8.09E+00	1.50E+01
		1_inside	-1.38E+01	-2.08E+01	-4.32E+01			
		2_outside	1.15E+01	2.23E+01	4.10E+01	1.60E+01	2.28E+01	4.33E+01
		2_inside	4.55E+00	5.42E-01	2.23E+00			
		3_outside	1.69E+01	3.17E+01	2.09E+01	3.31E+01	3.83E+01	3.01E+01
		3_inside	1.62E+01	6.65E+00	9.20E+00			
	b	1_outside	-4.09E+01	5.67E+01	7.86E+01	-3.52E+01	4.77E+01	6.65E+01
		1_inside	5.72E+00	-8.92E+00	-1.21E+01			
		2_outside	-2.09E+01	4.83E+01	5.15E+01	-2.73E+01	6.19E+01	6.30E+01
		2_inside	-6.36E+00	1.37E+01	1.16E+01			
		3_outside	-4.62E+00	3.15E+01	1.89E+01	-1.46E+01	7.06E+01	4.47E+01
		3_inside	-9.94E+00	3.90E+01	2.59E+01			
	c	outside	-9.80E+00	3.74E+01	1.71E+01	-1.55E+01	8.05E+01	3.46E+01
		inside	-5.74E+00	4.31E+01	1.75E+01			
C	a	1_outside	-3.33E+01	-1.18E+01	1.34E+01	6.72E+00	2.64E+00	-2.69E+00
		1_inside	4.00E+01	1.44E+01	-1.61E+01			
		2_outside	-1.61E+01	-5.81E+00	8.08E+00	-5.23E+00	-1.60E+00	2.74E+00
		2_inside	1.09E+01	4.21E+00	-5.34E+00			
		3_outside	-1.47E+01	-4.04E+00	3.88E+00	1.28E+01	1.56E+00	-3.49E+00
		3_inside	2.75E+01	5.60E+00	-7.37E+00			
	b	1_outside	3.11E+01	5.24E+01	-2.32E+01	6.51E+01	1.13E+02	-4.94E+01
		1_inside	3.40E+01	6.10E+01	-2.62E+01			
		2_outside	4.66E+01	6.46E+01	-3.93E+01	1.23E+02	1.69E+02	-1.07E+02
		2_inside	7.62E+01	1.05E+02	-6.82E+01			
		3_outside	3.20E+01	3.90E+01	-2.01E+01	1.30E+02	1.49E+02	-7.58E+01
		3_inside	9.85E+01	1.10E+02	-5.57E+01			
	c	outside	1.89E+01	1.09E+01	-4.35E+00	3.86E+01	2.30E+01	-7.95E+00
		inside	1.97E+01	1.21E+01	-3.60E+00			

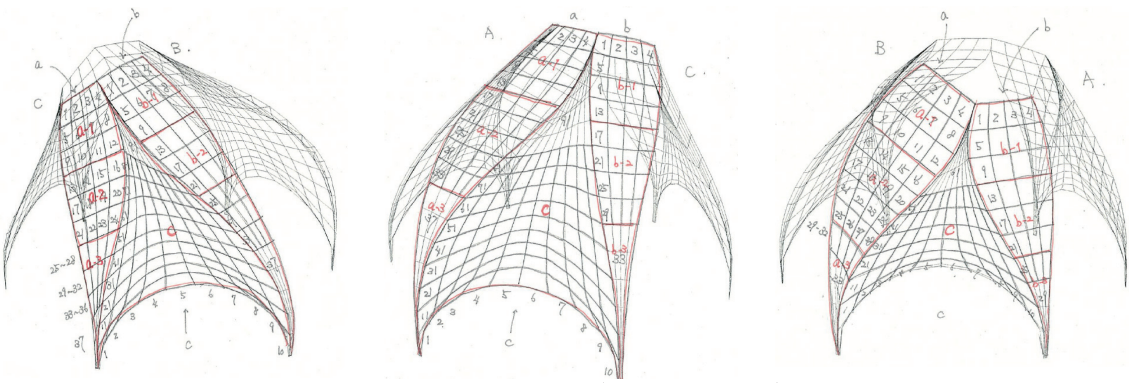


fig.5.1.14: 風圧取得領域図（作成：谷口景一朗）

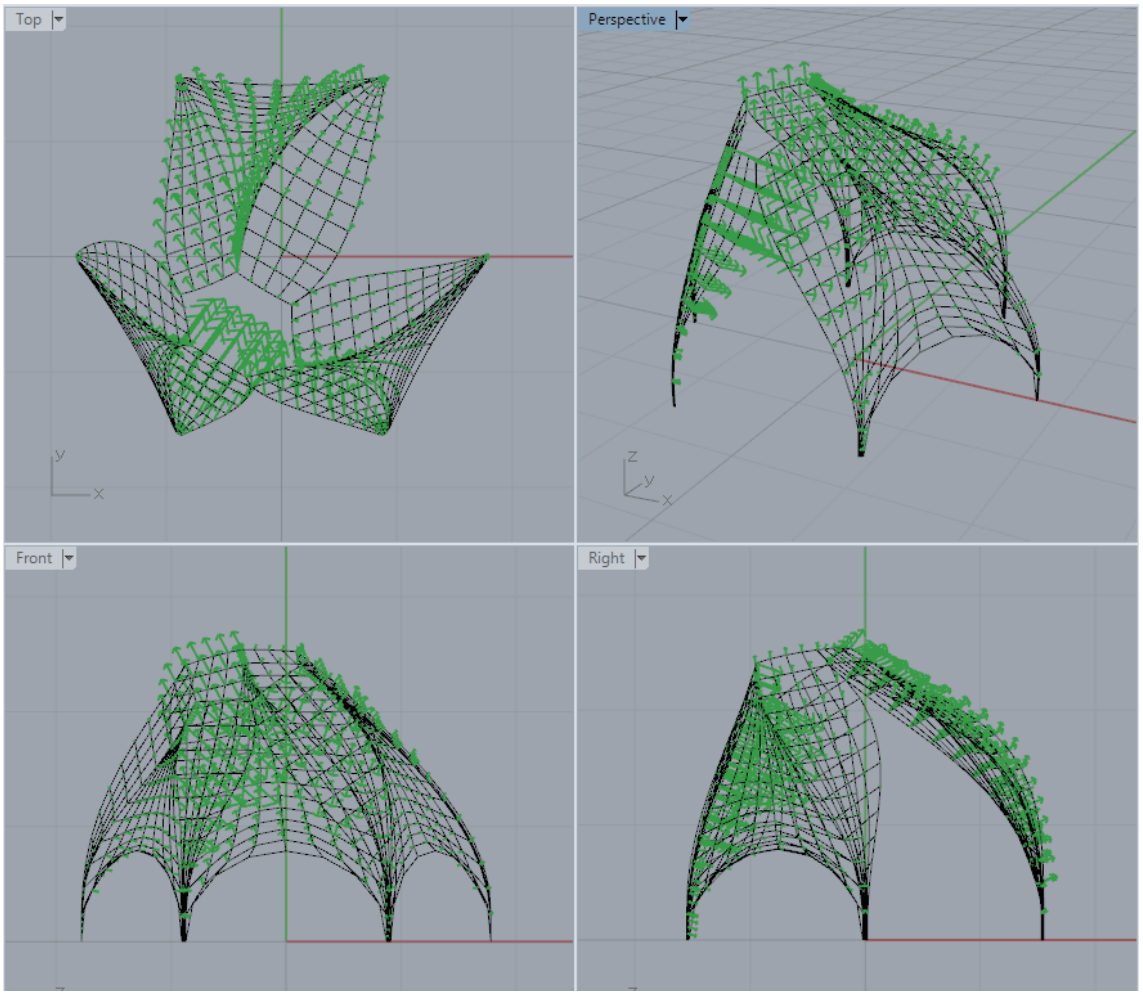
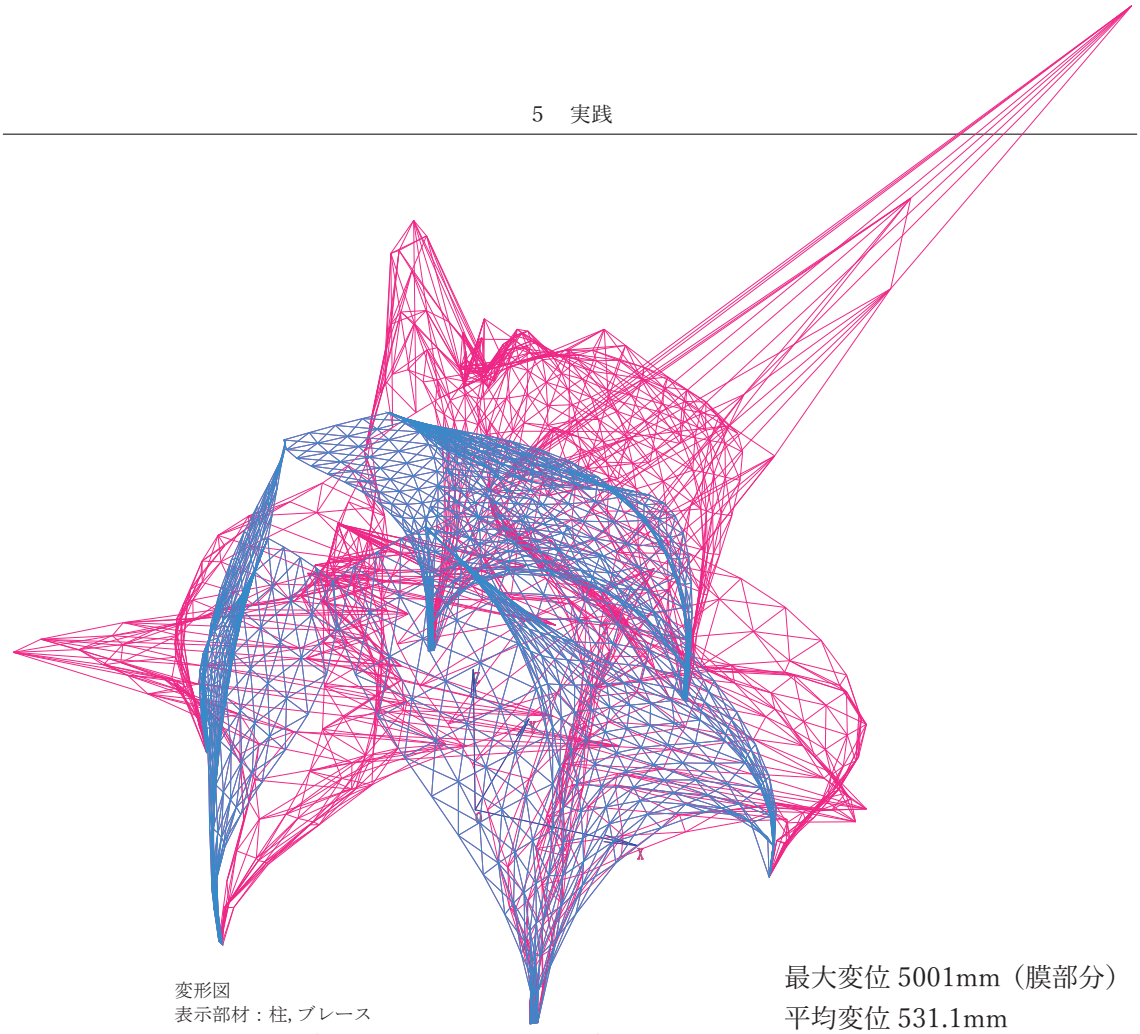


fig.5.1.15: メッシュに与える風圧のベクトル表示

取得した圧力を対応するメッシュに対して与える(fig.5.1.15)。膜のモデルはブレース材として置換し、直交成分と斜交成分からなるモデルをインプットした。直交成分の有効幅は、メッシュピッチの 1/2、斜交成分の有効幅は、メッシュピッチの 1/4 とした。GFRP のモデルは、初期状態から曲げられた状態で入力しているため初期曲げは考慮されていない。まず 15 m /s の基準風速で風解析を行った風圧の結果を入力したところ（fig.5.1.16）のように変位が異常に大きくなってしまう部分が現れ、変位の平均も 531mm と大きい。一方で、(fig.5.1.17）に示す結果は、風圧を 5m/s 時相当に換算したものであるが、変位の平均値も 58mm と小さい。そのため風速 5m/s 時であれば、初期曲げを考慮しても変位は大きくならずに耐えることができると予想される。

