

論文名 Title	Jackson Cube を利用した 立方体展開宇宙構造物の開発	Basic study of Deployable Cubic Space Structure based on Triangular Cylindrical Origami
著者 Author(s)	有田祥子, 福田一樹, 大関幸也	Shoko Arita, Itsuki Fukuta, Yukiya Ozeki
受理年月日 Date of acceptance	2019/07/24	
掲載 First publish	『折り紙の科学』 (“Science of Origami”) 2019/11/30 Vol. 7 No. 1 page 3-12	
備考 Note		

日本折紙学会
Japan Origami Academic Society
www.origami.jp

Jackson Cube を利用した立方体展開宇宙構造物の開発

有田祥子, 福田一樹, 大関幸也
静岡大学

432-8011, 浜松市中区城北 3-5-1
arita.shoko@shizuoka.ac.jp
fukuta.itsuki.17@shizuoka.ac.jp
ohzeki.yukiya.15@shizuoka.ac.jp

Basic study of Deployable Cubic Space Structure based on Triangular Cylindrical Origami
Shoko Arita, Itsuki Fukuta, Yukiya Ozeki
Shizuoka University
432-8011, Johoku 3-5-1, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka, Japan

要約 本研究は円筒螺旋折に基づく双安定な立方体展開宇宙構造物を提案するものである。展開する Jackson Cube の折紙を、耐宇宙環境材料を用いて再現し、双安定性を実験によって確認した。更に、自律展開機構を搭載し、展開挙動の計測を実施した。これにより、展開時の振動を抑える機構について今後検討する必要があるものの、円筒螺旋折の立方体を、宇宙構造物として構築する一つの方法を示すことができた。

Abstract: This study proposes a bistable deployable cubic space structure based on the triangulated cylindrical origami. The deployable Jackson Cube folded paper was reproduced using space resistant materials, and the bistability was confirmed by an experiment. Furthermore, the authors mounted an autonomous deployment mechanism and measured the deployment behavior. As a result, although it is necessary to study the mechanism to suppress the vibration during deployment, a way to construct a cube of triangulated cylindrical origami as a space structure was shown.

Keyword: Deployable origami, Space structure, Triangulated cylindrical origami

1. 序論

宇宙機の設計・開発において、折紙に基づく展開構造物は、利点の多い構造様式として多用されている。宇宙機は打ち上げ時にロケットに収納する必要があることと、ロケットの輸送コストの観点からできる限り軽量であることが求められる。従って、太陽電池パネルやアンテナ等を宇宙で構築するために、打ち上げ時に畳んで収納し、ロケットから放出された後に展開によって大型構造物を構築するという方法が採られる。これにより、構造物の大型化、および、幾何剛性を利用した軽量かつ高剛性な構造物の構築が可能になる。また、膜・ケーブル・バネ性部材などの柔軟構造部材は、曲げる・巻きつける・折りたたむなど、部材の変形を利用した収納・展開を行うことによって、より大型・軽量構造を実現できるため、実用化に向けた研究・開発が活発に行われている。

折紙に基づく展開宇宙構造物としては、1995年に打ち上げられた宇宙実験・観測機フリ

ーフライヤ（NASDA ほか）にてミウラ折り太陽電池パドルの展開に成功したほか、2010年に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証機 IKAROS（JAXA）が4枚の台形膜で構成される多重同心円折りの正方形膜面の遠心力展開に成功している。また、2014年に打ち上げられた複合膜面構造物実証衛星 SPROUT（日本大学）では八角形折りで畳まれた円筒のインフレーターブルチューブと、ミウラ折りで畳まれた三角形膜の展開実験が行われた。更に、2019年に打ち上げられた OrigamiSat-1（東京工業大学）では回転二重波折りで畳まれた正方形膜を展開する実験が予定されている。海外でも NASA の Star Shade に回転二重波折などの折紙が検討されている。

本研究では、円筒螺旋折を利用した新しい展開宇宙構造物を提案する。宇宙機構造として円筒の折紙を取り扱った研究例としては、上述の八角形折りインフレーターブルチューブの他に、円筒の円周方向と軸方向双方に伸縮する十亀折り^[1]があるが、円筒螺旋折の特徴である双安定性を利用した立体的な宇宙構造物を構築する研究は本研究の他に例を見ない。本研究ではこれまでに試作模型の紹介や、宇宙空間での熱特性に関する調査をしてきたが^[2]、本論文では折紙の構造概念および宇宙構造物としての要求項目を整理し、新たに、実験により双安定性を確認し、更に、宇宙で使用するための自律展開機構を提案する。これにより、宇宙構造物として実現可能な円筒螺旋折の立方体の構築方法があることを示す。

