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

学籍番号　47-146747
氏　　名　澁谷　達典（Shibuya, Tatsunori）
指導教員　佐藤　淳　准教授

1.　序－背景と目的

計算機の発達により建築表現も拡大し、複雑な形状の設計が可能になってきた。曲面建築はその代表的な例であるが、その成形法の一つに、材料のしなやかさを積極的に利用し、部材を弾性範囲内で大きく曲げて組み合わせることで立体成形する手法がある。部材を小径にして大変形を利用する構造で軽量化ができるため、型枠のような一時的な資材や建設期間などを削減できる優位性がある。また部材の変形動作を応用し、環境に対してアダプティブな構造として扱うことも可能で、部材がしなやかさを持つからこそ可能な新しい建築表現が期待でき、高強度な材料の開発が進んだ現代において有効な手法であると考えられる。

本構法による静的な建築事例は多く見られるが、その特性を可変形態へ応用した事例は建物の外装の局所的な開閉動作への応用にとどまり、建物全体が複数の形状に変形可能な提案は極めて少ない。そこで本研究は部材の曲げ変形を利用した可変形態の基礎研究として基本構成例の提案、シミュレーション手法の構築と精度の検証、実施設計への実践的応用と有用性の検証を行う。

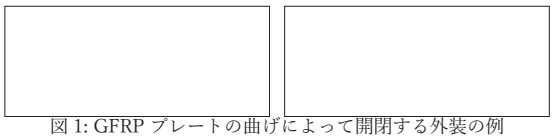

図 1: GFRP プレートの曲げによって開閉する外装の例

2.　基本構成の提案

一般的な可動機構は、ヒンジ部の回転動作により与えられるものが多く、物体を大きく変形させる場合に有効であるが、限られた方向にしか変形を許さない。他方、弾性体の変形を利用したコンプライアントメカニズム（以下 CM）という可動機構の場合、その変形性能は材料特性に大きく依存するが多方向に変形できるポテンシャルを持つ。

そこで CM を構造部材に適用し、回転動作と組み合わせることで多様かつダイナミックに変形可能な形態を考え、以下の基本構成を提案する。①しなやかなフレームの両端部を束ね、②環状に配置。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。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（図 2）。以上を構造の基本的な構成とし、さらに空間を覆うために膜との複合構造を提案する。

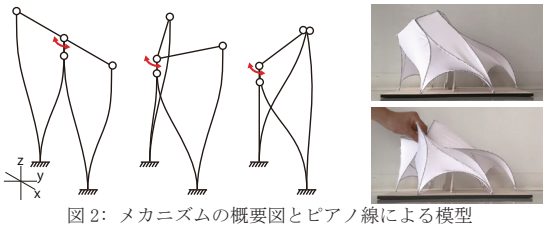

図 2: メカニズムの概要図とピアノ線による模型

3.　シミュレーション

3.1.　概要

部材の挙動を追い、設計するため位置ベースの物理シミュレーションツールである Kangaroo2（以下 K2）を用いたモデリング手法を構築する。K2 では解析対象の各節点に対して動作の制約 G とその強さ w を与え、それらの条件に従って節点位置 $P_{i,cur}$ とその他の節点位置の関係を評価し新しい位置を $P_{i,new}$ に更新する[式 (1), 文献 [2]]。このステップ繰

り返し、全節点の移動距離の二乗誤差が十分小さくなると、収束し終了する。

3.2. モデル化と形状決定

図 4 に本提案でのモデル化の流れを示す。

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

以下各ステップについて解説を加える。

フレームのモデル化　曲げ変形の対象となるフレームのモデルは、平面上に環状配置し、任意数に分割したモデルから形状決定プロセスを開始する。各線分の両端点の距離および隣り合う線分間の角度に拘束を与えるため、部材の断面情報と弾性率をもとに軸剛性・曲げ剛性、また線分間の初期角度を与える。部材脚部の支持位置と支持角度を設定する。部材間の連結部および部材脚部と対応する支持点にケーブルを配置し、目標長さを 0 に設定し、フレームに強制変位を与えると、形状が決定する。

膜材のモデル化　フレームモデルを生成した後にグリッドメッシュを生成し、各方向の各線分に対して目標縮小率を設定し弾性率・断面積・入力時の線分長さをもとに張力を与える。膜の有効幅はメッシュの分割ピッチの 1/2 とした。