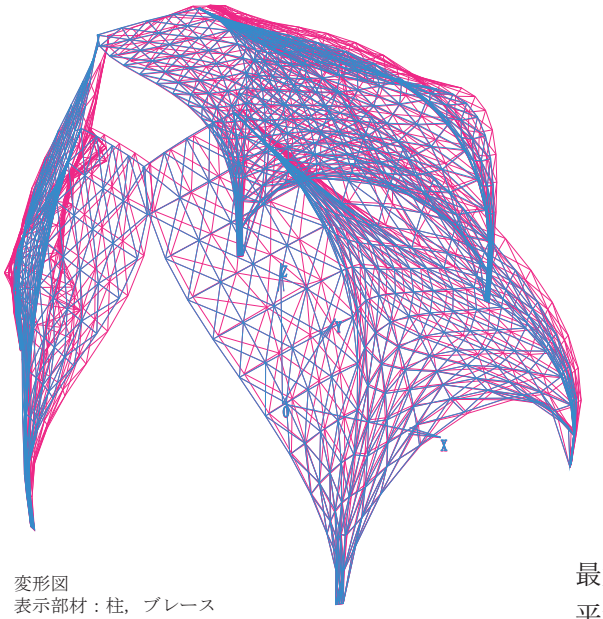
より具体的な解析については今後の課題である。



変形図
表示部材：柱, ブレース

最大変位 5001mm（膜部分）
平均変位 531.1mm

fig.5.1.16:FEM による解析結果（風速 1 5 m/s 時相当の変形図）



変形図
表示部材：柱，ブレース

最大変位 567.3mm（膜部分）
平均変位 57.9mm

fig.5.1.17:FEM による解析結果（風速 5 m/s 時相当の変形図）

5.2.　製作

5.2.1.　概要

設計した架構を実大スケールで制作した。以下、製作の概要
を説明する。

○事前制作概要
作業内容：
　GFRP の制作、膜の製作、ジョイント部材の製作、
　ユニット組み立てなどのプレファブリケーションなど
製作場所：
　東京大学本郷キャンパス工学部 1 号館及び 11 号館
製作期間：
　2017 年 8 月 20 日 -9 月 30 日
　2017 年 10 月 15 日 -10 月 25 日

○現場建方概要
作業内容：
　土台組み立て、ユニット設置など

第一回立ち上げ：
　日付｜　2017 年 9 月 30 日
　場所｜　建築会館（東京都港区芝）
　目的｜　展示
　期間｜　1 日（2017 年 10 月 1 日解体）

第二回立ち上げ：
　日付｜　2017 年 10 月 25 日
　場所｜　銀座三越（東京都中央区銀座）
　目的｜　展示および茶の席
　期間｜　5 日（2017 年 10 月 30 日解体）

○人工
　製作における作業員は最低 3 人
　立ち上げ時など必要に応じて最大 12 人を動員。

5.2.2.　プレファブリケーション

○ GFRP

・製作物

製作する GFRP の部材は 9 本あり、一体成型フレーム 6 本とアーチ部分に使用する部材 3 本である。角の強度を担保するため、フレームはジョイント材を用いて直線部材をつなげ合わせるのではなく、ガラス繊維で一体成型する。アーチ材はフレーム間に配置する膜のエッジ部分に追加する。制作する各部材の寸法とその対応番号を記した概要図を (table5.2.1) (fig.5.2.1-2) に示す。

GFRP の詳しい製作方法は、第 4 章で前述した方法に従った。今回は、8-9mm の GFRP を制作するため 34 本のロービングを配置し、樹脂で硬化させた。なお、全部材の製作には 1 週間程度要した。

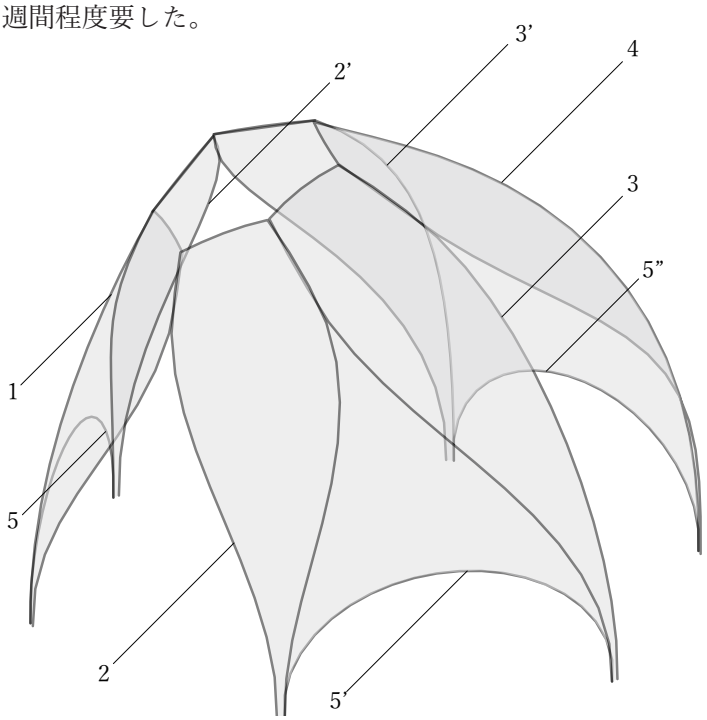


fig.5.2.1: 構造体におけるフレームとアーチ材の対応番号

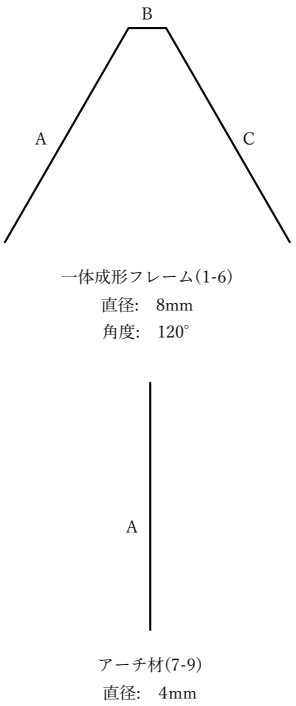


fig.5.2.2: フレームとアーチ材の対応記号

table.5.2.1: 製作するフレームとアーチ材の寸法

	1	2	2’	3	3’	4	5	5’	5”
A	2300	2530	2530	3220	3220	3680	2700	2700	2700
B	560	560	560	560	560	560	–	–	–
C	2300	2760	2760	3220	3220	3680	–	–	–

[mm]

fig.5.2.3: 製作した GFRP フレーム

fig.5.2.4: 制作した GFRP フレーム

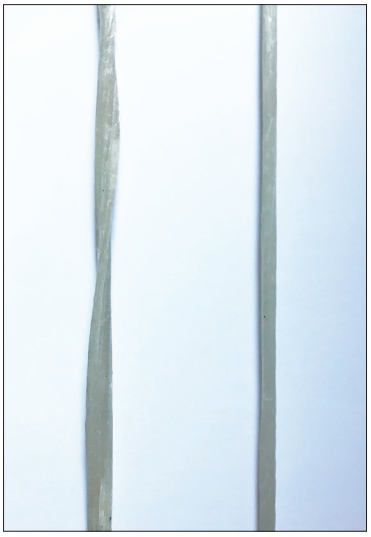


fig.5.2.5: GFRP の失敗例（左）と成功例（右）

・完成物

（fig.5.2.3,4）は、前述した方法で製作した実寸大の GFRP フレームである。（fig.5.2.5）は、失敗したフレーム（左）と成功したフレーム（右）の断面形状の例を示している。製作の過程で、繊維に十分なねじりが与えられないとガラス繊維が硬化する前に重力によって垂れ下がり、いびつな形状まま硬化してしまう。この結果、材軸方向の断面形状が異なるため、局所的に強度が変わってしまいしなやかに変形できない。