本論文では、第2章の2.1節で立方体の円筒螺旋折紙と宇宙機への適用の利点について述べ、2.2節で、宇宙構造物として作成した模型を示す。第3章では模型を用いた展開力の測定により、双安定性を有する構造物が作成できたことを確認した実験を記す。第4章では自律展開機構を搭載した模型を示す。

2. 立方体展開宇宙構造物のコンセプト

2. 1 基本となる折紙

本研究は図1に示す折紙を宇宙構造物として利用するための研究である。天板面を振じりながら引っ張ることで立方体を展開によって構築する図1の折紙は、Jackson Cube^[3]を基本形とし、Paul Jackson 自身が”Tower of Collapsing Cube”という折紙作品として発表している^[3]。筒の側面に折り線を有することによって筒がねじれて伸縮するという概念は“円筒螺旋折”として知られ、”Tower of Collapsing Cube”も円筒螺旋折紙の一種であると位置づけることができる。円筒螺旋折の数理については文献[4]にまとめられており、工学的応用研究は不揮発性メモリや車のクラッシュボックスなど、様々な分野でなされている^[5,6,7,8]。本研究は図1に示した立方体をなす円筒螺旋折を宇宙構造物に応用するものであるが、特に、円筒螺旋折特有の双安定性を利用している。双安定性とは、一つの構造物が異なる2つの安定形状、すなわち2つのポテンシャルエネルギーの極小値を持つ性質であり、円筒螺旋折が双安定性を有することは文献[9]にて示されている。

立方体円筒螺旋折における2つの安定形状は、図1における、畳まれた形状と、展開した形状である。これら2つの形状は、折り目の折り癖による残留変形を考えないものとするれば、それぞれ無歪で、すなわち、折紙の各面が面に垂直方向へのたわみを持たず自然長で構成される形状となっており、無載荷で形状を保つことができる。また、展開途中は折り目を有する各面が面に垂直方向に大きくたわむ変形をすることによって、展開および双安定が実現している。可展開円筒折としては円筒螺旋折の他に筒型剛体折^[10]があるが、筒

型剛体折りは展開に面の変形を利用しないため、板厚が大きく変形しづらい部材でも筒形状が構築可能などの利点がある一方で、展開後の形状を維持し続けるためにインフレーター構造物などの、永続的载荷機構が必要となる。これに対し、円筒螺旋折の双安定性を利用すると、柔軟部材を使用する必要がある一方で、宇宙での展開後に形状を維持し続けるための機構を搭載する必要が無いという利点がある。前節で述べた通り、柔軟部材は宇宙構造物としての利点が多く、円筒螺旋折に基づく立方体展開宇宙構造物は研究例が無いため、本研究でその設計を行う。

図1の折紙を宇宙構造物として使用する利点として、双安定性により、無負荷での形状維持、および、収納時も展開後も長期保管・使用における応力緩和の恐れが無いということが挙げられる。伸展軸方向には際限なく繋げることができ、図2のように、異なる立方体展開方法と組み合わせることで3軸方向に展開する構造物を構築することもできるので、大型構造物の支柱などのような支持部材としての利用が考えられる。また、大型構造としてだけでなく、小型宇宙機への利用としては、面を確保でき、太陽電池等の膜面デバイスの搭載が可能となるため、小型の宇宙機でもミッションの高度化・多様化に資することができると考えられる。近年、10cm立方を基本サイズとした人工衛星（Nano Sat）が爆発的に普及しており、本提案の構造物はこうした小型の衛星にも搭載しやすい形状のため、汎用性が期待できる。