可変形態の操作　開口部に設けたケーブルを縮め、形状変形する。そのときフレーム頂部にねじれが発生するため、その抵抗 (Cp) を再現する設定を加えた。ただし、その強さ (Cp. str) の適切な値が現状不明であるため次章で確認する。

4. 検証

4.1. 概要と対象

対象とするモデルを図 6 に示す。構造材に GFRP、膜材に 2 方向伸縮生地を用い、高さ 0.9m, スパン 0.8m の 4 フレームからなる小模型を製作し、形状変形前後の形状「typeX」「typeY」のそれぞれついて膜なし / 膜ありの計 4 状態において解析との対応を確認し、フレーム頂部のねじれ抵抗の強さ Cp. str を定める。

4.2. 部材および試験体の製作

GFRP 製作　ガラス繊維を固定枠に配置し、繊維が透明になるまで樹脂を全体に浸透させる。次に繊維を 70-100 回程絞り、余分な樹脂を除去する。空気中で硬化させ、研磨とコーティングを施す。コーティング剤には樹脂にパラフィンを混ぜたものを用いた。

図 3:GFRP 製作工程 (左:繊維の配置 , 中:樹脂の塗布 , 右:仕上げ)

材料特性　製作した GFRP の性能を簡易的に 3 点曲げ試験で検証した。実験結果の平均から弾性率 21.9GPa、降伏曲げ応力度 229MPa、比重 1.9 を解析に採用する。

試験体　製作した 4 フレームともに短辺 250mm、長辺 1000mm、屈折角度 132°、直径 4mm である。部材径については 0.5mm 前後のばらつきが見られたが解析には無視する。

膜の製作と性能　伸縮させる前の 3D メッシュを平面展開し、長手方向に 70%, 短手方向に 80% 縮小した形状を生地から切り出す。

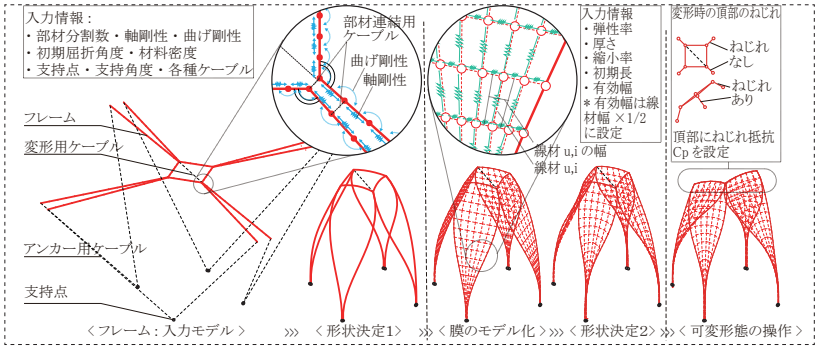

図 4：シミュレーションの設定と流れ

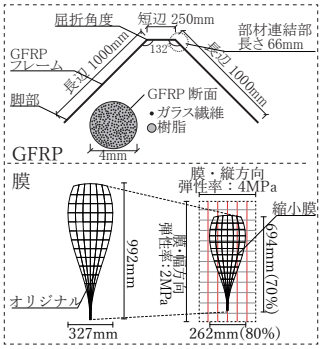

図 5 ：制作部材 (GFRP・膜)

生地の幅方向を膜の長手方向とした（弾性率は縦方向 4MPa、幅方向 2MPa、厚さ 0.5mm）。

4.3. 実測方法と検証方法

フレーム上に記した実測点の座標を計測する。実測点は各部材の短辺中央、長辺 200mm 毎、および部材連結部両端の 44 箇所（typeY では 42 箇所）とした。実測した座標から 3 次スプライン補間により小模型のフレーム形状を近似的に再現し、3 章で示した方法で行ったシミュレーション結果と比較する。比較方法は、実測結果と解析結果における各フレームの短辺と長辺をさらに細かく分割し、2 線上の対応し合う分割点間の距離を誤差として計測する。各辺における最大誤差を抽出し、その平均、標準偏差、最大値を評価し精度を確認する。なお長辺は 50 分割、短辺は 10 分割とした。

