

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：19K15208

研究課題名（和文）立体ねじり折り展開宇宙構造物の構造概念の解明と立体モジュラー構造の構築方法の探求

研究課題名（英文）Clarification of Structural Concepts for Three-Dimensionally Twisted Origami Deployable Space Structures and Exploration of Methods for Constructing Three-Dimensional Modular Structures

研究代表者

有田 祥子（ARITA, Shoko）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：50800629

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：立体ねじり折りという折紙に基づく展開構造物の宇宙利用を可能とするために、その基礎構造と宇宙機への応用について研究した。結果として、立方体型のねじり折り構造を用いた解析と実験により、構造的特徴と変形メカニズム、展開時の変形のコントロールパラメータを明らかにし、モジュラー構造の構造モデルを提案した。更にモジュラー構造については、磁気セイルに用いた場合の、構築および剛性における成り立ちを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙大型構造物の構築と維持において革新的な手法であるモジュラー構造物への適用や、近年急増しているキューブサットへの搭載が容易な、立方体形状のねじり折り構造物の設計例を、宇宙ミッションとともに示したことに学術的意義がある。また、数学や工学の分野を含めた先行研究の中でも、展開中の変形について構造的特徴を明らかにしたことに学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to enable the space utilization of deployable structures based on three-dimensional twisted origami, research on their fundamental structure and application to spacecraft was conducted. As a result, through analysis and experiments using cube-shaped twisted origami structures, the structural characteristics, deformation mechanisms, and control parameters during deployment were clarified. Additionally, we proposed a structural model for modular structures. Regarding the modular structures, we demonstrated their feasibility in terms of construction and rigidity when applied to magnetic sails.

研究分野：宇宙機構造物

キーワード：宇宙機 展開構造物 3次元展開構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者・有田は、柔軟多体動力学による構造の座屈解析の研究を行ってきた。この研究から、大変形する展開構造物の変形の制御に着目し、膜のような非常に柔軟な構造よりもやや剛な板バネ材による、より高剛性で変形モード推定の容易な構造物に着目した。このような柔軟性と剛性を併せ持つ部材によって構築する対象とした構造物は、比剛性と収納効率の高さに優れた立体的な展開構造物である。中でも、モジュラー構造の構築やキューブサットへの搭載が容易な、立方体形状のねじり折り(図1)を採用した。特に、モジュラー構造については、国内の宇宙機構造物の研究者らとの議論の中で、将来技術として日本が現在培うべき技術項目の一つとしても挙げられ、本研究で取り組むに至ったものである。有田は、この3次元展開様式を採求・発展させるべく立体ねじり折りを研究対象とし、大型構造物を構築するための技術確立を推し進めることを目指すに至った。

板バネを用いた立体ねじり折りは、構造安定性と座屈の研究において折紙工学から着想を得たもので、有田らは、設計・開発および自律展開機構の開発・組み込みといった基礎開発を行ってきた(図2)。立体ねじり折りは多角柱を容易に展開・無載荷支持できる様式であるが、宇宙構造物として実現するためには展開の変形ダイナミクスを明らかにすることが求められる。しかし、宇宙利用の研究例は無く、展開の変形ダイナミクスを詳細に調査した研究は無い。このような背景から、研究代表者は、以下の2つの学術的問いの採求に取り組むこととした。

【問い1】展開の構造概念、変形メカニズムはどのようなものか？また、その変形や応力は制御可能か？

【問い2】立体ねじり折りを組み合わせた立体モジュラー構造はいかにして構築可能か？

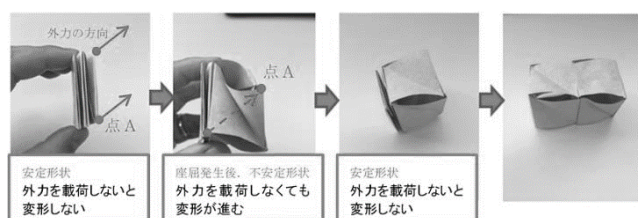


図1 立方体のねじり折り紙

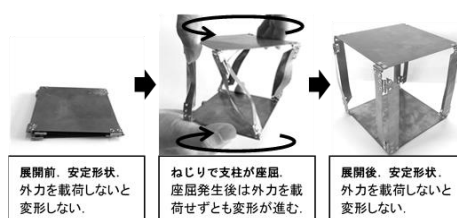


図2 立方体展開構造物

2. 研究の目的

前項に示した2つの「問い」に答えるために、解析・実験を通して、下記の3つの内容を達成することを目的とした。

【内容1】宇宙機構造物としての立体ねじり折りの構造概念および特徴(例えば、地上構造物と異なり、応力集中や面の大変形を積極的に活用するなど)、それに伴う変形メカニズムを明らかにすること。