一方で製作に成功したフレームは、繊維がしっかりとねじられ、硬化中にたるむことなく成形され、図のようにほぼ一定の丸断面となり、しなやかにたわむ様子を確認できた。

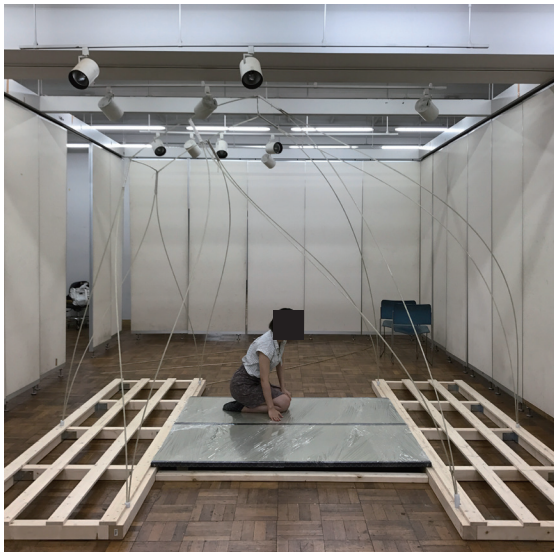


fig.5.2.6: GFRP フレーム連結させた状態 -type1

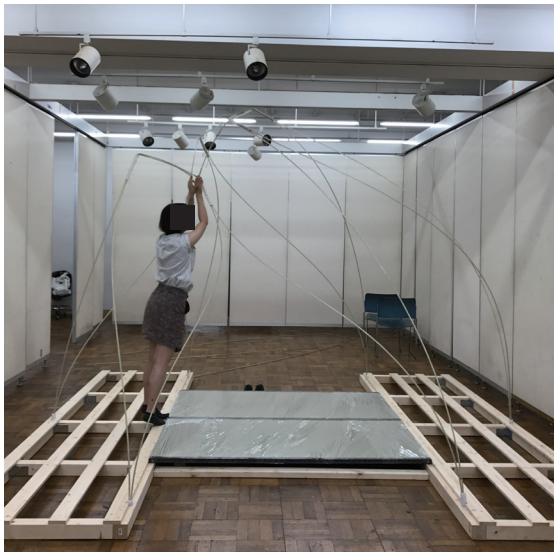


fig.5.2.7: GFRP フレーム連結させた状態 -type2

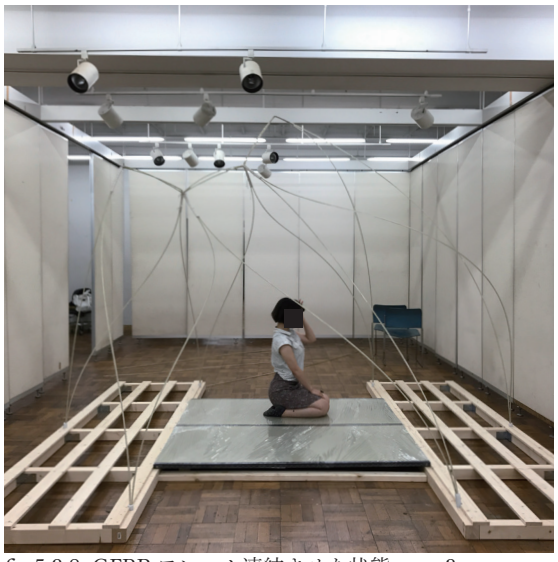


fig.5.2.8: GFRP フレーム連結させた状態 -type3

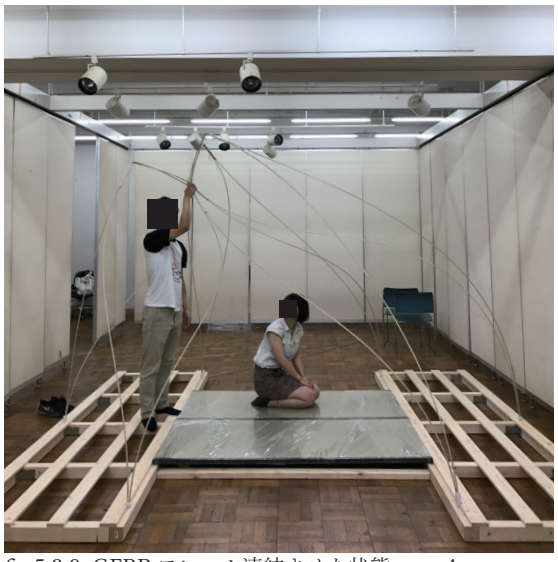


fig.5.2.9: GFRP フレーム連結させた状態 -type4

・連結の検証

製作したフレームを連結し、無理なく架構を成立できるかどうかを確かめた。フレーム間の連結はナイロン紐を使用し、手作業で実施した。連結方法は、(fig.5.2.10) に示す①の方法で 10 巻ごとに②の方法で 1 巻を繰り返し、フレーム間の摩擦を軽減するため隙間を作りつつも強力な連結を目指した。特にフレームが短い部分ほど結束に力が必要になったが、十分な拘束力で強度で連結することができた。また、形状を変形させる操作も簡易に行い、目的の形状が座屈をすることなく成形されることが確認された。

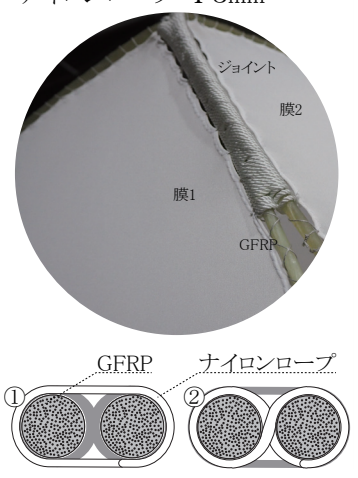


fig.5.2.10: ナイロン紐による連結部のジョイントの様子と概略図

○膜

・製作物

今回は、一方向に強い伸縮性を持つ生地を用いて、膜の制作を行う。製作する膜のカッティングパターンを (fig.5.2.14) に示す。

以下の工程で製作を行った。膜の伸縮率は長手方向に 92%、短手方向に 85%とした。

①型紙の製作と膜の裁断

3 DCAD によって展開したカッティングパターンを出力し、その型に従って生地を裁断した。

②エッジの処理

今回は、GFRP に対して膜を糸で篝縫いをすることで縫合する。そのため、膜のエッジが切れないように、エッジを 2 回折り返し、3 重にする処理を行った。エッジはミシンで縫い付けるが、縫い付けた時に伸縮性の低くなってしまうことを避け、ジグザグ縫いを施す (fig.5.2.11-13)。

以上、膜のプレファブリケーションには、1 週間ほど要した。

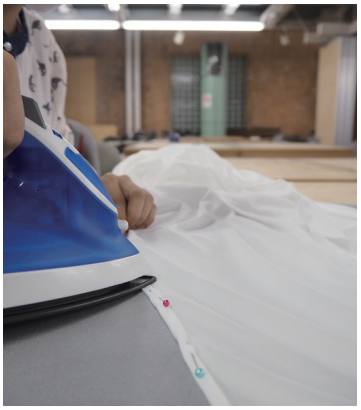


fig.5.2.11: 膜のエッジ処理 1

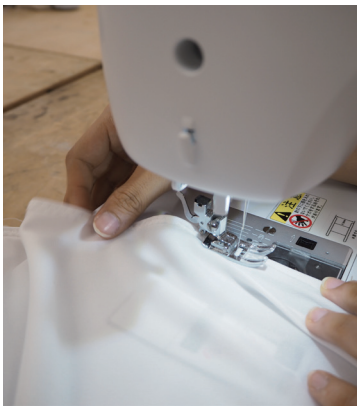


fig.5.2.12: 膜のエッジ処理 2

fig.5.2.13: 膜のエッジ処理後の膜

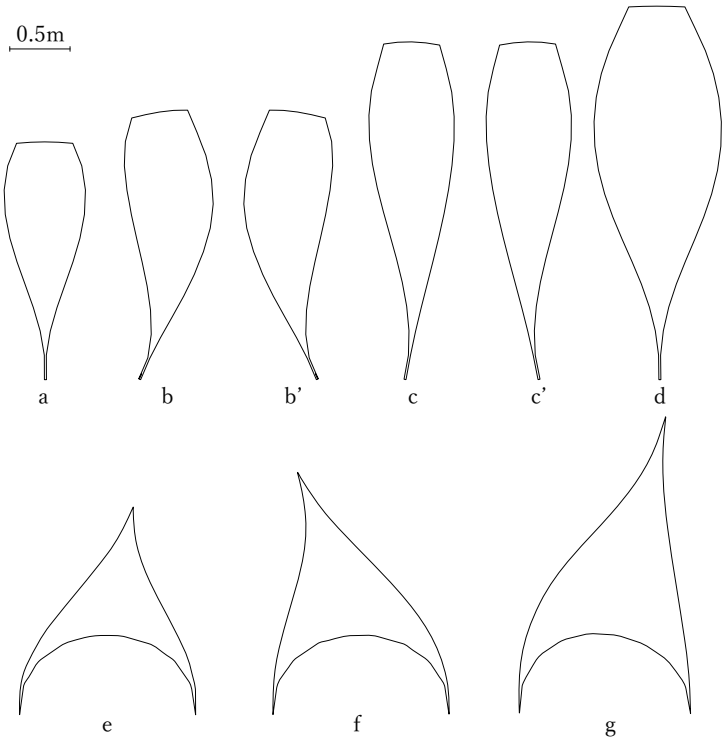


fig.5.2.14: 膜のカッティングパターン

・膜の縫い付け

製作した膜を各フレームに縫い付けていく。手作業によって、約 2 センチピッチで篝縫い (fig.5.2.16,17) を施し、(fig.5.2.15) に示すようなユニットを作成した。膜はほぼ隙間なく縫合することができたが、部分的に張力が強い箇所（フレーム番号 4 、膜番号 d）があり、想定よりも大きくの GFRP フレームが変形した。しかし、膜の製作と縫い付けに多くの時間が割かれ、膜の検証を十分に行うことができなかったため、1 枚だけ、膜を張りあてて立体裁断し、やや余裕を持たせて再度製作した。膜のシミュレーションにおけるモデルと張力設定を見直し、再度検証される必要があることがわかる。

また今回は製作場所と設営場所が異なったため、運搬の関係で、事前に縫い付けられる部分が限られた。そのため、より効率よく施工するためには、膜のエッジにポケット状の空洞を設けて、そこに GFRP を挿入する方法など改良が求められる。

fig.5.2.15: 膜を張り合わせたユニット

fig.5.2.16: 膜の縫い付けの様子

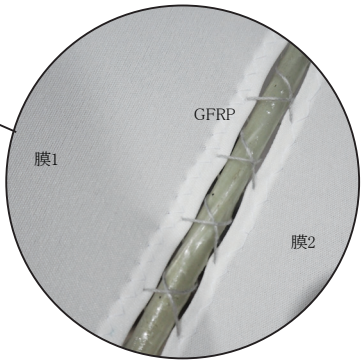


fig.5.2.17: 篝縫いの詳細

○柱脚

・製作物

GFRP フレームを基礎である木材に対して固定するに当たり、木材に対して直接、近接する 3―4 つの穴を正確な位置に開けることは難しかったため、木材に対して直径 30mm の穴を一つ開け、そこにジョイント部材を挿入することで脚部を固定することを考えた。ジョイント部材は (fig.5.2.20,21) のように設計し、3 D プリンティング (fig.5.2.19) によってポリカーボネートの柱脚を製作した (fig.5.2.18)。

(fig.5.2.22) は実際に、土台に挿入した図である。ジョイント部材によって GFRP フレームの脚部を常に拘束しておくことができるため、梱包の面でも利点がある。

