

平成30年6月16日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14507

研究課題名(和文) 曲面形状膜面のらせん折りによる新たな折り畳み技法と展開特性の把握

研究課題名(英文) Novel Stowed Strategy by Spiral Folding Lines for Curved Membrane and its Deployment Properties

研究代表者

宮下 朋之 (MIYASHITA, TOMOYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：20329080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：申請者が考案した曲面形状の膜面の収納技術について、いくつかの取り組みを実施した。(1)パラボラ形状を対象にアンテナとしての用途や収納方法を検討した。(2)膜厚を可変として取り扱うことの特性を生かして、面上敷設物の存在を考慮した収納を実現した。また、パネル状の形状も厚みの考慮により収納可能とした。発展して板状構造物へのミウラ折技法の適用方法を新たに考案した。(3)収納した膜面の展開挙動を力学的な側面より机上検討を可能とした。(4)らせん折と蛇腹折を複合した収納技法を平面および曲面の膜面に対して数学的に定式化して実験により検証した。(5)新たな用途として、絆創膏、エアバックなどへの適用を検討した。

研究成果の概要(英文)：Several initiatives were implemented on the storage technology of the membrane surface of the curved surface shape proposed by the applicant. (1) We examined the use and storage method as antenna for parabolic shape. (2) Utilizing the characteristics of handling the film thickness as variable, we realized the storage technology considering the existence of the parts on the surface. In addition, the panel shape can be accommodated by considering the thickness. We developed a new method to apply the Miura folding technique to the plate structure. (3) The development behavior of the stored membrane surface was realized considering a mechanical properties as a numerical simulation. (4) A storage technique combining spiral folding and bellows folding was mathematically formulated with respect to the plane surface and curved surface, and verified by experiment. (5) As a new use, application to adhesive plaster, air bag, etc. was studied.

研究分野：宇宙工学

キーワード：折り紙工学 らせん折 蛇腹折 展開構造 パラボラアンテナ 収納構造

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間における人工衛星打ち上げ機会を利用し申請者は WASEDA-SAT3 を 2016 年に打ち上げる。らせん折により収納された膜面の展開を目的とした人工衛星であり、この収納技法を宇宙空間において世界に先駆けて検証する。膜面を折り畳む技法は、折り紙工学等の学問分野を形成し、日本の固有技術の色彩を持ち発展してきている。特にミウラ折り技法は、人工衛星のパネルの展開方法を研究する過程で生み出され、例えば地図の収納などの方式として、我々の日常生活において利用されるに至っている。この技法がらせん折りとして発展し、平面を円筒形状に収納する技法が考案されている。申請者は、この技法をさらに発展させ、曲面を円筒形状に収納する技法を発見した。具体的には折り目という曲線を導出する支配方程式を新たに定式化し求解することにより折り目を得る。ここでは、膜厚をパラメータとして取り扱うが、それを可変とすることも可能と見通している。すなわち、膜面に敷設する部品などの存在を加味して折り目を算出することも可能であると考えられる。工学的な利用に際しては、収納および展開に要する力の作用（遠心力・アクチュエータの配置・出力）を明確にすることが必要である。

### 2. 研究の目的

低剛性な膜面は微小重力空間である宇宙環境では構造材料としての用途も広く活用されている。JAXA イカロス衛星により平面薄膜の利用実績が示され宇宙空間における特性が観測された。このような構造物は宇宙空間への輸送時と使用時での収納と展開が不可欠である。本研究は、従前は平面を前提としたらせん折り収納技術を曲面に拡張し設計に必要な力学的特性を取得することである。大型アンテナ、太陽電池パネル、遮光構造物など、この技術を基盤として可能となるものも多い。このため、力学的特性に基づく収納/展開の補助機構の設計を目的とする。すなわち、らせん折りによる曲面の収納/展開に関する基盤技術の確立を目的とする。いくつかの応用事例を対象とし、基盤技術の応用によるらせん折り技術の利用の確立を志すものである。