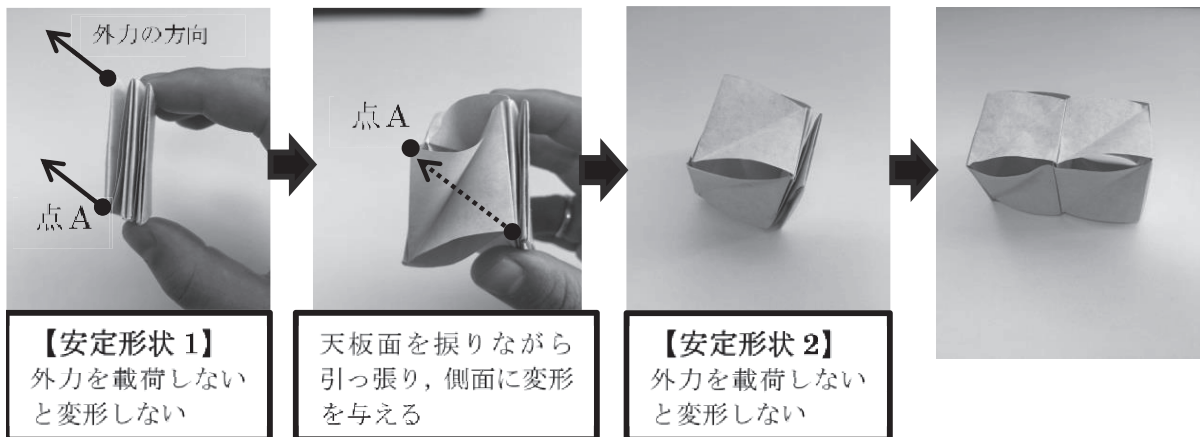


図1 展開する Jackson Cube

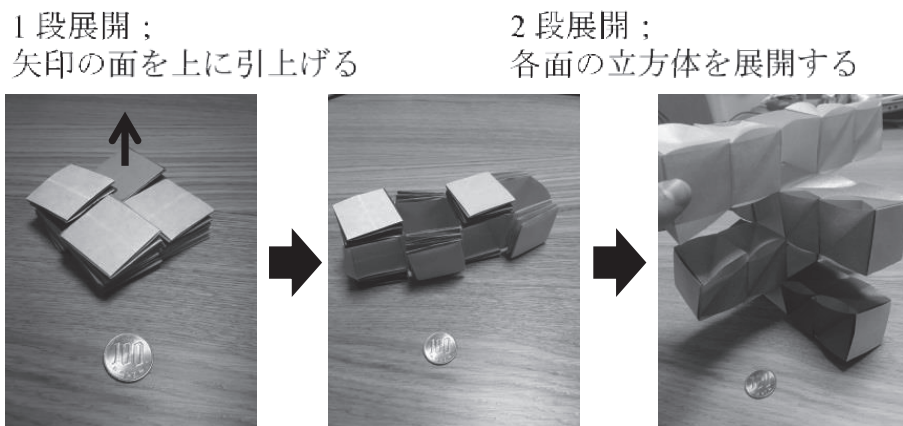
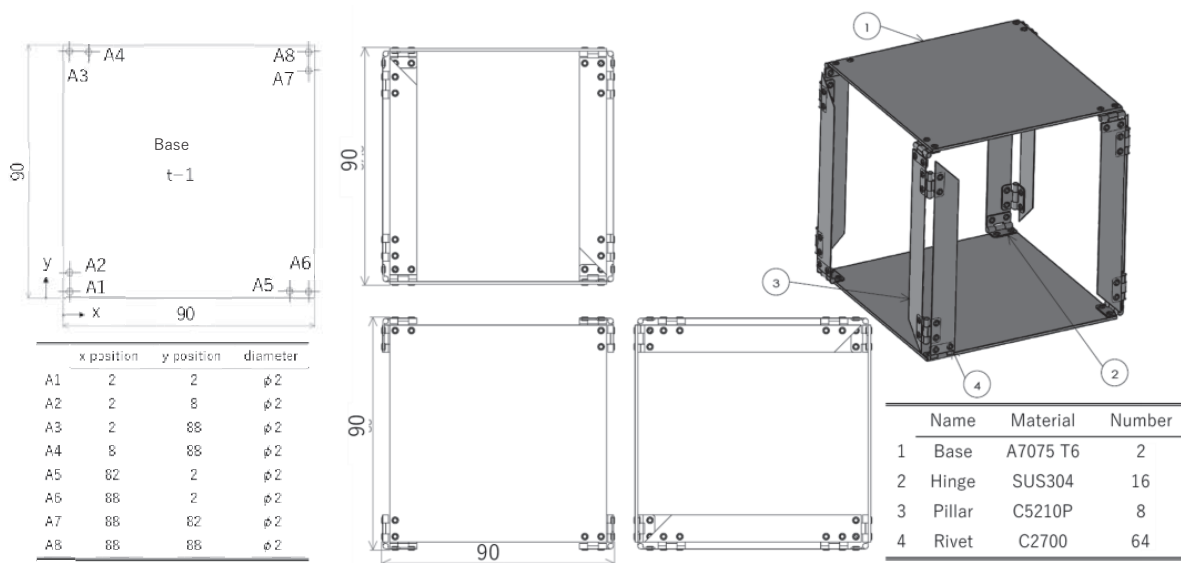