【内容2】立体ねじり折りの展開の変形のコントロールパラメータを明らかにすること。

【内容3】3次元モジュラー構造の構造モデルを示すこと。

3. 研究の方法

前項に示した3つの内容を、それぞれ下記の方法で実施した。

(1) 構造概念・特徴・変形メカニズムの解明

- ① 剛性、柔軟部材の変形モード、応力集中箇所を調べ、構造概念と特徴を明らかにする。
- ② 変形メカニズムとは：実際に座屈が発生することで状態遷移しているのかどうか、どのような座屈モードで変形するのかを明らかにする。

上記①②を、構造解析、座屈解析、展開力計測、画像計測の実施と結果の比較により行う。

(2) 展開のコントロールパラメータの解明

(1)の結果を用いながら、寸法・形状の条件を変えた数値実験を行い、変形モードに影響を与えるパラメータを明らかにする。

(3) 3次元モジュラー構造の構造モデルの提案

3次元モジュラー構造の結合ルールの数理モデルの定式化を行い、宇宙機への適用例を提案する。

4. 研究成果

(1) 構造概念・特徴・変形メカニズムの解明

図3のように構成される基礎構造に対し、振動試験、および汎用構造解析ソフトによる固有値解析により、展開の変形モードが得られた(図4)。一方、座屈解析を実施した結果、汎用ソフトによる固有値解析の展開の変形モードと同様の座屈モードが発生し、そのうち2つの座屈モー

ドの発現可能性が高いことが分かった (図 5)。実際の展開でもこの2つのモードが見られ、**構造解析・座屈解析・実験で共通する変形モードが明らかになった**。そこで、図 6 に示すように、画像計測を行い、座屈の分岐が展開の非対称性によって引き起こされることを示し、非対称性の原因箇所を特定した。更に構造解析では、応力分布から曲げ・ねじりの変形を分類し、展開の際に荷重を持つ箇所・運動自由度が高い箇所を分析することで、**構造概念と、次項の制御パラメータの解明に繋がる構造の特徴を整理した**。

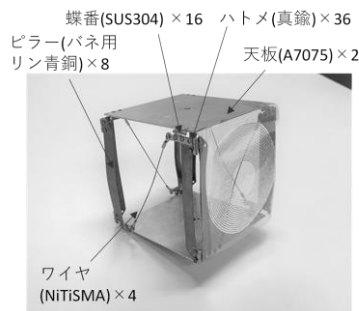


図 3 立体ねじり折りの基礎構造

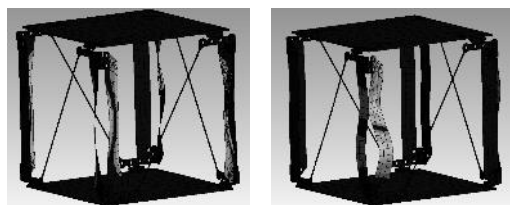


図 4 固有値解析で得られたピラーの開閉運動を伴うモード

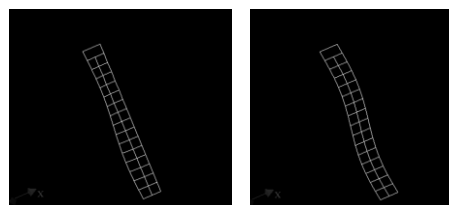


図 5 座屈解析で得られたピラー展開時の2つの座屈モード

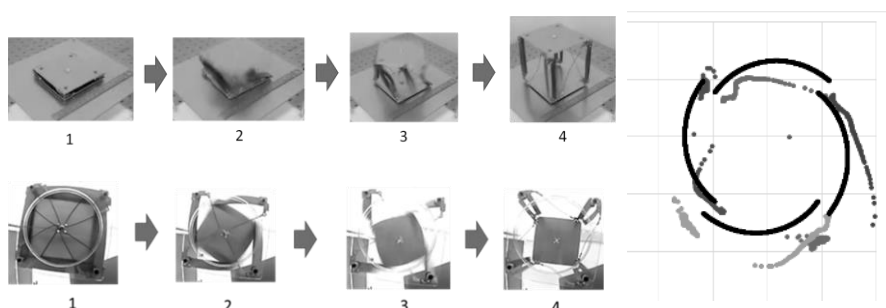


図 6 天板の四隅のマーカータラッキングによる展開の非対称性の確認

(2) 展開のコントロールパラメータの解明

(1)の構造物の展開時の応力集中箇所がヒンジの接続部分であることと、座屈変形を誘発する変位方向および非対称展開の誘発が、展開力を与えるワイヤーであることを特定した。そこで、画像計測 (図 7) によって得られたワイヤーの歪エネルギーからワイヤーの曲げ・ねじりの変形量を計算によって推定し、数値実験を行うことで、**座屈のコントロールパラメータが、ワイヤーの収納時の最小R部と、取り付けのアライメント誤差に依存することを明らかにした (図 8)**。