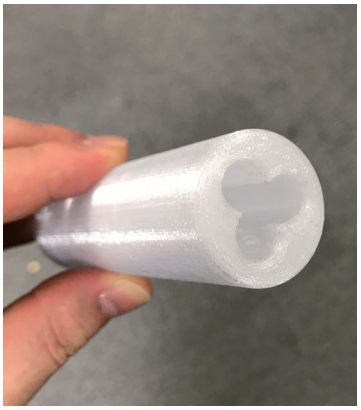


fig.5.2.18: ジョイント部材

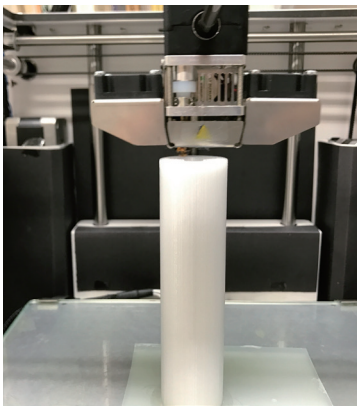


fig.5.2.19:
3 D プリンティングの様子

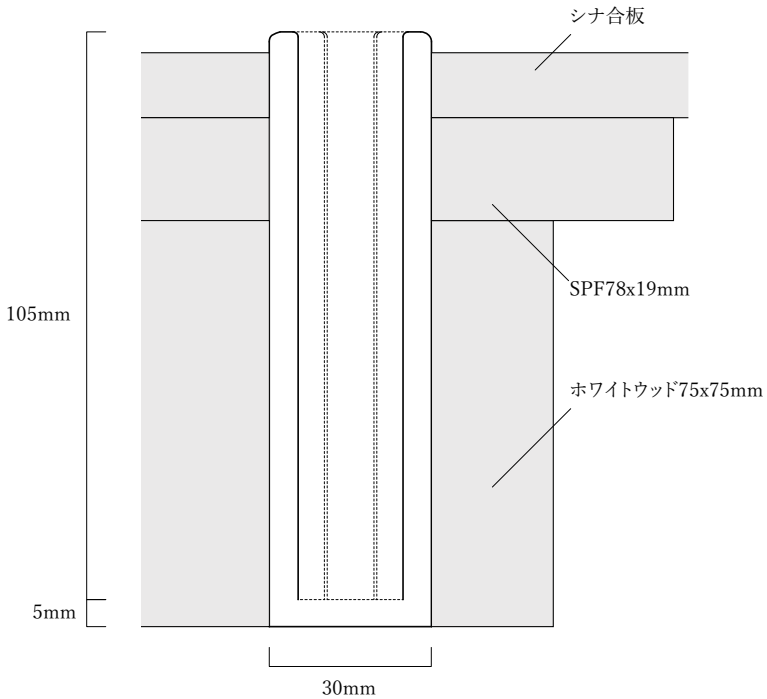


fig.5.2.20: ジョイント部材の断面図　―土台とジョイント収まり

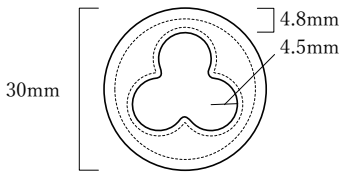


fig.5.2.21:
ジョイント部材の平断面図

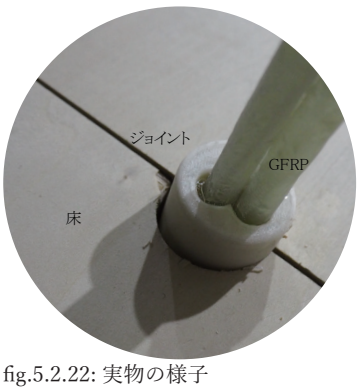


fig.5.2.22: 実物の様子

○運搬

(fig.2.5.15) に示したユニットを 3 つ制作し、まとめて梱包することで搬送できるようにした (fig.5.2.23)。一体成型フレームをベースとして製作したため、長さは 3.6m 程度と長くなってしまったが、膜、フレーム、ジョイント用のロープを含めた総重量は約 6 kgと非常に軽く、一人でも持ち運ぶことが可能である。2t トラック問題なく積み込むことができ、運送における問題事項もなかった。

より可搬性を向上させるためには、一体成型フレームではなくテントのように部分的にジョイントしながらフレームを構成する方法により対応が考えられる。FRP においては接合部の設計が一つの課題であるが、今回の架構の場合では、ユニットを組んだ後、または、形状を献花させた後に曲げがあまり生じないフレーム長辺の中央付近で継ぐことがよいと予想される。

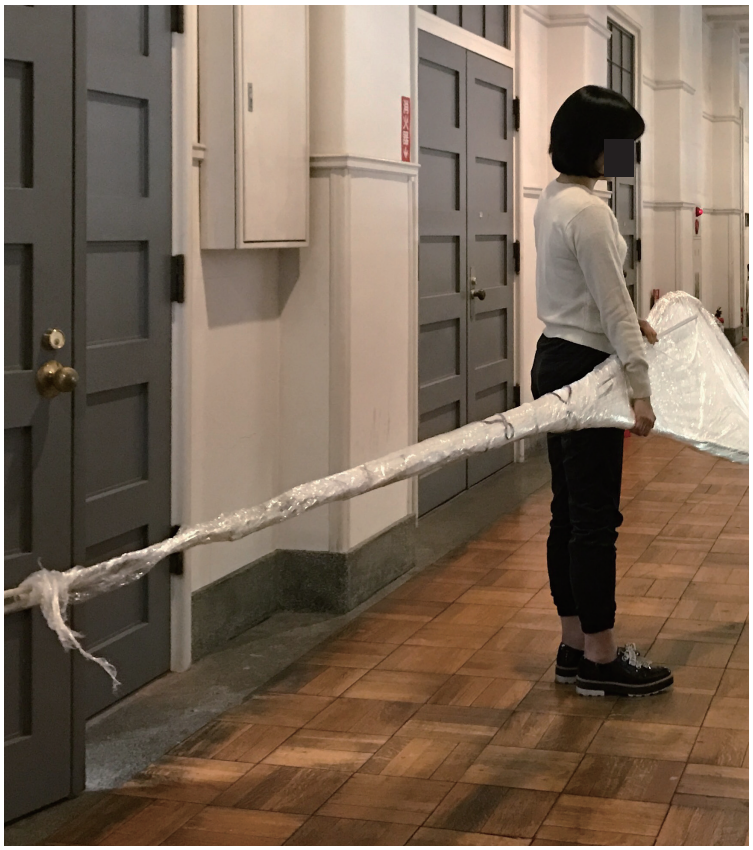


fig.5.2.23: 土台以外の全部材を梱包した様子

fig.5.2.24: 梱包物の軽量

5.2.3.　設営

第一回立ち上げ時の工程について記す。
○工程
①土台の組み立て
　土台は、大引き（ホワイトウッド 75mm 角）、根太、板によって構成される。大引きとなる角材同士は金折で接合し、根太は直接ビスで大引きに対して打ち付けた。板は根太の裏からビスで打ち付け固定した。以上より、土台を組み立てた(fig.5.2.25)。組み立てる木材をあらかじめ切断し、部分的に連結した状態で搬入したため、作業としては、1 時間程度で終了した。

②ユニットの展開・設置
　梱包した搬入したユニットを展開し、土台に設置した(fig.5.2.26)。土台にあらかじめ開けられた穴に脚部を挿入するだけであったので、数十分で完了した。

③ユニットの連結・アーチ部材の配置・一部の膜の縫合
　展開し、設置した 3 つのユニットの上部をそれぞれ連結する (fig.5.2.27)。連結した部分には膜を縫い付けていなかったためその部分を縫い付けフレームと膜に隙間がない状態にした。続いて、アーチ部材を配置した。アーチ部材は運搬の都合上、組んだ状態で梱包することが難しかったため、個別で運んだ。そのためアーチ部材には、この時点で膜の縫合を行った (fig.5.2.28)。縫合の方法はフレームに縫い付けたときと同じく糸で GFRP に直接篝縫いを施した。この作業には、約 3-4 時間要した。

④開閉機構の設置
架構の形状を変えるためのケーブルを配置し、開閉動作ができるかを確認する (fig.5.2.29)。詳細は後述する。

⑤たたみの設置・完成
最後に畳を設置し、完成した (fig.5.2.30)。

ここまでで、約 7 時間を要した（休憩込み）。

fig.5.2.25: 工程①

fig.5.2.26: 工程②

fig.5.2.27: 工程③

fig.5.2.28: 工程③

fig.5.2.29: 工程④

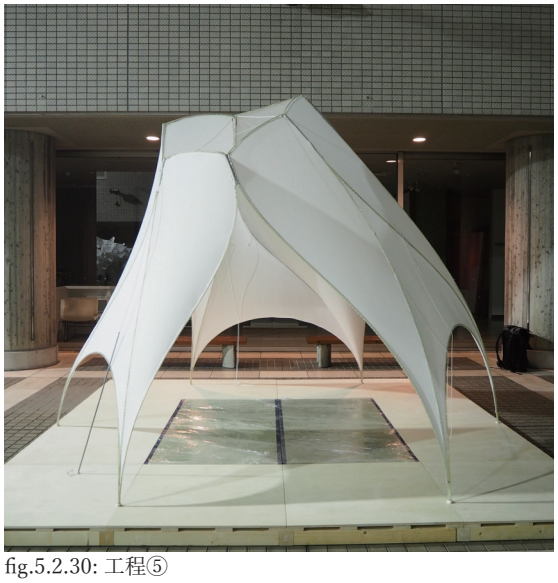


fig.5.2.30: 工程⑤

○開閉動作の確認

ケーブルの設置方法によって閉じるパターンを変えることができるが、第一回設営・展示時には、特に代表的な開閉パターンのみのパフォーマンスを行った。開閉機構は (fig.5.2.31) のように設置し、開いた状態から、3 点を寄せ合わせて閉じることができるようなケーブル配置とした。また、今回は外から操作できることが条件であったため、ケーブルを一端から引っ張ると巾着袋のように閉じる仕組みとした。

変形操作を外側から行った様子を (fig.5.2.32) に示している。図のように閉じた状態から開いた状態に一人でも問題なく変形させることができた。

しかし、閉じた状態から、ケーブルを緩めても完全開いた状態には戻らず、部分的に形を整える必要があった。これは、一度閉じた状態にすると、GFRP のフレーム上部のジョイント部分が、ナイロン紐の下でねじれてしまい、摩擦が大きくなってしまうことが原因であると考えられる。