### 3. 研究の方法

2年間の実施期間のうち、らせん折りによる折り畳みの対象とする曲面をいくつか想定する。現在の図1に示しているパラボラ面の逆方向折り畳みを検討する。収納されたらせん折り曲面の展開に要する力学的特性としていくつかの荷重点に荷重の作用を可能とし映像取得により3次元形状の変化を取得可能とする実験装置を改良し製作する。さらに、実験と並行して膜面の展開に有用なアクチュエータの配置設計を可能とするシミュレーション技法を多粒子法を中心に検討

し実験により検証した。微小平板により曲面を近似しワイヤ駆動を想定する機構をパラボラアンテナを想定する機能性膜面として考案し設計・製作・評価する。解析においては、ADAMS 等による機構モデルを構築し駆動ワイヤの配置等を検討し実験により検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) 曲面らせん折りによる折り畳み

申請者による先行研究により、曲面のらせん折りによる折り畳みを実現する折り目曲線の支配方程式は定式化(図1)されていた。図1に示したようにパラボラ曲面の折り畳みは実現できているが、以下のような取り組みが可能であり検討する。展開機構は超弾性ワイヤを膜面端部まで山折りのみとなる折り目に配置している。

$$\tan \phi = \frac{R d\theta}{dR}$$

$$\frac{dS}{d\theta} = -S \tan \phi + \frac{db}{\cos \phi d\theta}$$

$$\frac{\pi r dr}{(kR - NR \tan \gamma) dR} = \frac{t}{S \cos \phi}$$

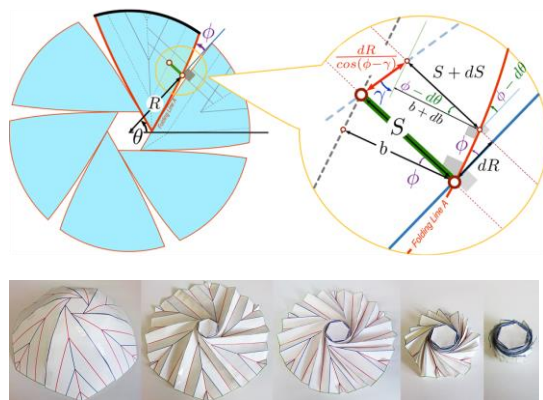
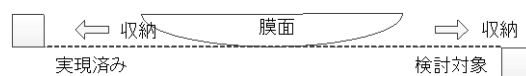


図1 らせん折曲面形状膜面の収納・展開

#### 1) 膜面の凸部外側への折り畳みの検討 (パラボラ面の逆方向折り畳み)

下図左側の通り凸部内側への折り畳みは実現できているものの、折り目の密度が高くなる傾向が認められ、結果として展開力が、平面と比較して大きいものとなっている。このことから、下図右側のように凸部外側への折り畳みを検討する。実験対象とする膜面を制作した。



#### 2) 膜厚可変とした折り目の検討

支配方程式では膜厚  $t$  を含み定式化されている。すなわち、位置  $R$ 、 $\phi$  により可変とすることも可能である。敷設素子（太陽電池など）の厚みを膜面に加算した折り畳みを可能である。1)の折り目算出の際に、リング状の