図2 立方体展開の組み合わせによる3軸展開

2. 2 立方体展開宇宙構造物

図1の折紙を宇宙構造物として応用すべく、原子状酸素や熱などの宇宙環境に耐性を有する材料で設計を試みた。図3に模型の図面を示す。天板面は剛な板、側面は大変形させるために板バネを用い、天板と側面はヒンジで結合する。板バネは変形させやすさのために、側面全体を覆う三角形板とするのではなく、上下天板を繋ぐピラー形状とした。この模型では、天板は厚さ1mm、ピラーは厚さ0.1mm、幅10mm、長さ90mmの短冊とし、天板と接続しない端は、変形中の天板との接触を防ぐために45°で切除している。模型は、図4に示す通り、図1の折紙と同様の展開を確認した。ただし、図1に示す折紙とは、側面がピラーとなっている点、側面の両端が天板に接続するのではなく隣り合うピラーにヒンジ結合されている点、折り目が無い点が異なっているため、双安定性を有するかどうかは次節にて述べる実験にて確認した。

展開の様子は次のようなものである。天板面に、振りと引張による展開のための外力を与えると、天板面は変形せずピラーが変形する。ピラーははじめに面外方向に大きくたわみ、ピラーが接続されている上下天板の角同士がもっとも近接する点を通ると、たわみが減じて最終的に自然長の展開形状になる。天板とピラーを繋ぐヒンジは、ピラーのたわみ角に応じて徐々に開いてゆく。ピラーの面外変形は、実験的には2つのパターンが確認されている。1つ目は図1の折紙と同様、ヒンジで繋がれた2本のピラーそれぞれが異なる方向にたわむ場合で、この時、ピラー同士を繋ぐヒンジは、展開初期に開き始める。2つ目は、2本のピラーが重なった状態でたわむ場合で、この時、ピラー同士を繋ぐヒンジは展開の終盤に急激に開く。2つのパターンが出る理由は、変形の始めに生じる分岐座屈において、その変形モードのうち、わずかな展開挙動の違いによって誘発され得るのが、この2つの変形モードであるためではないかと推察している。そして、2つ目のパターンで展開終盤に急激にヒンジが開くのは、変形量が少なくなった終盤に、载荷外力のブレや運動の影響を受けて、もう一つの変形モードへと飛び移ろうとする現象によるものではないかと推察している。



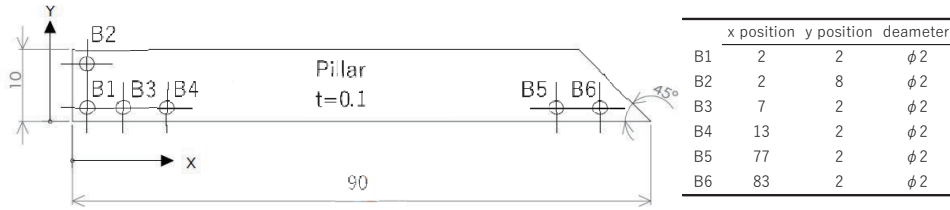


図3 模型の設計図



図4 模型の展開の確認

3. 実験による模型の双安定性の確認

図4の模型が、実際に2.2節で示した双安定な立方体構造物であることを確認するために、展開力を測定する実験を行った。立方体展開構造物は畳まれた状態で安定であるため、展開後の安定形状に移るために外力を与える必要がある。そこで、図3に示した90mm立方の模型を3つ作成し、図5に示す実験装置によって、展開に要する外力の推移を測定した。

模型の下側天板は自由回転する回転テーブルに固定され、上側天板はロードセルを介してリニアサーボに固定される。上側天板は回転しないよう固定されている。模型は、畳まれた状態から、リニアサーボによって上側天板に $+z$ 方向の並進変位が与えられ、回転ステージによって、天板間の距離に応じて振り角 ϕ が自然に与えられながら展開してゆく。畳まれた状態の模型の厚みは3つとも約10mmであったため、リニアサーボが距離9mmを示す地点を計測開始とした。リニアサーボは2mmずつ、展開が完了するまで持ち上げていき、段階ごとに z 軸力測定用ロードセルの出力を記録した。なお、リニアサーボの移動速度は10mm/sで固定とした。