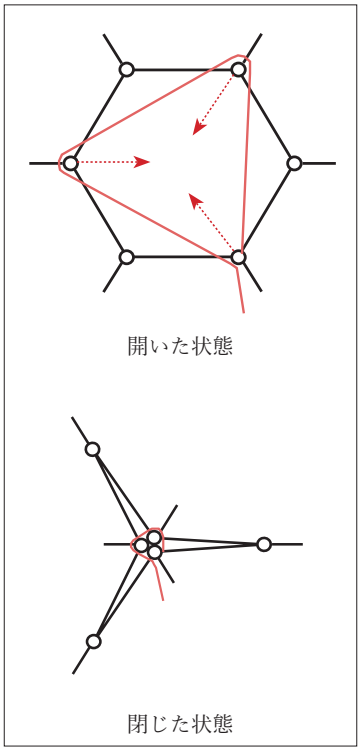


fig.5.2.31: 開閉機構の設置概念図

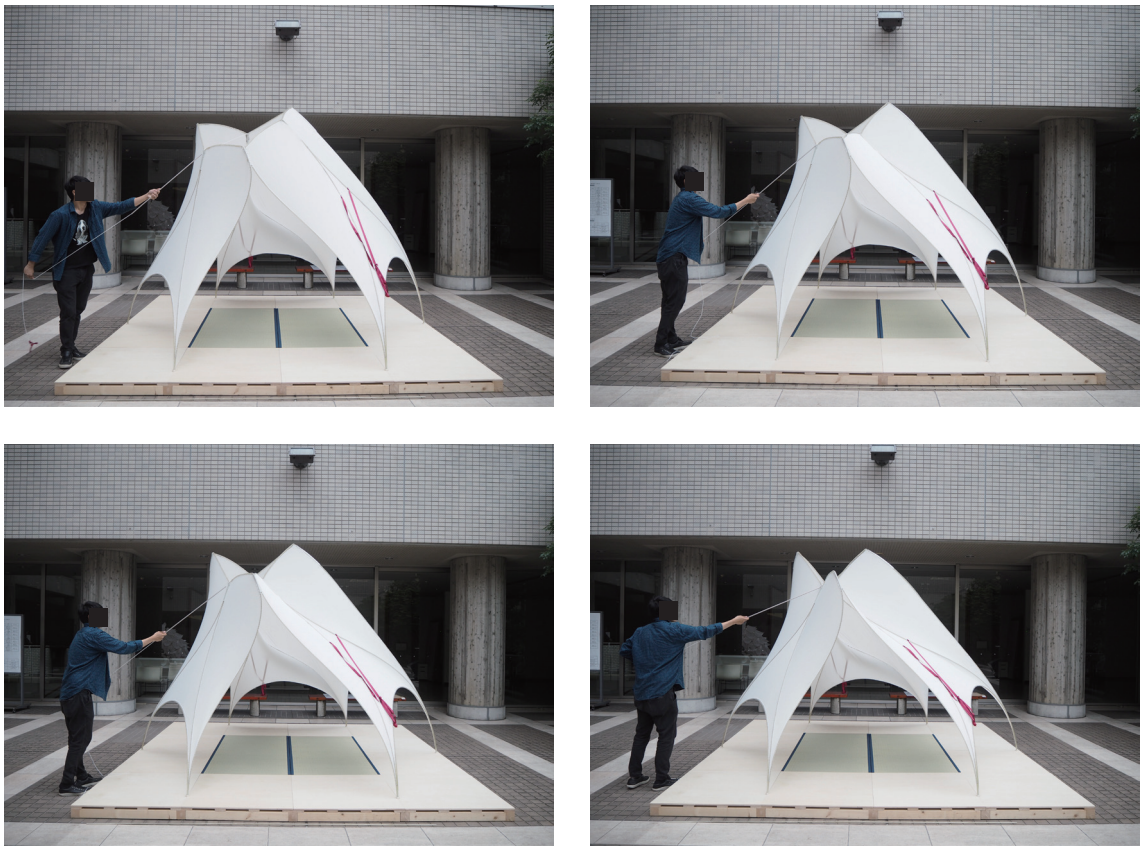


fig.5.2.32: 変形の様子

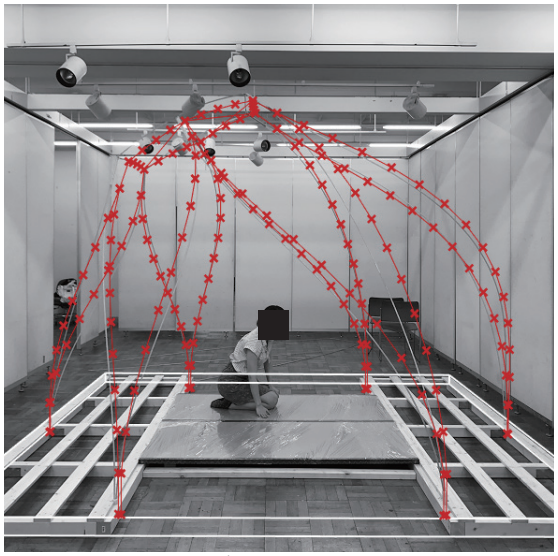


fig.5.2.33: フレームモデルにおける重ね合わせ -type1

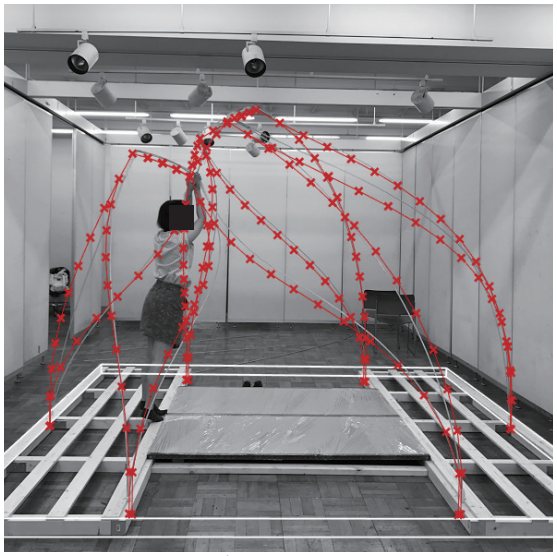


fig.5.2.34: フレームモデルにおける重ね合わせ -type2

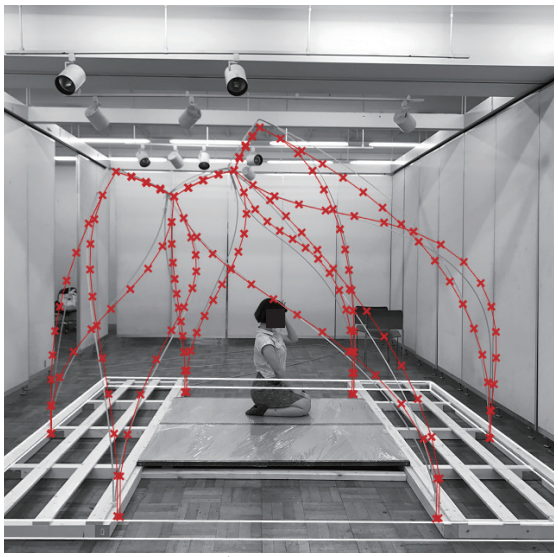


fig.5.2.35: フレームモデルにおける重ね合わせ -type3

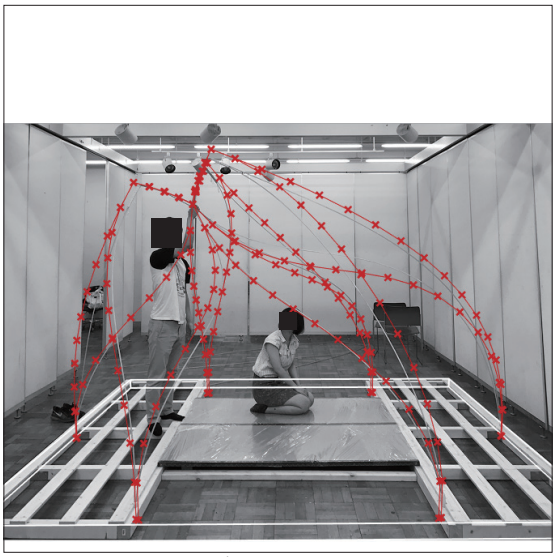


fig.5.2.36: フレームモデルにおける重ね合わせ -type4

○シミュレーション結果との対応

3DCAD 上で GFRP のフレームを連結したモデルのモックアップと膜を追加したモックアップにおける写真とそれぞれに対応するシミュレーション結果を重ね合わせた結果を (fig.5.2.33-36) に示す。

フレームのみモデルにおける両結果の対応はスケールを挙げても概ね近く再現できていることが確認できる。また、形状を変形させても、同様に対応できているものと見て取れる。膜を追加した場合においても、概ね再現できていることが確認できる。しかしシミュレーションでは部材の中腹部において局所的に外部方向に膨張している様子が見られ実際との誤差目立つ箇所もある (fig.5.2.37,38)。