敷設物を想定し折り目を算出し、実験対象とする膜面を制作した。

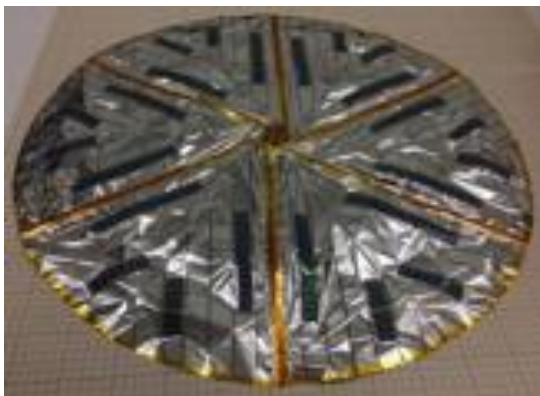


図2 パラボラ膜面に素子敷設

### (2) 力学的特性の測定装置の改良

現在の実験装置は膜面の端部をクリップではさみ、クリップに接続した紐によりおもりにより静荷重を付与している。測定は展開半径を測定している。動的な展開過程を検証するために真空チャンバーを使用した実験が必要である。透明なアクリルによる半径50cm程度の真空槽を導入した展開実験を実施した。

### (3) 展開実験とシミュレーション

収納形状である円筒の直径および高さをパラメータとし、アクチュエータとして配置する超弾性ワイヤの直径もパラメータとして実験を繰り返した。実験は、以下の手順により実施した。

1) 真空槽内部に膜面を設置し保持機構に開放指示を与え、展開過程を動画撮影および代表点の推移の座標値を記録した。

2) 膜面の端部をクリップではさみ、クリップに接続した紐によりおもりにより静荷重を付与し定常状態となった段階で展開半径を記録した。

さらに、実験結果と整合するシミュレーションモデルを構築する。シミュレーションは集中質量と非線形特性を有するバネによるモデルを作成した。(図3)

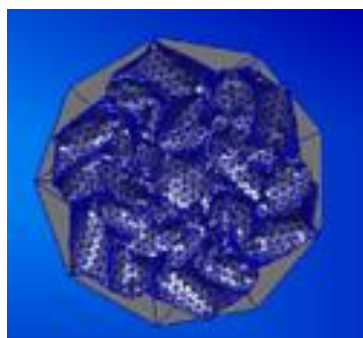


図3 有限要素モデル

現段階では線形特性を有するバネに留まっている。以下の諸点を改良した。

- ① 非線形特性を有するバネを導入した。
- ② 接触判定を導入し、反発係数による簡易な衝突計算を導入した。
- ③ 塑性変形している折り目の特性を面間の回転非線形バネを用いて導入した。

### (4) 機能性膜面の設計・製作

パラボラアンテナを想定した機能を有する膜面を設計し製作する。パラボラアンテナは電波の受信利得を向上するため、焦点に対して電波の反射能力を要する材料の使用が要求される。この材料として、金属片などの剛体板を上図の三角形有限要素形状に細分化する。これらをヒンジを用いて接続し折り畳みを可能とする。剛体片は変形することができないため、折りたたみのための折り目の算出には単なる板厚を考慮するのみではなく収納半径と剛体の寸法に応じた補正が必要となった。



図4 膜厚可変の構造物

また、ヒンジで接続された剛体要素で構成されるパラボラ面を展開するためヒンジを敷設する面と反対側にワイヤを接続し張力を付与することにより、複数の剛体片が面を形成するようにした。ワイヤを敷設する個所は試行錯誤により検討した。

このようにワイヤに張力を付与することによるらせん折りによる折り畳み収納されたパラボラアンテナを展開すること検討し、合理的なワイヤの付設箇所、張力の付与を検討した。

### (5) 展開実験とシミュレーション

(3)と同様な環境として、静的、動的な展開状況を測定する。静的な実験では、大気中において、ワイヤ張力を指定値にすることにより展開半径を測定する。動的な実験では、真空槽において、ワイヤの張力を制御することにより、展開時間、最終形状を計測した。最終形状によるアンテナ性能を電波暗室において測定する。重力の影響は受けることになる。このため、装置の上下を反転し、重力の影響を明確にする。これらの実験により展開動作における力学的特性を明確にした。形成する表面形状の精度について、必ずしも高精度のものとはならず、GHz帯域での使用に