測定結果を図6に示す。縦軸の符号が正の時にロードセルには圧縮力がかかっており、負の時に引張力がかかっている。縦軸が正の値から始まるのは、畳まれた状態の模型の天板を、リニアサーボが押し付ける状態から始めているためであり、リニアサーボの駆動によって天板間の距離が増し、展開していくに従って、ロードセルにかかる圧縮力は除荷され、引張力に転じる。従って、サーボストロークがおよそ3mmから81mmの間が展開途中となる。展開途中の展開力の推移は、サーボストロークが60mm付近で減少から増加に転じている。これは、60mm付近以降、変位が増すにも関わらず除荷されてゆくことを示し、即ち、安定形状が、畳まれた方の形状から展開した方の形状に移ったことを示して

いる。これにより、作製した模型の双安定性が確認できた。

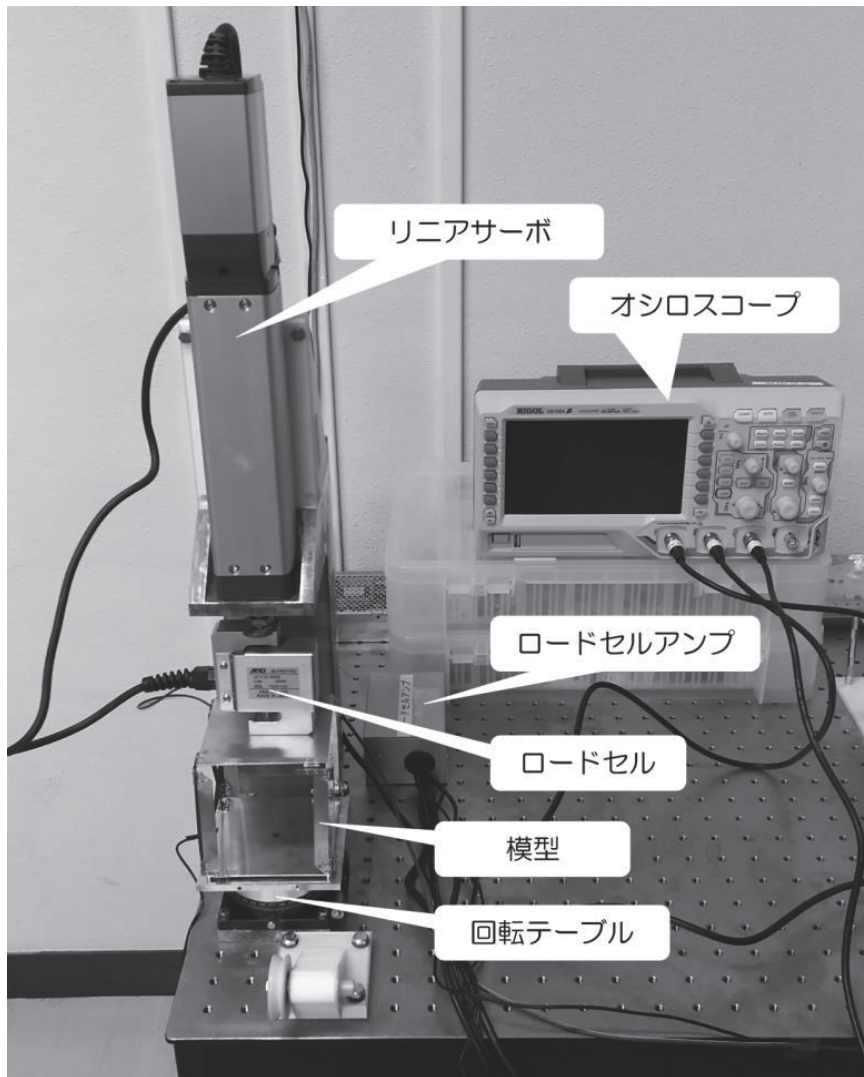


図5 展開力測定の実験装置外観

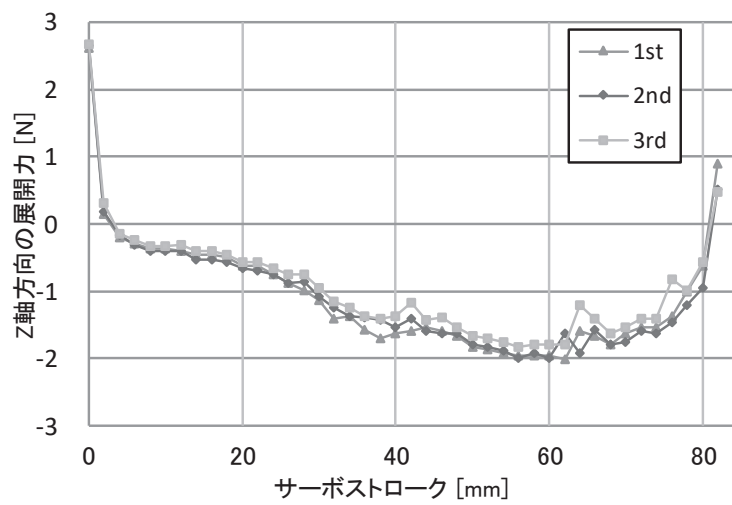


図6 展開力測定結果

4. 自律展開機構の開発

殆どの宇宙ミッションは無人宇宙機によるものであるため、畳まれた状態で打上げ、宇宙で展開する際には、管制局からの無線コマンドによって電子機器を作動させ、展開することとなる。従って、図 4 の模型に対し、自律展開機構を搭載する必要がある。安定形状が遷移する所まで強制変位を与える機構として、ワイヤの弾性を利用する方法を採った。図 7 に示すように、ワイヤを側面の谷折り線に直交する方の対角の、ヒンジにリベットで取り付ける。リベットは、ワイヤが面内回転自由となるように接合されている。図 8 は畳まれた状態の 1 本のワイヤの状態を示しており、ワイヤには振りと曲げによる弾性エネルギーが蓄えられている。この弾性エネルギーが開放される際に、天板に並進と回転の外力が載荷される。この収納状態を保持するために、上下天板に穴をあけ、ナイロン線で上下天板を縛って固定し、展開時にはナイロン線をニクロム線の導電加熱によって焼き切る機構を作成した。