

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760765

研究課題名(和文) 空気膜と弾性梁からなるハイブリッド展開構造物の概念検討と基本特性の把握

研究課題名(英文) Fundamental study of hybrid deployable structures composed of inflatable membrane and elastic beams

研究代表者

荻 芳郎 (OGI, Yoshiro)

東京大学・生産技術研究所・特任講師

研究者番号：00512005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：インフレータブル膜面構造の大変位展開挙動の再現性を向上させるために、大変形可能な弾性梁を組み込んだ構造物を提案している。具体的な構造様式として、円筒空気膜と弾性梁とを基本構成要素とする伸縮マスト構造、インフレータブルコイルマストを考案し、その基本特性を把握するための調査を行った。製作模型を用いた展開収納実験、新たに確立した数値解析技術を用いた数値計算により、提案概念の利点を確認し、展開収納可否や構造性能に影響を与える要因を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A structural concept to incorporate elastic beams permitting large deformation in a membrane is proposed to stabilize its large displacement behavior. As a specific model of the hybrid structure, an inflatable coilable mast, composed of an inflatable tube and elastic beams, is investigated. Retraction and deployment experiments of four kinds of models clarified important design parameters. And in the experiments, one model could retract compactly. Numerical analysis technique for such structures is also established in this research. Numerical calculations showed that incorporating elastic beams improved the shape repeatability during retraction and deployment. Furthermore, it was found that the method could preliminarily estimate the state of membrane.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 展開構造物 空気膜 インフレータブル構造物 機械要素 建築構造 弾性梁 再現性

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙用膜構造物や、袋状の膜を宇宙空間でガス膨張させる宇宙インフレータブル構造物は、軽量性・高収納効率・機構点数削減などの利点や、軽量支持構造物としての需要増加などから近年実用化に向けて進みつつある。しかし、膜材料は本質的に柔軟であり、展開挙動の不確定性(課題1)や、形状不定性(張力を喪失すると形状維持できない)(課題2)など、軽量であるがゆえに持つ性質が普及を妨げているのも事実である。

これら課題は様々な観点から解決が試みられている。例えば、課題1については、生物の構造形態を応用する研究や、折り紙の数理を利用する研究がされている。また、解析手法についても盛んに研究されており、日本が打ち上げた小型ソーラー電力セル実証機 IKAROS でも大型薄膜のダイナミクス予測技術が成果を上げている。課題2についても、国際宇宙ステーションを利用した宇宙インフレータブル構造物の宇宙実証が行われている。

本研究では、新概念の伸展マスト構造物として、インフレータブルコイラブルマスト(Inflatable Coilable Mast)を提案する。本マストは円筒空気膜と弾性梁とを基本構成要素とする。本マストは、展開状態では、弾性梁のみで形状安定し、さらに空気膜に内圧を付与すれば全体剛性が向上する。本マストを収納するにはまず、減圧やトルクなどによって、空気膜にスラック(膜の座屈)を発生させる。その後、軸方向荷重を加えれば、弾性梁がコイル状に変形しながら構造全体が収納される。展開は、弾性梁に蓄えられた歪エネルギーを開放することにより行うが、空気膜の内圧も伸展力として利用できる。

インフレータブルコイラブルマストは既に多くの宇宙利用実績を有する従来型コイラブルマストの発展版とみなせる。しかし、その基本となるコンセプトは、空気膜と弾性梁のハイブリッド化である。これは両者個々の視点で見れば、空気膜の展開挙動が弾性梁で安定化され(課題1の解決)、空気膜の展開後の形状安定性が弾性梁で向上し(課題2の解決)、弾性梁の挙動が空気膜の内圧で制御できる、ような相乗効果を期待することができる。

スラックは構造物の耐荷重減少・大変形の要因となるため、これを機能として利用する概念は、世界的にもほとんど例が無い。本マストは空気膜内圧と弾性梁によって、スラックの発生を制御し、上手く利用することを意図している。

本研究の予備調査として、インフレータブルコイラブルマストの実現可能性を確認するために簡単な原理模型を製作し、展開収納操作を試行した。すると、様々な展開収納過程を観察することができた。特に興味深い現象として、空気膜が発生したスラックを折り目とするように畳まれる事や、展開領域が局

所化する事が観察される場合があった。展開領域の局所化は、外乱がある時の展開収納安定化に効果的であり、従来型コイラブルマストでも微妙な力学的バランスで実現させている。つまり本試行結果は、インフレータブルコイラブルマストの適切な設計、適切な伸展力と内圧の管理によって、合理的な構造挙動が得られることを示唆している。