については、さらなる検討の必要性が認められた。

シミュレーションについては、商用の機構解析ソフトウェアを使用し、計算機モデルを作成する。摺動部の特性は実験結果と整合するように設定することとなるが、場合によっては、基礎実験として、いくつかの部品により張力と剛体面角度の関係を特性として取得した。

#### (6) 成果発表・情報収集

上記の(1)から(5)の活動により得られる成果は国内外の学会において積極的に発表する。JAXA や日本航空宇宙学会が主催する会議とうでの情報収集も積極的に実施する。JAXA が募集する小型衛星の打ち上げ機会の提供に関する公募への申請を準備した。また、2 件の論文が国際会議への論文投稿中であり、1 件の論文投稿を予定している。

#### (7) 応用事例

本研究の成果として、いくつかの収納様式を考案した。図5は、平面の膜面に対するらせん折と蛇腹折を複合した折り目である。従来研究で、概念として取り上げられてたが、膜厚の考慮を新たに検討し折り目の算出式を定式化した。蛇腹折を使用する場合と使用しない場合において、円筒形状に収納することが可能である。さらに、膜面の展開に必要な荷重は蛇腹折を複合した膜面の方が小さい状態であること認められた。

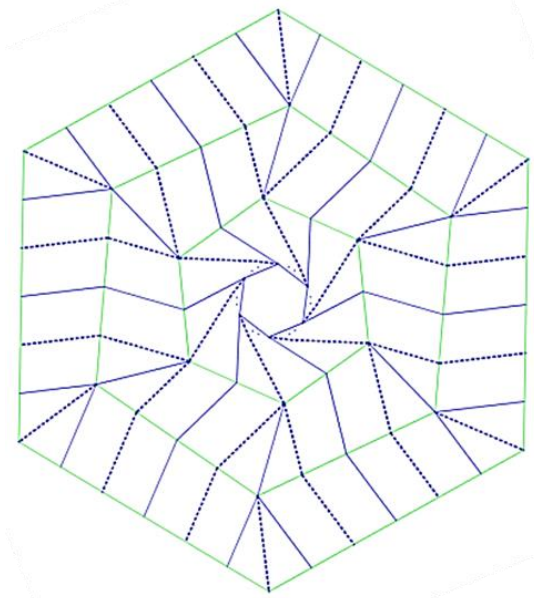


図5 平面膜のらせん折と蛇腹折の複合折

図6は、本研究の開始時に考案していた曲面に対するらせん折に蛇腹折に複合化を試みたものである。図4と同様に、円筒形状に

収納することが可能である。さらに、膜面の展開に必要な荷重は蛇腹折を複合した方が小さいことが認められた。

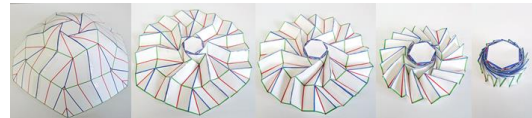
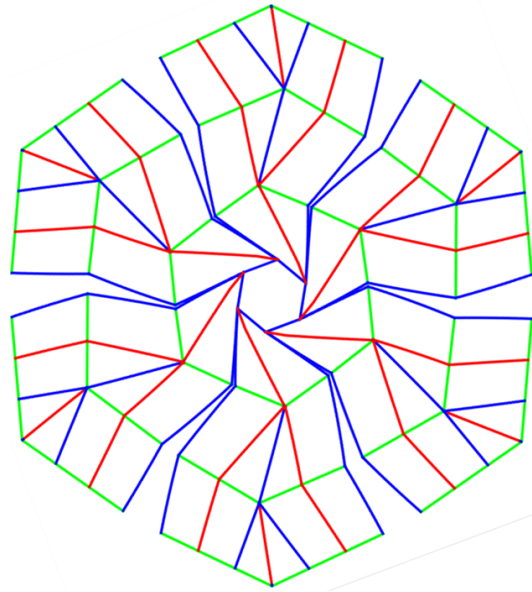


