

回転型アクチュエータ付き環状積層ヒンジ接合骨組による 建築規模の展開構造の革新

Innovation of architectural-scale deployable structures using multi-layer revolute linkage with rotary actuators

和多田 遼（Watada Ryo）

1. はじめに

展開構造は、部材にひずみを生じずに大きな変位を生み出す機構であり、工学分野では昇降機から宇宙構造物まで幅広く利用されている。建築分野においても、開閉屋根や仮設構造など、大きな変形の伴う建築構造への応用が期待されている。著者の提案する、傾斜したヒンジ軸で環状につないだヒンジ接合骨組（図 1）を積層し構成される環状積層ヒンジ接合骨組（図 2）は、従来の類似の展開構造よりも軽量で、故障リスクが少なく、運搬性や収納性に優れる。著者はこれまでに、ヒンジ接合骨組が展開構造として利用可能なための幾何学的な条件を明らかにしてきた。また、 $2N$ 本（ N は 2 以上の自然数）の長さの等しい直線部材と $2N$ 個の傾斜したヒンジ軸を用いて、正 $2N$ 角形の形状から、全ての部材が一本の棒状に折り畳まれる展開過程を持つ骨組（正 $2N$ 角形骨組）を生成可能なことを示し、これを積層して、建築としての利用が期待できる図 2 のような自由度 1 のメカニズムを持つ展開構造である環状積層ヒンジ接合骨組を示した¹⁾。

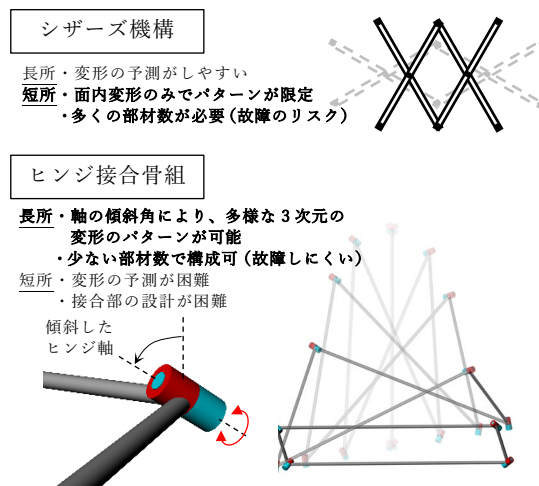


図 1 ヒンジ接合骨組の特徴

以上のとおり、広い応用が期待できるヒンジ接合骨組であるが、 $N \geq 4$ の場合、ヒンジ数が増えると変形パターンが増えてしまうという課題がある（図 3）。人が人力のみで容易に展開収納可能な構造とするには、収納時から展開時まで常に 1 パターンにしか変形しない（自由度が 1 の）構造であることが望まれる。ヒンジ接合骨組では、この条件を考慮する限り、 N は 3 以下に限られ、採用できるヒンジの数は制限される。

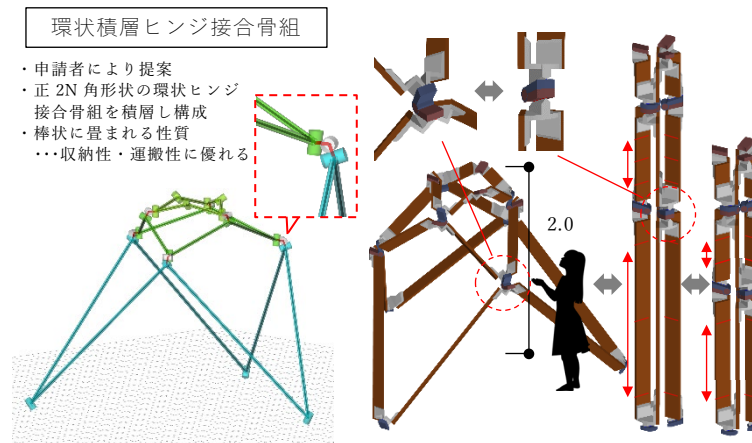


図 2 環状積層ヒンジ接合骨組(N=3)