自律展開のために弾性エネルギーを有するワイヤを追加したことによって、構造物全体として Monostable となっているが、天板および支柱が収納時と展開後で自然長となって応力緩和しないという特徴を残し、ワイヤは超弾性 SMA を使用することで、極力、応力緩和や残留応力を低減することとした。ワイヤは Ti-Ni 超弾性 SMA を用いており、直径 0.7mm 以上で展開可能であることが実験的に分かった。本機構を搭載し、図 9 に示す通り、自律展開可能であることが確認できた。

更に、展開における 8 本の支柱の変形の対称性を調べるために、図 10 に示す実験装置にて計測を行った。天板の四隅に付けたマーカーを高速度カメラで上から撮影し、マーカーの軌跡を画像処理によって得た。使用したカメラは 120fps で、1 ピクセルあたり 0.1mm となるよう校正した。システム全体での計測誤差は 1mm 以下となっている。なお、実験では、収納状態で人の手でナイロン線を縛って固定することによる初期不整を防ぐために、図 10 のように滑車を用いて上側天板をナイロン線で真下に載荷した。また、ワイヤは展開可能な下限値である直径 0.7mm を用いた。結果として、展開にかかる時間は約 0.1 秒であることが分かり、図 11 に示す軌跡が得られた。濃い色のプロットは完全な対称展開のリファレンス値を示す。すなわち、8 本の支柱の変形が完全に同期して、天板が伸展軸からずれることなく、下側天板と平行に展開した場合を計算した軌跡である。それ以外の 4 色のプロットが、実験で計測されたそれぞれのマーカーの軌跡である。軌跡は対称とはならず、計算値からは大きい所で 10mm 以上のずれが計測された。これは、4 本のワイヤの展開のずれにより支柱の変形が対象とならず、天板が傾きながら展開したことによる結果であると考えられ、その傾きは下側天板に対しておよそ 38deg であると推定された。重力や大気抵抗の小さい宇宙空間では振動が残留するため、宇宙機の姿勢の安定の観点からは、より振動が発生しづらい展開が望ましい。従って、試作した自律展開機構に対し、よりゆっくりと展開するためのブレーキ機構の搭載や、支柱の変形を対称かつ同期させるための機構の搭載が望ましいと考えられる。