### 2. 研究の目的

マストは構造物の基本要素であり、インフレータブルコイラブルマストは従来型コイラブルマストとインフレータブルチューブ単体の中間にある展開型軽量マストと位置づけられる。本マストの開発を通して得られるハイブリッド展開構造物の設計・検証技術は、将来の柔軟軽量宇宙構造物で必要とされる要素技術となり得る。また、本マストは、その展開だけでなく収納もできるという可逆性に着目すれば、アクチュエータとしても利用可能であり、ロボットや可動式建築物など、地上においても幅広い用途が期待される。以上より、本研究では、空気膜と弾性梁からなるハイブリッド展開構造物、インフレータブルコイラブルマストの概念検討と基本特性の把握を目的とした研究を実施した。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究ではまず、異なる設計パラメータを持つインフレータブルコイラブルマスト模型を複数製作し、安定的な展開収納ができるかの試行実験を行った。本マストの基本構成要素は、円筒空気膜、ロンジロン(弾性梁)、ラジアルスパーサ、伸展制御ケーブルである(図1)。本検討では、伸展制御ケーブルを用いずに、内圧のみでマストの展開収納操作ができるかを検討した。インフレータブル構造物を宇宙空間で利用する場合、宇宙環境はほぼ真空であり、減圧による可逆的形態制御は困難と考えられる。しかし、大気圧下での内圧制御による収納に再現性を持たせることができれば、開発の効率化や展開信頼性向上などの利点を見いだすことができる。ラジアルスパーサの有無と間隔、およびロンジロン展開後のマスト伸展方向に対する傾斜角をパラメータとする4種類の長尺マストの模型を製作し、展開収納試行実験を行った(図2)。

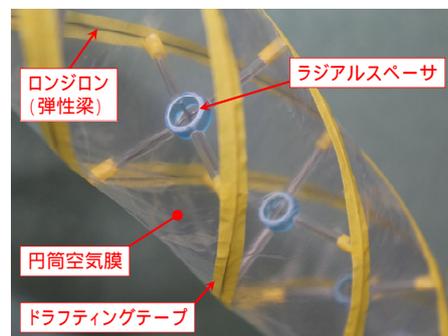


図1. 実験模型

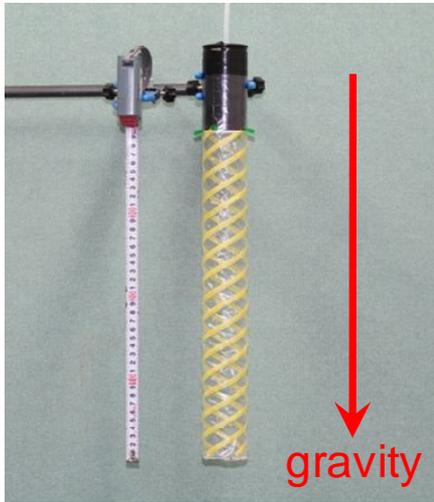
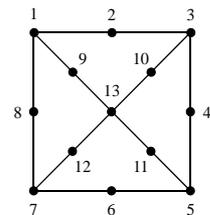


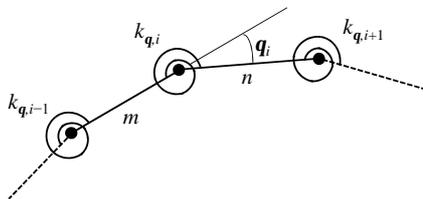
図 2 . 実験装置構成

(2) 展開構造物の大変位挙動を予測するために、数値解析技術は重要であるが、無ひずみ大变位を生じる膜構造においては、非線形有限要素法における接線剛性行列が特異になり解析が進まないなどの困難を伴う。そこで本検討では、川口等が提案した膜構造大变位解析手法を、弾性梁大变形も扱えるよう発展させた。本手法では、膜を不安定トラス構造で、弾性梁を回転ばねで繋がった一連のロッド部材でモデル化し(図 3), 収束計算により大变位追跡を行う。

単純な構造物を対象とした数値解析により本手法の有用性を確認した後に、円筒膜を対象とした変位制御による収納・展開挙動の数値解析を行った。



(a) 膜



(b) 弾性梁

図 3 . 数値解析におけるモデル化方法

#### 4 . 研究成果

(1) 製作したインフレーターブルコイラブルマスト模型を用いた展開収納試行実験により以下の知見が得られた。まず、展開時ロン

ジロン傾斜角を大きくし螺旋形を形成すると、収納過程における円筒空気膜の半径方向の潰れを抑制することができ、ラジアルスペースを省略できることが分かった。一方、ラジアルスペースの使用により、展開時ロンジロン傾斜角を小さくすることができ、これによりマストの軸剛性・曲げ剛性は向上する。ただし、収納時に円筒空気膜の気道閉塞により収納が完了しない模型があることが分かった。

製作した 4 種類の模型のうち、ロンジロンの変形が弾性範囲に収まり、円筒空気膜内の残留気体がほとんど無い状態まで収納できる模型が存在した(図 4)。収納効率も伸展長で約 1/10 であり、展開も行うことができた。本検討結果より、展開収納の可否と収納効率を決定する主要な設計パラメータを選定することができた。