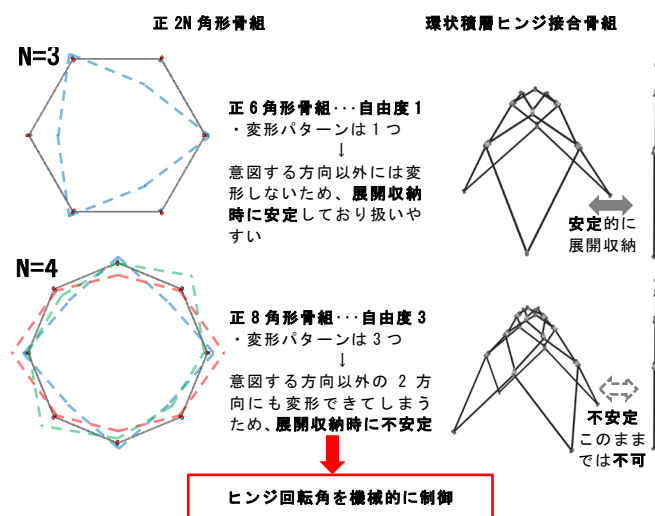


図 3 ヒンジ接合骨組の自由度と展開収納時の安定性

本研究では、従来のヒンジ接合骨組の持つ前述の課題を解決すべく、図 4 に示すように、複数のヒンジ部分に回転型アクチュエータを組み込み同時に制御するシステムを構築し、ヒンジ接合骨組の建築構造での応用と普及の可能性を広げることを目的とする。代表的な回転型アクチュエータであるサーボモーターは、コンピュータからの指示の通りに位置・速度・回転力などを複数同時に正確に制御可能である。これをヒンジ接合骨組と組み合わせ、自由度が 2 以上のヒンジ接合骨組について、ヒンジ部分に回転型アクチュエータを設置し、同時制御する汎用的な手法を構築する。これにより、従来は実現出来ていなかった、自由度が 2 以上となる $N \geq 4$ の正 2N 角形骨組や環状積層ヒンジ接合骨組の変形パターンを制御し、これらの骨組の設計自由度を広げることを目指す。

2. 研究の方法

本研究では、自由度が 2 を超えるヒンジ接合骨組のヒンジ接合部に回転型アクチュエータを設け、骨組全体の変形を機械的に制御するシステムを構築し、まず卓上サイズの正 2N 角形骨組（ただし $N \geq 4$ ）の模型を作成し、手法の検証を行う。その後、特に建

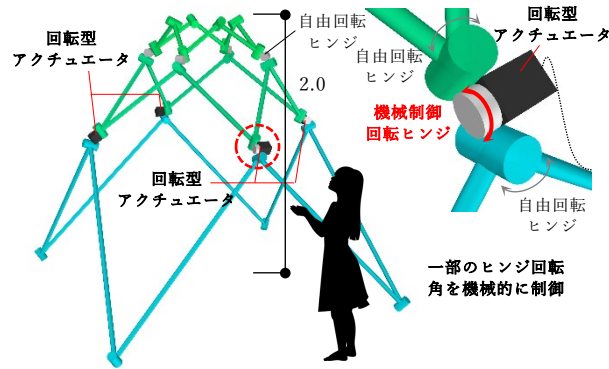


図 4 回転型アクチュエータを導入した環状積層ヒンジ接合骨組

築構造としての応用が期待できる、図 4 に示す実大規模の回転型アクチュエータ付き環状積層ヒンジ接合骨組を実際に製作し、本手法の建築としての有用性を示す。

3. 研究の進捗と今後の課題

3-1. 研究の進捗

現在までに、卓上サイズの正 $2N$ 角形骨組の模型の試作と、実大規模の環状積層ヒンジ接合骨組のディテールの設計、回転型アクチュエータの制御プログラムの構築までを完了している。

作成した正 $2N$ 角形骨組（ここでは $N=4$ ）の卓上模型の写真を図 5 に示す。接合部は 3D プリンタを用いて製作した。図 3 で示されたとおり、 $N=4$ の正 $2N$ 角形骨組は自由度が複数存在し変形のパターンは一通りに定まらないことを、本模型からも確認した

（図 5 左下）。また、各接合部のヒンジの回転角度を適切に制御すれば、図 5 右上のように束状に折り畳むことができることを、同様に本模型から確認した。現在は、図 5 の模型の一部のヒンジ接合部をサーボモーターに置換可能にするため、ディテールの改良を行っている。複数のヒンジの回転角をサーボモーターで電子制御することで、 N が 4 以上の正 $2N$ 角形骨組の展開・収納時の変形も安定して制御が可能であると思われる。

また並行して、次のステップである建築実大規模の回転型アクチュエータ付き環状積層ヒンジ接合骨組の製作のための接合部ディテールの試設計と使用可能な回転型アクチュエータの検討、動作プログラムの作成を行った。設計した接合部のディテールを図 6 に示す。このディテールは、1 か所に 3 個のヒンジ軸が集まる本接合部において、いずれのヒンジ軸にも外部から回転型アクチュエータの取り付けが可能のように配慮した。また、製作検討に用いている回転型アクチュエータ（Buildit Actuator）を図 7 左に、複数の回転型アクチュエータの制御のために作成した Python コードの一部を図 7 右に示す。これらのアクチュエータと制御コードを用いることで、あらかじめ数値解析により求めた環状積層ヒンジ接合骨組の各ヒンジの時系列角度データに沿って、環状積層ヒンジ接合骨組の展開・収納過程のヒンジの回転角を制御することが可能であることが確認された。