4.4. 検証結果

検証結果を図 6 に示す。「typeX 膜なし」では誤差の辺毎の最大値の平均が 15.5mm と小さくばらつきも 1.5mm と微差であり曲げのみが発生する場合は再現性が高い。次に、Cp.str を 500 とし、「typeY 膜なし」を検証したところ最大誤差が小さくなり、フレーム頂部のねじれも再現されていると言える。同じ抵抗値を膜ありの検証に適用し検証したが、typeX、Y 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っ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が考えられるが、小模型の全体のスケールに対して最大 3% 程度の誤差であるため概ね再現できたといえる。

5. 実践

5.1. 設計

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。最終的成果物を図 8 に示す。約 10m^2（スパン 3.6m）を覆う空間を長さの異なる 6 フレームにより構成される形状を設定した。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。なお部材の曲げ応力度は曲率と弾性率・断面情報から求まる。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、長手に 92%、短手に 85% の伸縮率を与え、代表的な 4 タイプの形状を確認し、基準を満たすことが確認された。

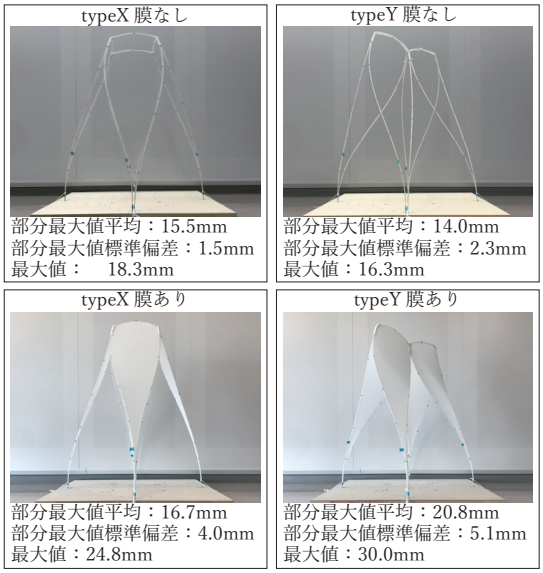

図 6：検証対象 4 状態の様子 / 実測とシミュレーションの差異

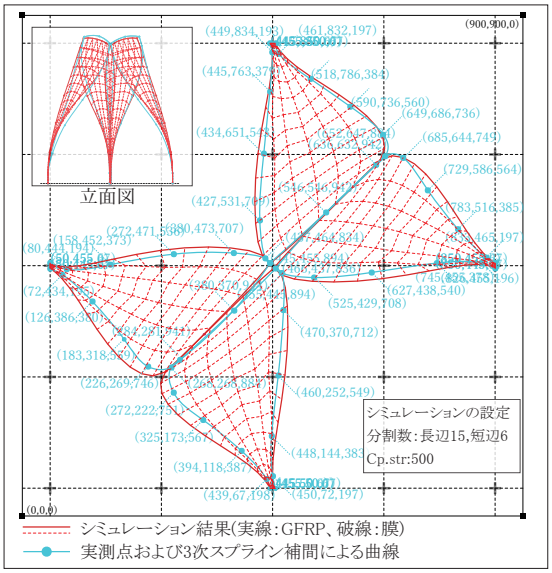

図 7：実測とシミュレーションの比較例（typeY 膜あり）

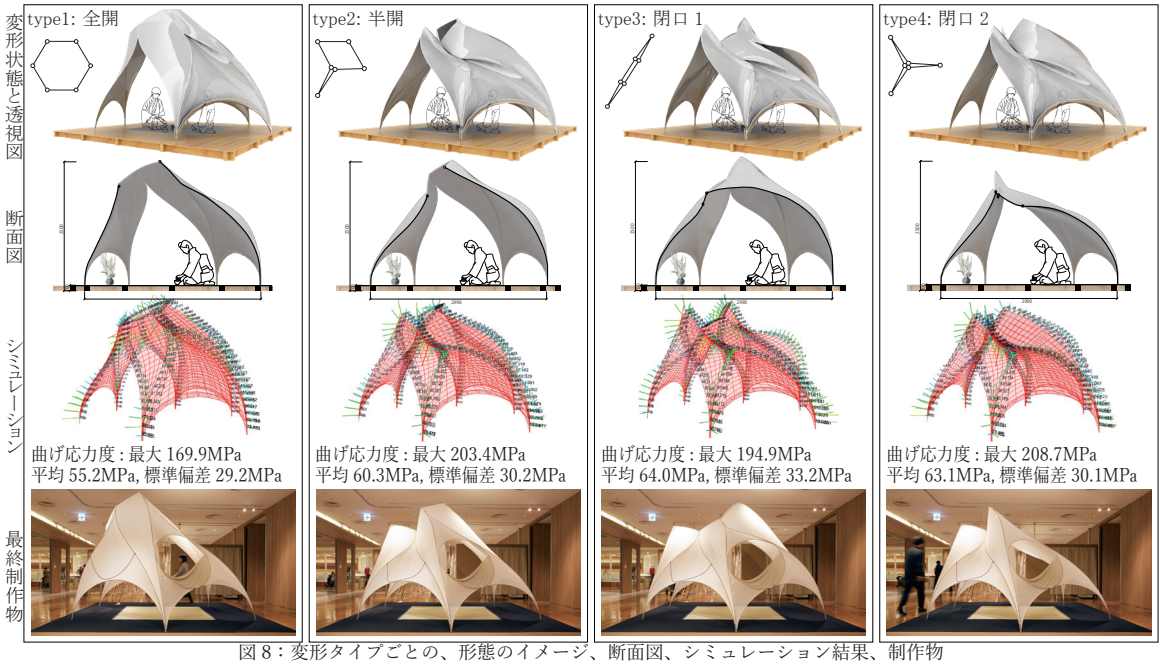

図 8：変形タイプごとの、形態のイメージ、断面図、シミュレーション結果、制作物

5.2. 製作と検証

製作は、プレファブリケーション（GFRP・膜・ジョイント部材の制作とユニット化）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、問題なく完成に至った。図 9 に示すように制作した架構とシミュレーション結果を重ね合わせると、概ね一致している様子がわかる。しかし、解析結果が一部、制作物よりも膨らみのある挙動を示した。