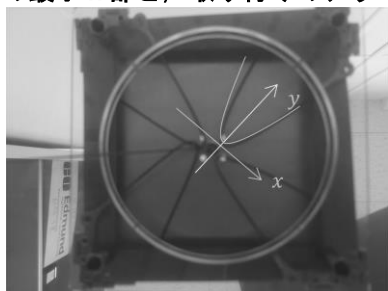


図 7 ワイヤーの変形の画像解析実験

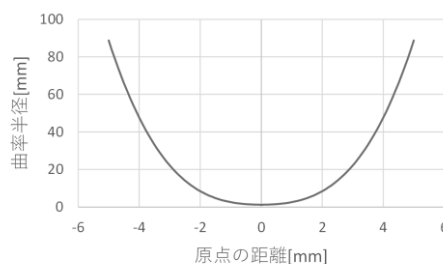


図 8 ワイヤーの曲率半径と位置

(3) 3次元モジュラー構造の構造モデルの提案

2次元モジュラー構造の構築ルールに基づき、**3次元数値モデルの構築を行い、磁気セルの構造例として3次元モジュラー構造の提案 (図 9) と、その解析的剛性評価による構造物の成立性を示した**。そして、複数を繋ぎ合わせた全長 10m のモジュラー構造モデルを作成し (図 10)、剛性を実験的に評価するとともに、長大構造物構築時のねじれパターンを見出した。捩れは、収納・展開時のねじれ方向に自由度を持つことに起因し、ヒンジを有するモデルではヒンジの公差、折紙のような一体膜模型においては膜の折り目の剛性によって引き起こされることが明らかになった。

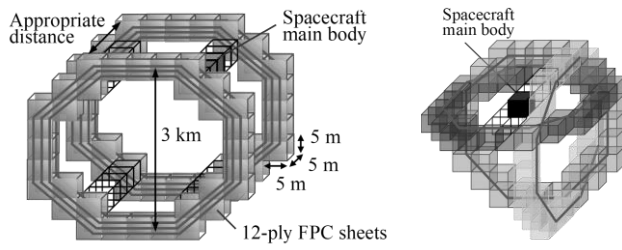


図9 3次元モジュラー構造による
磁気セイルの構造提案

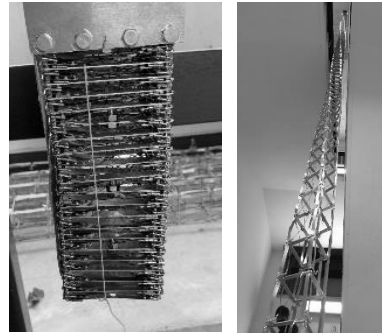


図10 10m モジュラー構造の展開実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoko Arita and Yoshiki Yamagiwa	4. 巻 60
2. 論文標題 Three-Dimensional Magnetohydrodynamics Analysis of a Magnetic Sail Using a Deployable Modular Structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 68-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.A35374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shoko Arita, and Yoshiki Yamagiwa	4. 巻 -
2. 論文標題 Relationship between Magnetic Field Interference and Electromagnetic Drag in Multi-coil Magnetic Sails	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Aeronautical & Space Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shoko Arita, Yusuke Shimoda, Kazunari Toda and Yoshiki Yamagiwa	4. 巻 1
2. 論文標題 Initial Study on Mission of Cubic Deployable Structure with Thin Membrane Circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of AIAA SciTech 2021 Forum	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/6.2021-1705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 有田祥子, 下田裕介, 後藤誠也
2. 発表標題 膜展開構造物への薄膜印刷回路の搭載に関する研究
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大関幸也, 有田祥子, 山極芳樹
2. 発表標題 立方体展開構造物の固有振動数の調査
3. 学会等名 第29回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有田祥子
2. 発表標題 TCO Jackson Cubelに基づく展開構造物の宇宙利用
3. 学会等名 MIMS現象数理学研究拠点共同研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有田祥子, 戸田和成, 山極芳樹
2. 発表標題 立方体展開構造物の熱・構造の検討
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoko Arita and Yoshiaki Yamagiwa
2. 発表標題 Three-Dimensional MHD Analysis of Magnetic Plasma Drag with Coils Placed on Three Axes
3. 学会等名 The 73rd International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoko Arita, Yusuke Shimoda, Kazunari Toda and Yoshiki Yamagiwa
2. 発表標題 Initial Study on Mission of Cubic Deployable Structure with Thin Membrane Circuit
3. 学会等名 AIAA SciTech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関