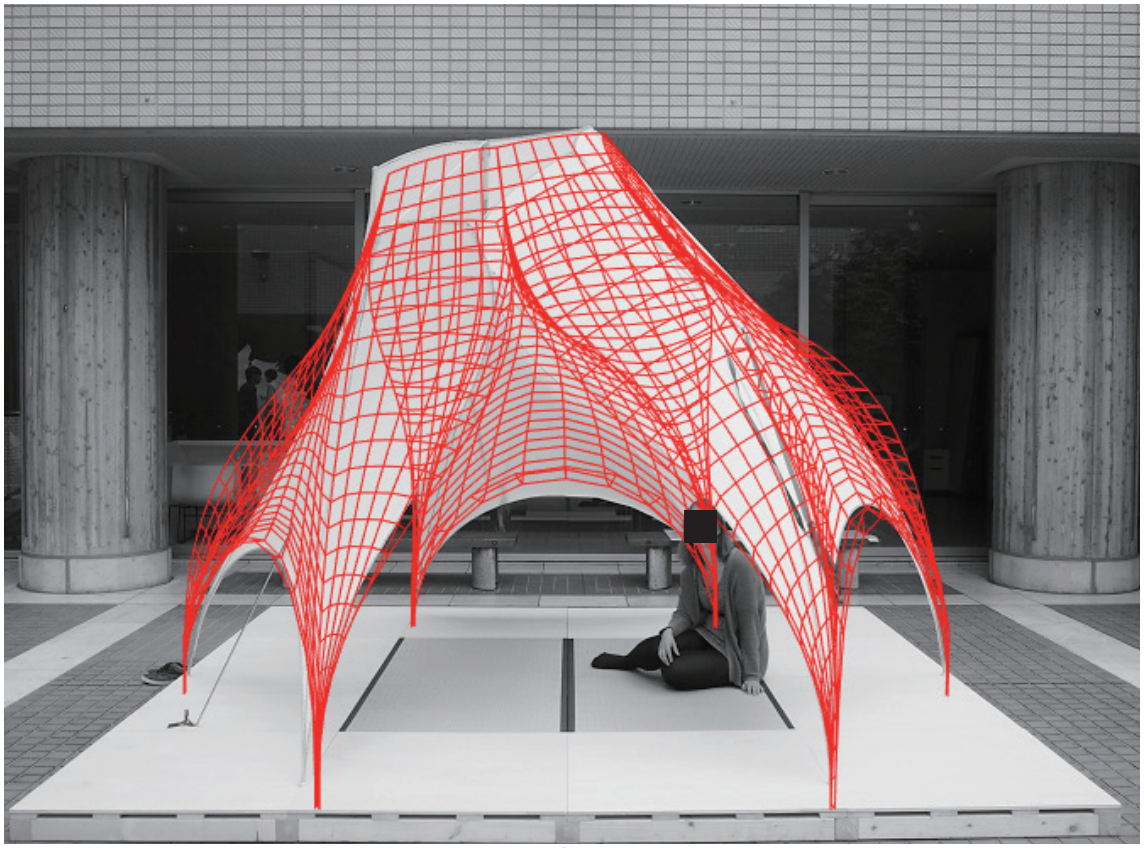


fig.5.2.37: 膜を追加したモデルにおける重ね合わせ -type1

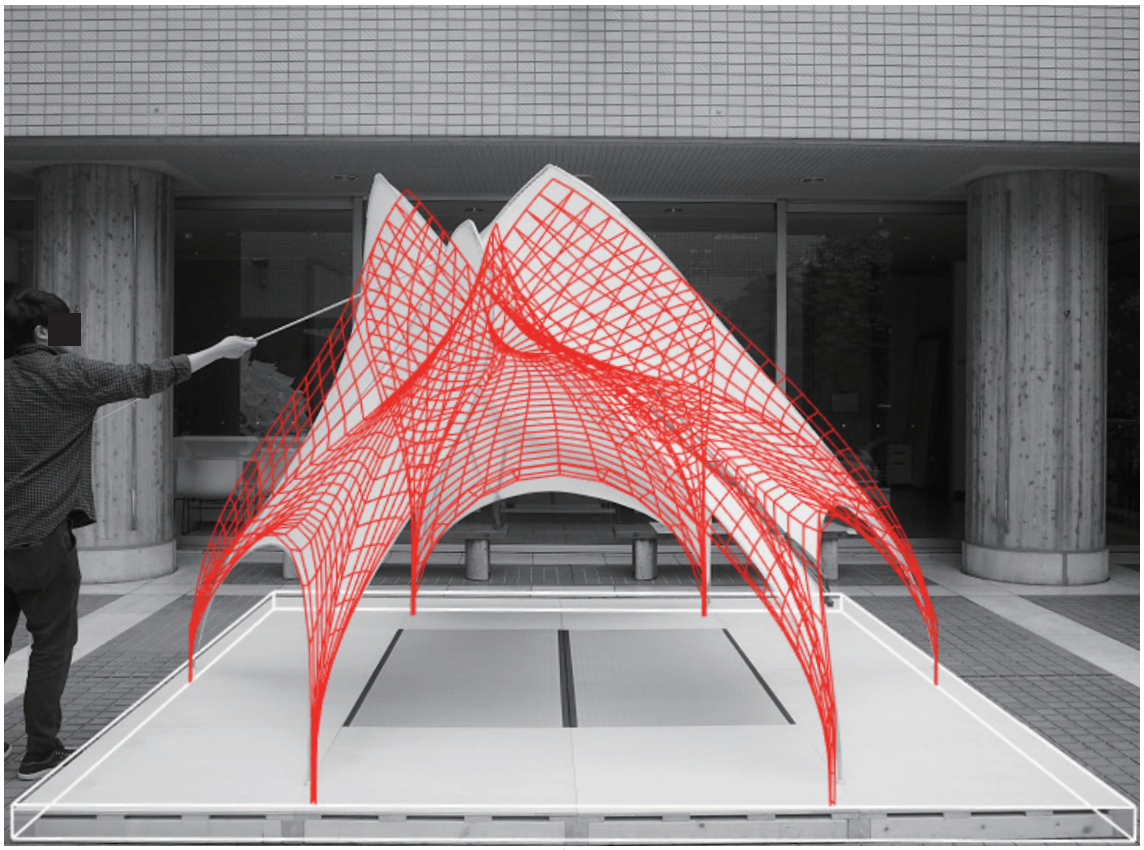


fig.5.2.38: 膜を追加したモデルにおける重ね合わせ -type4

○まとめ

・製作

設計した架構の製作におけるすべての工程を人力で行った。第 4 章では直径 4mm の部材を製作したが今回は、直径約 9mm の部材を製作し、スケールを挙げてもフレームの柔軟性が確認された。製作した部材をユニット化し、持ち運べる程度に非常に軽く、コンパクトにまとめることができることがわかった。また、組み立て自体もユニットを展開し、一部縫い合わせる程度で、さほど時間はかからなかった。

しかし、事前工程および膜とフレームを手で縫合することに時間を要したため、エッジ部分に袋（ポケット）をつくり、そこにフレームを挿入するなど用意に分解できる仕組みの検討される必要性がある。

・可変形態の操作

完成形とその形状変化においては、閉じる動作は問題なくできるものの、変形後に摩擦で元の形状に戻らないという状態となった。そのため、上部の連結部分のねじれを解決するジョイント材の開発が今後の構法的な課題としてあげられる。

・シミュレーションとの画像比較

また、シミュレーションとの対応であるが、フレームのみの場合においては、非常に近い結果を得ることができているが、一方で膜を追加した場合には、シミュレーション結果が実物に対して、一部外方向に膨らむような挙動を示した。このことから、第 4 章でも確認されたように入力する張力またはその方向に原因があると考えられる。前述したように対策としては、膜のモデルの各方向における影響度の確認、膜のモデル化の際に斜行線分の考慮、膜に対して 2 方向に張力を与えた際の復元力に関する実験と検証などがあげられ、今後の検討事項として考えられる。

5.3.　空間利用

○概要

本製作物は 2017 年 10 月 26 日から 2017 年 10 月 30 日まで銀座三越にて展示され、27 日、28 日および 29 日の銀茶会 * 当日には、実際に鈴木小夜子氏、武者小路千家、表千家による点前が執り行われた。設営は 25 日に、前述した工程と同様の流れで完了し、解体は 30 日に行われた。

fig.5.3.1: 銀座三越での展示の様子

○構造の変更点

構造は前節までのものを元に、茶室としてより意匠的、建築計画に改良するために、依頼者からの要請を踏まえながら一部変更した。まず、膜の追加し、覆われる。また膜を追加した部分に円窓の追加し、床の仕上げを毛氈とし、意匠的なメリハリを与えた。構造的な大きな変更点は、高さの調整と一部柱脚の位置の変更である。高さの調整は、防火の高さ制限によるもので、前節の構造の各フレームの足元を 50 〜 100mm 切断し、全体の高さを 2 .4m に収まるよう修正した。また、茶道口の間口を 400mm 程度狭くする指示を受け、その部分の柱脚位置を変更した。これに伴い、フレームの連結時により大きな力が必要としたが、問題なく設営できた。

fig.5.3.2: 第 2 回立ち上げの様子

○点前

実際に上部の開口が完全に開いた開放的な空間や、開口を閉じ、小さく落ち着いた空間、また、客側を小さくし、亭主側に半分だけ開いた強弱のある空間など、複数の形状での点前が執り行われた。点前の回ごとに形状を変えることで、ショーケースとして空間体験の差を効果的に演出した。

○まとめ

このように限られたスペースでも、包み方・開口の大きさをダイナミック変えることで複数の異なる雰囲気の空間を演出できた。これは、部材がしなやかでありながら強度がある材料の性能を引き出すことで成立するものである。今回は室内での使用だったため環境に対しての適応できる空間として演出することはできなかったが、その可能性を十分に提示する新しい茶室空間のプロトタイプであったといえる。