5.3. 空間利用

本制作物は、銀座三越にて展示され、茶人たちによる点前が行われた[図 8],[図 10]。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た。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。

6. 総括

本論文では、CM と回転動作を取り入れることで複数の形状に可変な架構の構成方法を提案した。また 3D モデリングシステムを構築し、模型との比較検証においては膜のない状態のモデルと膜を追加したモデルのいずれの場合においてもシミュレーションでねじれの拘束を与えることで近い結果を得られた。また、実施物との画像比較[図 9]でも、シミュレーションとの概ね良い一致が見られたが部分的に膨らみ具合の誤差が目立つ部分もあり、膜のモデル化の設定法に改善の余地があると考えられる。最後に実践的に本システムを利用し、小規模の構築物の設計・製作・空間利用を通して、その有用性と本架構の可能性を提示した。今後、大スパンの構造体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る。

主要参考文献
[1]Lienhard. J, Bending-Active Structures -Form-Finding Strategies using Elastic Deformation in Static and Kinematic Systems and the Structural Potentials Therein, Doctoral Thesis Stuttgart University(2014)
[2]Brandt-Olsen, C. Calibrated Modelling of Form-active Structures. Master thesis, DTU(2016)

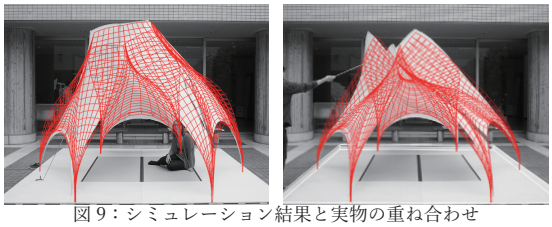
図 9：シミュレーション結果と実物の重ね合わせ

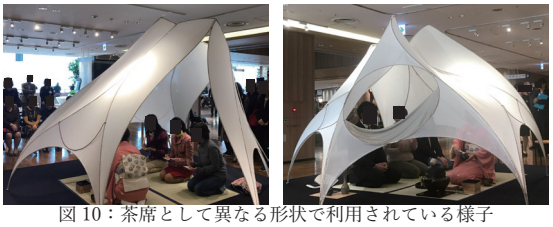
図 10：茶席として異なる形状で利用されている様子