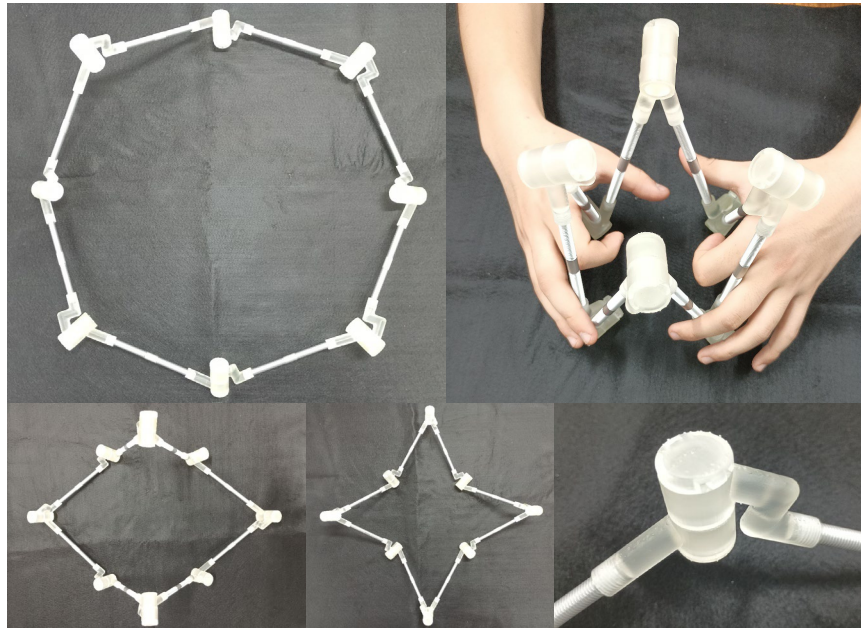


図 5 自由度が 2 以上の正 $2N$ 角形骨組の卓上サイズ模型 ($N=4$)

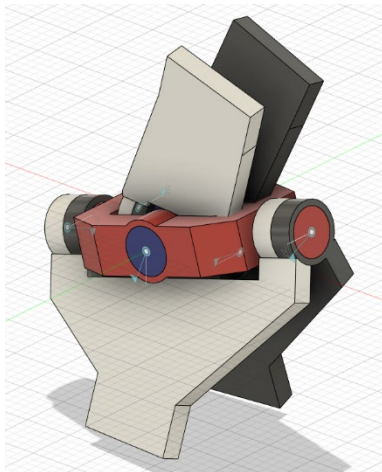


図 6 試設計したディテール

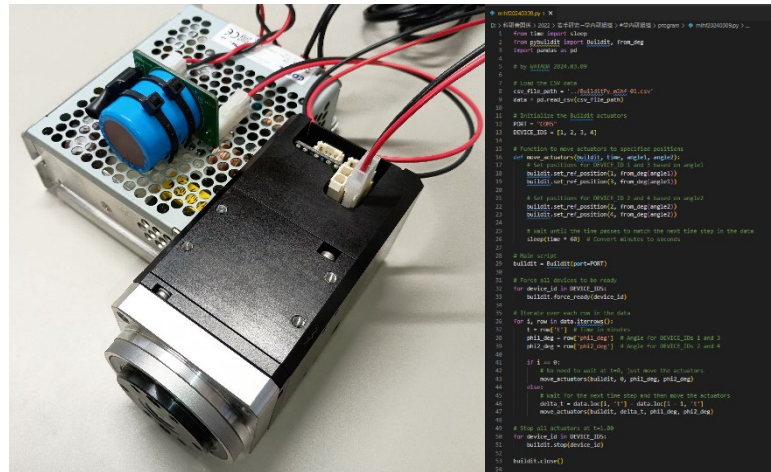


図 7 構築したアクチュエータ制御システム

3-2. 今後の課題

今後は、これまでの検討により得られた知見を用いて、実大規模の回転型アクチュエータ付き環状積層ヒンジ接合骨組の設計・製作に取り組む。まずは、図 5 の卓上サイズの正 $2N$ 角形骨組の模型を用いて、ヒンジ角度の同時制御時の動作を確認し、その後、試設計した図 6 のディテールに、図 7 のアクチュエータ制御システムを組み込む改良を行い、3D プリンタを用いて製作を行う予定である。

参考文献

- 1) Watada, R. and Ohsaki, M., N-gonal multilayer symmetric revolute linkage deployed from bundle to surface of revolution. ASME. Journal of Mechanical Design, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4062945>, 2023.