* 毎年秋に銀座全体で開催される行事で、茶道五流派、煎茶道が一堂に会し、お茶をふるまい日本の伝統文化を伝えるイベント。今回で 16 回目を迎える。

fig.5.3.3: 点前の様子（開口部解放した形状）

fig.5.3.4: 点前の様子（開口部を閉じた形状）

fig.5.3.5: 点前の様子（内部）

fig.5.3.6: 最終制作物 -type1

©ERINA UETA

fig.5.3.7: 最終制作物 -type2

©ERINA UETA

fig.5.3.8: 最終制作物 -type3

©ERINA UETA

fig.5.3.9: 最終制作物 -type4

©ERINA UETA

fig.5.3.10: 最終制作物 -type1

©ERINA UETA

fig.5.3.11: 最終制作物 -type2

©ERINA UETA

fig.5.3.12: 最終制作物 -type3

©ERINA UETA

fig.5.3.13: 最終制作物 -type4

©ERINA UETA

fig.5.3.14: 最終制作物 -type1

©ERINA UETA

fig.5.3.15: 最終制作物 -type2

©ERINA UETA

fig.5.3.16: 最終制作物 -type3

©ERINA UETA

fig.5.3.17: 最終制作物 -type4

©ERINA UETA

fig.5.3.18: 最終制作物 -type1

©ERINA UETA

fig.5.3.19: 最終制作物 -type2

©ERINA UETA

fig.5.3.20: 最終制作物 -type3

©ERINA UETA

fig.5.3.21: 最終制作物 -type4

©ERINA UETA

fig.5.3.22: 最終制作物 -type1

©ERINA UETA

fig.5.3.23: 最終制作物 -type2

©ERINA UETA

fig.5.3.24: 最終制作物 -type3

©ERINA UETA

fig.5.3.25: 最終制作物 -type4

©ERINA UETA

fig.5.3.26: 最終制作物 - 内観 1

fig.5.3.27: 最終制作物 -type1 内観 ©ERINA UETA

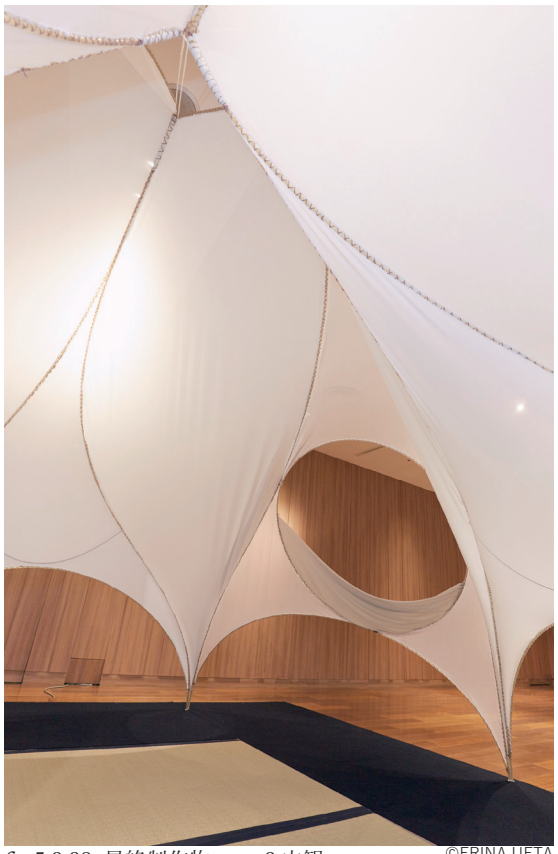


fig.5.3.28: 最終制作物 -type2 内観 ©ERINA UETA

fig.5.3.29: 最終制作物 -type3 内観 2 ©ERINA UETA

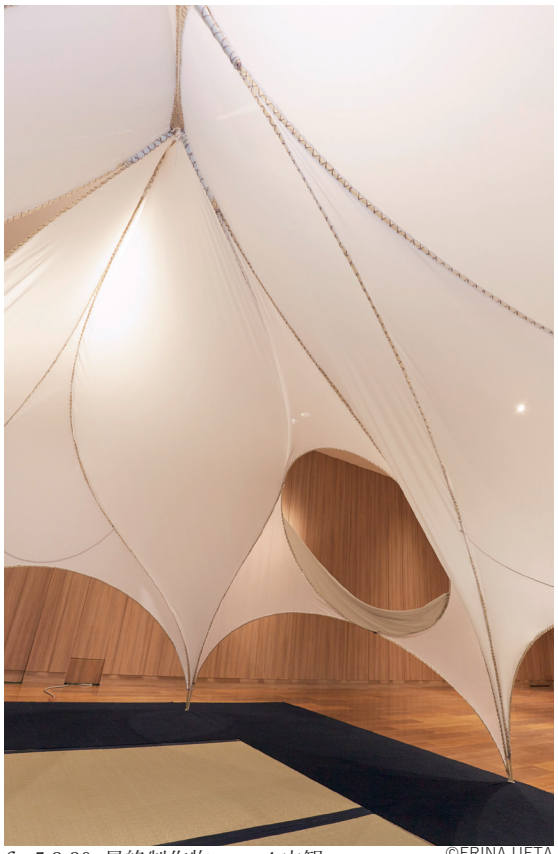


fig.5.3.30: 最終制作物 -type4 内観 ©ERINA UETA

fig.5.3.31: 最終制作物 - 詳細 1

©ERINA UETA

fig.5.3.32: 最終制作物 - 詳細 2

©ERINA UETA

fig.5.3.33: 最終制作物 - 詳細 3 ©ERINA UETA

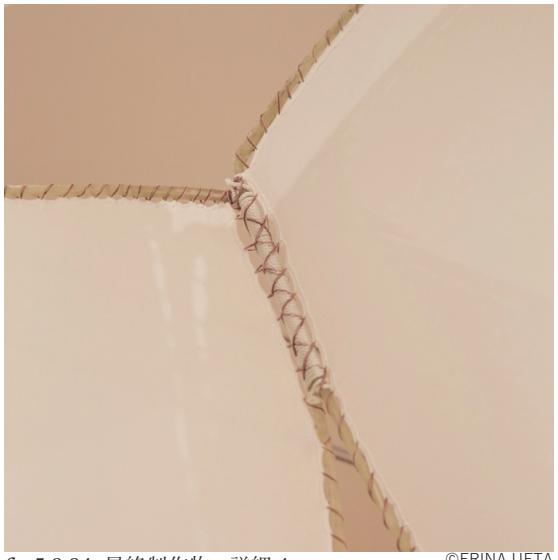


fig.5.3.34: 最終制作物 - 詳細 4 ©ERINA UETA

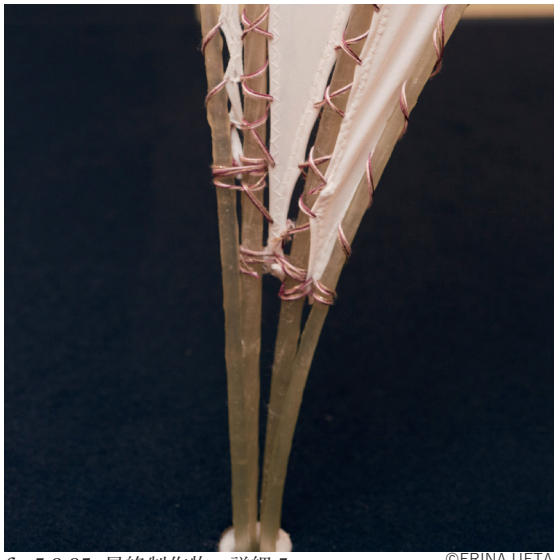


fig.5.3.35: 最終制作物 - 詳細 5 ©ERINA UETA

5.4.　小結

解析の実践的応用と本架構の実現可能性検討のため仮設構造物の設計と施工を行った。

目標形状として約 10m^2(スパン 3.6m) を覆う架構を設定した。架構の構成は、長さの異なる 6 フレームからなるものとすることで、最大 12 パターンの形状に変形できる形態を目指した。設計の基準は平面計画に加え、部材に発生している曲げ応力度が降伏曲げ応力度 229MPa 以下であることを評価基準とし、部材寸法のパラメータを操作し、解析を繰り返すことで最終形状を決定した。最終的に直径を 9mm、フレーム最長 3.68m, 最短 2.30m、屈折角度 120°、1 方向伸縮膜 (弾性率は縦方向 5MPa、幅方向 19MPa、厚さ 0.3mm) の幅方向を膜の長手方向とし、長手方向に 92%、短手方向に 85% の伸縮率を与えた。その後、代表的な 4 タイプの形状を確認したところ、基準を満たすことが確認された。リアルタイムでパラメータを変更し、その都度、形態の挙動を確認できるため、設計には大いに有効に作用した。

製作は、プレファブリケーション（GFRP・膜・ジョイント部材の製作とユニット化）と建方（土台の設置・ユニットの設置と連結・開閉ケーブルの設置）の流れで行い、問題なく完成に至り、設計から製作までシミュレーションを通して行われ、システムの有用性が確かめられた。

製作した架構とシミュレーション結果を重ね合わせる比較検証も行い、概ねよい対応がみられたが、解析結果が一部、製作物よりも膨らみの挙動を示し、誤差が目立つ部分が確認された。

最後に、展示と空間利用について報告した。製作した構造物は実際に銀座三越にて展示され、茶人たちによる点前が行われた。上部の開口が開いた開放的な空間や、開口を閉じ小さく落ち着いた空間など複数の形状で点前が行われ、限られたスペースでも空間の包み方をダイナミックに変えることで複数の異なる雰囲気の空間が得られることを確認した。

第 6 章

総括

6.1. 結論

6.2. 課題と展望

6.1.　結論

本研究ではしなやかな部材の大変形を積極的に応用した可変形態において、建物全体が複数の状態に変形できる架構に着目し、その基本構成の一例を提示した。またシミュレーションによって実際の挙動を再現することに加え、実践的実施設計に応用し、建築物の製作を行うことで、その有用性と実現可能性を確認することを目的として、研究を行った。以下、本研究での成果をまとめる。

○基本構成の提案

コンプライアントメカニズムを構造材に適応し、回転動作を可能とする機構を架構に取り入れることで、ヒンジ部分の回転パターンに従って多方向に大きく変形する構造が得られることが確認された。

○シミュレーションシステムの構築とその制度の検証

位置ベースシミュレーションツールである Kangaroo2 を用いて、フレーム部材の曲げの挙動、可変形態の操作、膜の張力の影響を再現するシステムを構築した。小模型の実測値との比較検証においては、架構頂部にねじれが発生しないフレームのみのモデルの場合において非常によい一致が見られた。一方で、形状を変形させた、ねじれが発生するケースにおいては、その抵抗を再現する制約を節点に与える設定を加え、その強さ Cp.str ＝ 500 程度の時に近い一致が見られた。

同様に膜を追加した際にも検証を行ったところ、変形前後での最大誤差がスケールに対して約 3 %程度と小さいことから概ね良好な対応が取れていることが確認できた。

加えて、第 5 章で設定した製作物とシミュレーション結果を画像の重ね合わせによって比較したところ、フレームモデル、膜ありモデルのいずれにおいても、概ね実際の挙動が再現されている結果となった。

○実践におけるシミュレーションの有用性と架構の実現性

3 D モデリングシステムを実践的に応用し、$10m^2$ 程度の規模の茶室の設計を行った。パラメータを変えながら空間の形や構造のふるまいをリアルタイムに確認でき、評価基準を満たす最終成果物の設計に至った。実際に製作と建設によって、

実際に多様な形状に変形可能な構造体を問題なく迅速に実現することができ、そのフィージビリティが確認された。

○空間的な可能性

また、実際の利用においては、上部の開口が完全に開いた開放的な空間や、開口を閉じて小さく落ち着いた空間など複数の形状で点前が行われた。限られたスペースでも、開口の大きさと空間の包み方をダイナミックに変えることで複数の異なる雰囲気の空間を演出でき、人と環境をつなぐ新しい媒体としての構造体の可能性を提示するプロトタイプといえるのではないだろうか。

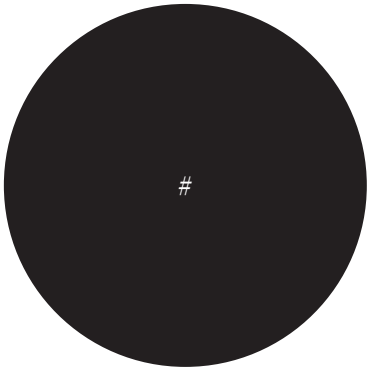
6.2.　課題と展望

膜の挙動を再現するシミュレーションでは、実際とやや異なる挙動を示すことが確認されたため、前述したように、複数の方向に引っ張られた時の膜の復元力について実験を通してその特徴を明らかにする必要があることに加え、メッシュのモデル化の改善の余地があると考えられる。

構法的な面では、フレーム同士のずれやねじれが生まれ、開閉動作においては一度閉じた状態から力を開放しても自力で開かないというような不具合が生じた。今回頂部のジョイント部材の開発や、より画期的な開閉機構など詳細部分における開発には至れなかったため、今後、実用化に向けて、詳細部も洗練させていく必要がある。

また今後、本架構の屋外利用や大規模な構造物への応用には様々な外力を加味した解析がなされる必要があり、今回開発した部分も発展させていきたい。

建築的な応用としては、全天候型のスタジアムなど既存の開閉式大屋根に代わる、低コストで軽量でありながら、時間によって変化する日射や天候などを考慮し、形状をコントロールできるスタジアムの大屋根への展開可能性や、被災地や途上国などにおける仮設的な集会所などの建築支援も考えられる。今後、実用化に向けて研究を進めていくことで、このような可能性を具象化していきたい。



参考文献

図版出典

謝辞

参考文献

[1]10+1 web site 201605, 第 5 回：せんだいメディアテークをめぐって
<http://10plus1.jp/monthly/2016/05/sasaki05-2.php>

[2]Lienhard J.,『Bending-Active Structures -Form-Finding Strategies using Elastic Deformation in Static and Kinematic Systems and the Structural Potentials Therein』, Stuttgart University, Doctoral Thesis, 2014

[3] トライブ - ログ 湿原に生まれた布〜マーシュアラブの失われた刺繍 2. 〜
<http://tribe-log.com/article/700.html>

[4]Evolution of German Shells, Boyner B., et al.,『Mannheim Multihale Strained Grid』, essay from CEE463 course, "A social and multi-dimensional exploration of structures" , Fall 2012.,
<http://shells.princeton.edu/Mann1.html>

[5]Fuller, R. B.『Ideas and Integrities A Spontaneous Autobiographical Disclosure』(1969)

[6]ICD Institute for Computational Design and Construction, ICD/ITKE Research Pavilion 2010
<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458>

[7]Vo Trong Nghia Architects, Bamboo Ceremony Dome in Son La
<http://votrongnghia.com/projects/bamboo-son-la-ceremony-dome/>

[8]ArchDaily, ZCB Bamboo Pavilion / The Chinese University of Hong Kong School of Architecture
<https://www.archdaily.com/800173/zcb-bamboo-pavilion-the-chinese-university-of-hong-kong-school-of-architecture>

[9]str.ucture, BENDING ACTIVE MEMBRANE ROOFING MARRAKECH ITKE UNIVERSITY OF STUTTGART2011
<http://www.str-ucture.com/en/what/research-and-development/reference/bending-active-membrane-roofing-marrakech-itke-university-of-stuttgart-2011/>

[10]Deleuran A. H., et al,『The Tower: Modelling, Analysis and Construction of Bending Active Tensile Membrane Hybrid Structures』,Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam, 2015

[11]ArchDaily, One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012 / soma
<https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma>

[12]ITKE, University Stuttgart, Lienhard J., et al,『flectofin®, A Hinge-less Flapping Mechanism Inspired by Nature』
<www.itke.uni-stuttgart.de/download.php?id=486>