図6 曲面膜のらせん折と蛇腹折の複合折

図7は、ゼラチンフィルムを対象に提案する折り畳み様式を適用して作成した構造物である。近年、低侵襲を実現できるため、活用が進んでいる内視鏡で敷設する狭い管路を通して挿入し、体内で展開し、薬剤留置、気体封止（気胸）などへの用途を想定した応用である。実験での検討がなされている。

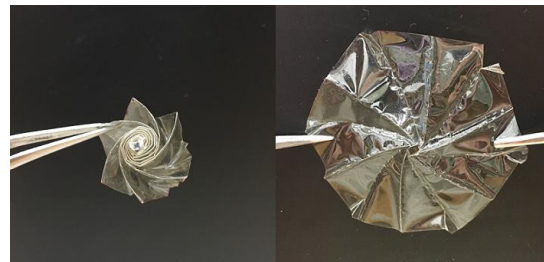


図7 絆創膏への適用

図8は、折り線が直線で二次元展開・収納が可能でミウラ折りと厚板の組合せに着目し、厚みがある板の一部を切り取ることで隙間なく収納できる方法を定式化した収納方法である。

ミウラ折りの折り線で形成される平行四辺形要素において、底辺と切込み線のなす角が $90^\circ$ の場合、厚板でも隙間なく密着した状態で収納できることを幾何学的関係から証明した。またその結果を用いて、構成パネルの各種寸法と切込み量の関係を定式化した。さらに切込み量が定式化されたことにより、複数枚のパネルで構成されたミウラ折りの

厚板構造の収納・展開状態と構成パネルの各種寸法の関係性を定式化した。また得られた関係式を用いることで、収納状態と展開状態の制約条件を満たすミウラ折りをを用いた厚板構造の構成パネルの設計例を示した。

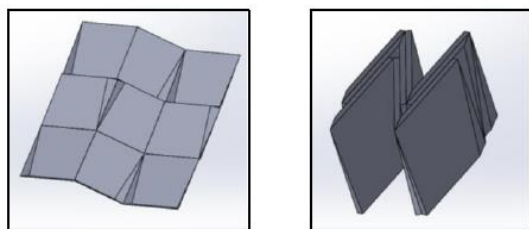


図8 平面構造の三浦折収納技法

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Satoshi Miura, Naoya Tsuda, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, "Spiral Folded Adhesive Plaster Optimization for Laparoscopic Surgery", Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'18), Honolulu, Hawaii, July 17-21, 2018, 査読有 (Accepted)
- ② Miyashita, T., Yamakawa, H., Katsumata, N., Natori, M.C., Expansion and measurement of spiral folded membrane by small satellite, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2017-0848, 査読有
- ③ Seino, K., Parque, V., Miyashita, T., A study on the design of deployable cable-panel structure, 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2017-1347, 査読有、
- ④ Miyashita, T., Yamakawa, H., Katsumata, N., Natori, M.C., Missions of Small Satellite with Deployable Membrane Using Spiral Folding Lines, The Fourth International Symposium on Solar Sailing, 17062, 査読有

[学会発表] (計3件)

- ① 橋本真之介, 勝又暢久, 樋口健、平面板構造の板厚を考慮した折りたたみ方法の定式化、構造強度に関する講演会、2017
- ② 浅沼範大, 宮下朋之, 伸展式架台の軌道上におけるサーマルスナップの低減に関する研究、構造強度に関する講演会、2017
- ③ 津田直弥, 三浦 智, 千葉恵太, 新宅裕太, Victor Parque, 白石泰之, 山家智之, 宮下朋之, 応答曲面法を用いた螺旋

折綵創膏の最適化, 日本コンピュータ外科学会講演会, 2017

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮下 朋之 (MIYASHITA, Tomoyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 20329080

### (2) 研究分担者

勝又 暢久 (KATSUMATA, Nobuhisa)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 60534948

鳥阪 綾子 (TORISAKA, Ayako)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号: 70449338