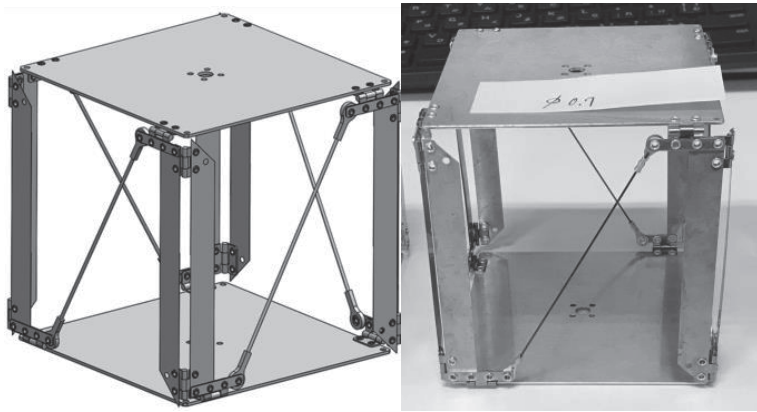


図7 自律展開機構を搭載した設計図(左)と模型(右)

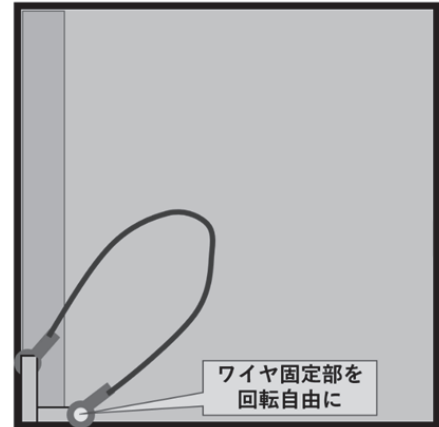


図8 畳まれた状態のワイヤ

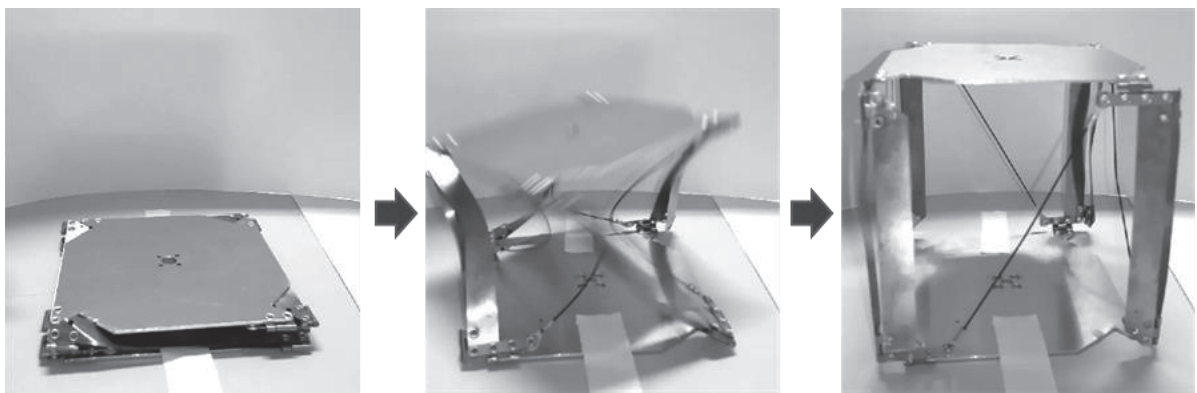


図9 自律展開機構による展開の様子

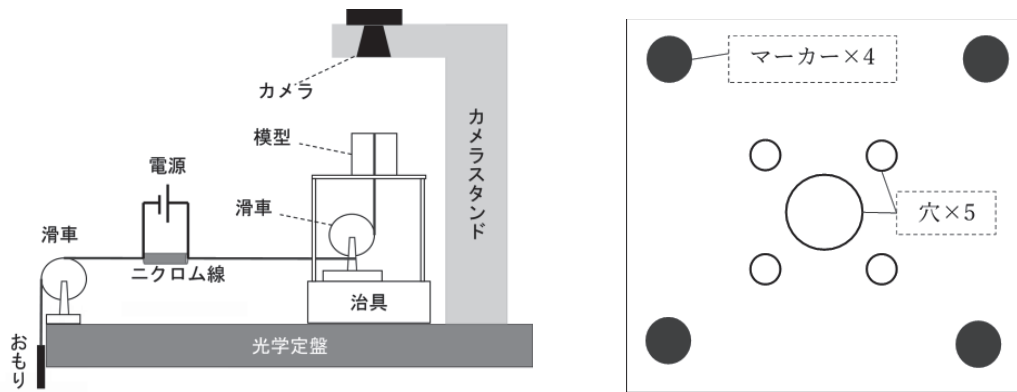


図10 展開中の天板の撮影装置（左）と天板のマーカー位置（右）

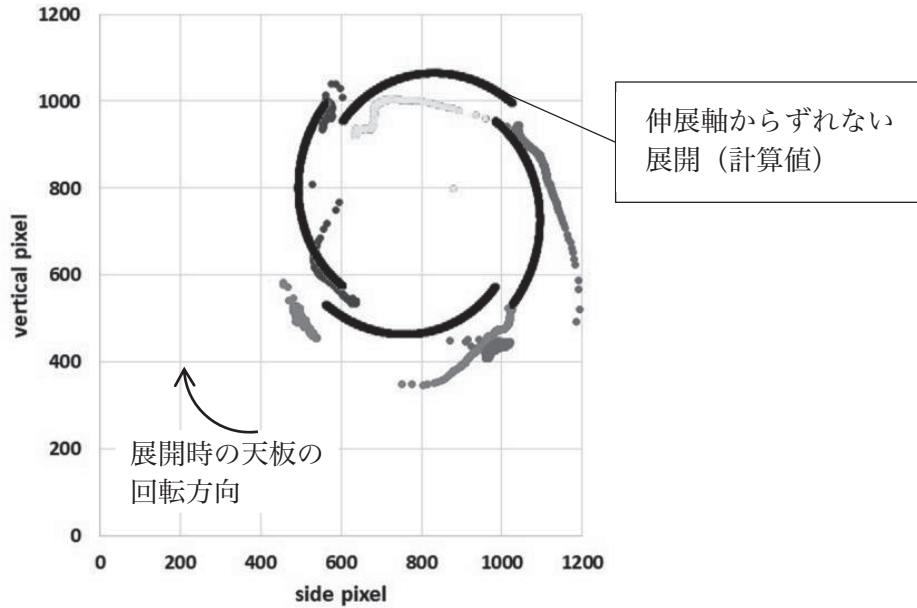


図 11 天板のマーカの軌跡

5. 結論

本研究は円筒螺旋折に基づく双安定な立方体展開宇宙構造物を提案するものである。本稿では、JacksonCube に基づいて作成した宇宙構造物の模型を示した。結果として、振動を生じないための展開機構について今後検討する必要があるものの、円筒螺旋折の立方体を、宇宙構造物として構築する一つの方法を示すことができた。

6. 謝辞

本研究は公益財団法人マツダ財団助成金によるご支援をいただいた。

7. 参考文献

- [1] Sogame, A. and Saito, J., “Concept and Geometrical Design of Dust Shields Using Concentric Layered 3-D Deployable Space Structures”, *21st International Symposium on Space Technology and Science*, Omiya(1998), pp.652-657.
- [2] 有田祥子, 福田一樹, 戸田和成, 山極芳樹, 宮崎康行, “立方体展開による新たな展開宇宙構造システムの提案と熱・構造特性の調査”, *第 62 回宇宙科学技術連合講演会*, 久留米(2018), 1M17.
- [3] Jackson, P., “CUT AND FOLD TECHNIQUES FOR PROMOTIONAL MATERIALS”, *Laurence King Publishing*, (2013), pp112-123.
- [4] 日本応用数学会監修, 野島武敏, 萩原一郎 編, “折紙の数理とその応用”, *共立出版*, (2012), pp.14-18.
- [5] Yasuda, H., Tachi, T., Lee, M. and Yang, J., “Origami-based tunable truss structures for non-volatile mechanical memory operation”, *Nature Communications*, Vol. 8, Article number: 962 ,(2017).

- [6] Wu, Z., Hagiwara, I. and Tao, X., “Optimisation of crush characteristics of the cylindrical origami structure”, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 43, No. 1-4, (2007), pp. 66-81.
- [7] Nojima, T., “Modelling of Folding Patterns in Flat Membranes and Cylinders by Origami”, *Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series C*, Vol. 45, Issue 1, (2002), pp. 364-370.
- [8] Biruta, K., “Folded tubes as compared to Kikko (Tortoise-Shell) bamboo”, *Origami 3, AK Peters*, Massachusetts (2001), pp. 197–207.
- [9] Nagashima, G. and Nojima, T., “Development of foldable triangulated cylinder”, *Proceedings of the 7th JSME Materials and Processing Conference*, Higashihiroshima (1999), pp. 153–154.
- [10] 日本応用数理学会監修, 野島武敏, 萩原一郎 編, “折紙の数理とその応用”, 共立出版, (2012), pp.165-168.