[13]Schleicher S,『Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design, Transferring Bending and Folding Principles of Plant Leaves to Flexible Kinetic Structure』, ITKE, Stuttgart University, Doctoral Thesis, 2015

[14]ICD, HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion
<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>

[15]DOSU Bloom
<http://dosu-arch.com/bloom.html#>

[16]dezeen, Henning Larsen's university building has a facade that moves in response to changing heat and light
<https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/>

[17]e-architect, Al Bahar Towers, Abu Dhabi
<https://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi>

[18] 日本經濟新聞 , 豊田スタジアムの屋根、撤去も検討　修繕費の削減狙い , 2015/3/10 付
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO84128430Z00C15A3000000/>

[19] 津田勢太 ,『コンプライアントメカニズムを利用した建築構造の力学特性と最適化による生成手法』, 広島大学 , 博士論文 ,2013

[20]Ion A., et al.『Metamaterial Mechanisms』, In Proceedings of UIST'16. Full Paper. pp. 529-539

[21]Takahashi K., et al.,『Scale effect in bending-active plates and a novel concept for elastic kinetic roof systems』, IASS, 2016

[22]Knippers J., et al『KINETIC MEDIA FAÇADE CONSISTING OF GFRP LOUVERS』,CICE2012, 2012

[23] サクラ化学工業株式会社 ,FRP（繊維強化プラスチック）
<http://www.sakurakagaku.co.jp/?page_id=7>

[24] 石川県 ,『建築分野における炭素繊維複合材料の実用化に向けたロードマップの策定について』, 2017
<http://www.pref.ishikawa.lg.jp/syoko/tansoseni/kentiku.html>

[25] 日本經濟新聞『小松精練、耐震補強材料「カボコーマ・ストランドロッド」が国内標準（JIS）化に認定 』,2017/8/1
<https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP452990_R00C17A8000000/>

[26] 隈研吾建築都市設計事務所 HP『小松精練ファブリックラボラトリー　fa-bo 』
<http://kkaa.co.jp/works/architecture/komatsu-seiren-fabric-laboratory-fa-bo/>

[27]Brandt-Olsen, C.,『Calibrated Modelling of Form-active Structures』, Master thesis, The Technical University of Denmark, 2016

[28]Piker, D.,『Kangaroo2.0 Release notes』, 2015

[29]GitHub, CecilieBrandt/K2Engineering
<https://github.com/CecilieBrandt/K2Engineering>

[30]GitHub, Dan-Piker/K2Goals
<https://github.com/Dan-Piker/K2Goals>

[31]Müller M., et al『Position Based Dynamics』, 3rd Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS", 2006

[32] 北見翔 , 他『位置ベース力学に基づく布の折り目シミュレーション』, 映像情報 メ デ ィ ア 学会技術報告 ,2015

[33]Thomsen M. R.,『Hybrid Tower, Designing Soft Structures』,Modelling Behaviour: Design Modelling Symposium 2015, pp91-92, 2015

[34]GitHub, CecilieBrandt/K2Engineering
<https://github.com/CecilieBrandt/K2Engineering/blob/master/K2Engineering/K2Engineering/Load.cs>

[35]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/Direction.cs
<https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/Direction.cs>

[36]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/Spring.cs
<https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/Spring.cs>

[37]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/CoPlanar.cs
<https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/CoPlanar.cs>

[38]GitHub, Dan-Piker/K2Goals/FloorPlane.cs
<https://github.com/Dan-Piker/K2Goals/blob/master/FloorPlane.cs>

図版出典

○第 1 章
fig.1.1.1:Zaha Hadid Architects
<http://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>
fig.1.1.2,3:10+1 web site 201605, 第 5 回：せんだいメディアテークをめぐって
<http://10plus1.jp/monthly/2016/05/sasaki05-2.php>
fig.1.1.4:Atlas Obscura, Mudhif Houses, Giant reed houses made in the marshes of Southern Iraq.
<https://www.atlasobscura.com/places/mudhif-houses>
fig.1.1.5:38<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/arch528/fall2001/lecture2/marsh-arabs-construction.jpeg>
fig.1.2.1:ArchDaily, Frei Otto Posthumously Named 2015 Pritzker Laureate
<https://www.archdaily.com/607935/frei-otto-named-2015-pritzker-laureate/54ff6aa9e58ece91ea00015c-roof-for-the-multiha>
fig.1.2.2: SMD arquitectes, Case Study: Mannheim Multihalle
<http://www.smdarq.net/blog/case-study-mannheim-multihalle/>
fig.1.2.3: Fuller, R. B.『Ideas and Integrities A Spontaneous Autobiographical Disclosure』(1969)
fig.1.2.4:ICD Institute for Computational Design and Construction, ICD/ITKE Research Pavilion 2010
<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458>
fig.1.2.5:Domus, Mountains through mountains. Five bamboo and straw domes by Vo Trong Nghia
<https://www.domusweb.it/en/architecture/2017/11/13/five-bamboo-domes-by-vo-trong-nghia.html>
fig.1.2.6:ArchDaily, ZCB Bamboo Pavilion / The Chinese University of Hong Kong School of Architecture
<https://www.archdaily.com/800173/zcb-bamboo-pavilion-the-chinese-university-of-hong-kong-school-of-architecture>
fig.1.2.7:str.ucture, BENDING ACTIVE MEMBRANE ROOFING MARRAKECH ITKE UNIVERSITY OF STUTTGART, 2011
<http://www.str-ucture.com/en/what/research-and-development/reference/bending-active-membrane-roofing-marrakech-itke-university-of-stuttgart-2011/>
fig.1.2.8-9:ArchDaily, Hybrid Tower / CITA - The Royal Danish Academy of Fine Arts,
<https://www.archdaily.com/805969/hybrid-tower-cita-the-royal-danish-academy-of-fine-arts>
fig.1.2.10-11: 島田潤撮影
fig.1.2.12:ArchDaily, One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012 / soma
<https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma>
fig.1.2.13:str.ucture, FLECTOFIN®
<http://www.str-ucture.com/en/what/research-and-development/reference/flectofinR/>
fig.1.2.14:ICD, HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion
<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>
fig.1.2.15:DOSU, Bloom
<http://dosu-arch.com/bloom.html#>
○第 2 章
fig.2.1.1:dezeen, Henning Larsen's university building has a facade that moves in response to changing heat and light
<https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/>
fig.2.1.2:e-architect, Al Bahar Towers, Abu Dhabi
<https://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi>
fig.2.1.4:Ion A., et al.『Metamaterial Mechanisms』, In Proceedings of UIST'16. Full Paper. pp. 529-539
fig.2.1.5:Knippers J., et al『KINETIC MEDIA FAÇADE CONSISTING OF GFRP LOUVERS』,CICE2012, 2012
fig.2.2.2: 参考文献 [2],pp34 より
fig.2.2.3:ArchDaily, The Serpentine Sackler Gallery / Zaha Hadid Architects
<https://www.archdaily.com/433507/the-serpentine-sackler-gallery-zaha-hadid-architects>
fig.2.2.4: 隈研吾建築都市設計事務所 , 小松精練ファブリックラボラトリー fa-bo
<http://kkaa.co.jp/works/architecture/komatsu-seiren-fabric-laboratory-fa-bo/>
fig.2.2.5: 参考文献 [24] より
他全ての図表 : 筆者作成・撮影
○第 3 章
fig.3.2.3: 参考文献 [27 をもとに筆者が再製作]
他全ての図表 : 筆者作成・撮影
○第 4 章
全ての図表 : 筆者作成・撮影
○第 5 章
fig.5.1.13-14: 谷口景一朗作成
table.5.1.1: 谷口景一朗作成、筆者編集
fig.5.3.6-25,27-35: 植田絵里菜撮影
他全ての図表 : 筆者作成・撮影
○第 6 章
図表なし

謝辞

本研究を執筆するにあたり、多くの皆様のご助力・ご助言をいただきました。

指導教員である佐藤淳准教授には、論文の方針や指導に関してはもちろんのこと、意匠系研究室から興味と勢いで飛び込んできた私に対して丁寧に対応していただきました。本研究においても、研究室の主軸の研究とは異なる、設計ベースの研究室としてはイレギュラー論文であるにも関わらず熱心なアドバイスと制作における多大な協力を受けました。

副指導教員である岡部明子教授には、意匠設計の視点から本構造の可能性を表現するための方針について数回ではありましたが貴重なご意見をいただけたことを心より感謝申し上げます。

また、松村秀一教授、清家剛准教授、藤田香織准教授および権藤智之准教授には、構法系研究室会議において、論文の方向性について的確なご意見・ご指摘を受けた論文の道筋を明確化させていくことができました。感謝申し上げます。

また佐藤淳構造設計事務所の荒木美香さん、研究室のスタッフである古市渉平さん、都築碧さんには、論文の方針や技術的な援助などたびたび相談に乗っていただき、学術的な知見を得ることができました。

谷口景一朗特任助教（建築構成材デザイン工学寄付講座）には、他研究で忙しい合間を縫ってCFDについて丁寧に説明していただき、解析をサポートしていただいきました。

研究室のスタッフであるYing Xuさん、後輩の、張嘉耕くん、朝原真知子さん、河村京介くん、大霜潤也くん、高岡俊一郎くん、藤本月穂さん、宮本健太くん、張含露さん、堤千春さん、西村裕哉くん、そして、ドイツからの留学生Laura di Stefanoさんには、それぞれ授業や卒論、実験などで多忙な時期に茶室の制作を協力していただきました。皆さんのご協力がなければ、プロジェクトとして成立しませんでした。本当にありがとうございました。

銀茶会実行委員の藤木様、高瀬様には、茶室設営時にご丁寧な対応をしていただき、スムースに設営を終えることができたと思います。

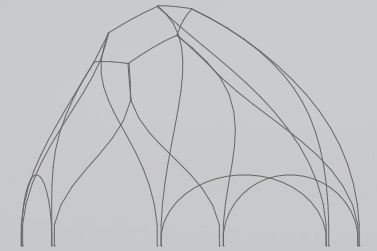
友人の植田絵里菜さんには、制作物を本格的に撮影していただき、大変質の高い記録をとることができました。

Weaving Architectureチームのみなさん（隈太一さん、島田潤さん、蒔苗寒太郎さん、石井孝典さん、滝口雅之さん、有川愛沙さん、LiijaLiさん、西里正敏くん）と共同して当時の私としては全く新しいファブリケーションのプロジェクトに関与でき、繊維質の材料に対する知見と制作に関するの一連の経験を得ることができたことが、研究の発端になっています。

私が留学中に卒業された同期友人たち、留学中のルームメイト・プロジェクトチーム・出会った人々、留学後に仲良くしてくれた隈研の後輩には、様々な議論を通して、大学院での日々の生活を充実させてくれました。すべてのことがこの研究につながっていると実感しています。

皆様に深く謝意を表します。

2018年1月22日
澁谷達典



MASTER THESIS 2017-18

SUBMITION 22. JAN. 2018