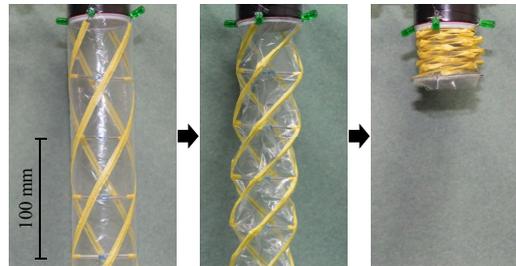


図 4 . 展開収納可能なマスト模型の収納過程

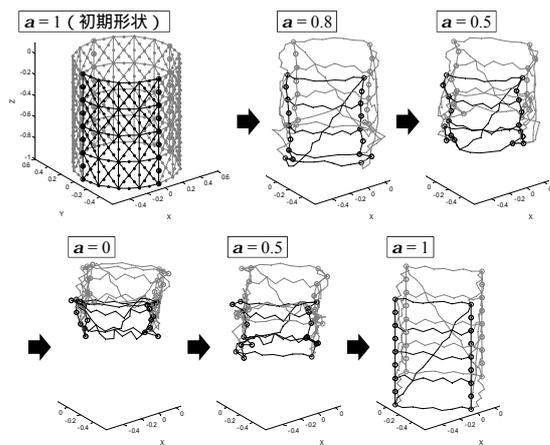
(2) 円筒膜を対象とした変位制御による収納・展開挙動の数値解析により以下の知見が得られた。図 5 に、弾性梁を付与しなかった場合および付与した場合の収納展開過程における形状を示す。本解析ではマストの 2 つのラジアルスペースで挟まれた 1 区画を想定している。

弾性梁が無く円筒空気膜のみの場合(図 5(a)), 部材の軸方向変形のひずみエネルギーは、全部材とも収納展開過程を通じて常にゼロであった。伸び無し変位のみで収納展開が行われている事が分かる。図 5(a)において、収納過程と展開過程とを比べると、同じ展開率でも両者の形状は異なっており、膜の形状不定性を確認することができる。

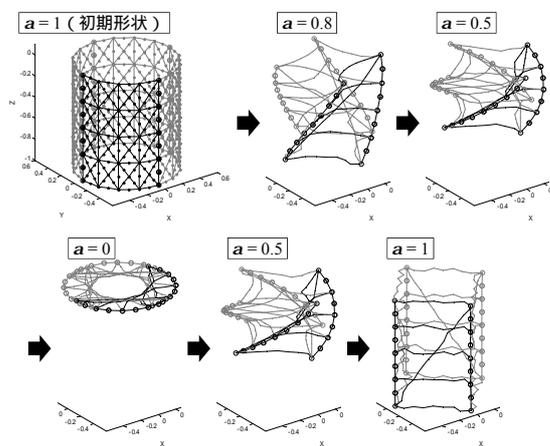
弾性梁を組み込んだ円筒空気膜の場合(図 5(b)), 収納過程と展開過程とを比べると、同じ展開率ではほぼ同じ形状が得られている。最終形状である展開完了後の形状は初期形状とは異なっているが、これは膜のたるみによる形状不定性である。

図 5 の結果より、円筒膜のみの場合に比べ、弾性梁を付与する方が収納展開時の形状再現性が良くなることが分かった。また、本手法により、膜の状態を簡易的に推定可能であることが分かった。続いて、構築した数値解析技術を用いてパラメータスタディを行った。その結果、展開収納可否に大きく影響を与えるロンジロン数やラジアルスペース間

隔などの幾何学的パラメータの影響を明らかにした。また、展開経路における弾性エネルギーを追跡することにより、展開構造物としての利点となる展開過程の局在化が実現可能であることを明らかにした。



(a) 弾性梁無し



(b) 弾性梁有り

図5. 円筒空気膜の収納展開過程の数値計算結果 ( $\alpha$  は全展開時に対する伸展長の割合)

(3) 本研究により、弾性梁を付与する方が収納展開時の形状再現性が良くなるという、提案構造物の利点を確認することができた。また、本研究を通じ、有益な設計ツールとしての数値解析技術を確立することができた。

マストは構造物の基本要素である。本提案構造物は、軽量かつ展開信頼性を持つ構造要素として、とくに宇宙システムにおける構造要素の選択候補に供することができると思われる。今後は具体的なアプリケーションを想定し、研究開発を行う予定である。

## 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1件)

[1] 荻芳郎, 石村康生, 川口健一: “弾性梁を組み込んだ円筒膜構造の大変位解析”, 膜構造研究論文集 2012, 2013年, pp. 21-27. (査読有)

〔学会発表〕(計2件)

[1] 荻芳郎, 川口健一: “弾性梁を組み込んだ円筒膜構造の収納展開経路に関する一考察”, 日本建築学会 2013年度大会(北海道) 学術講演会, pp. 1073-1074, 札幌, 2013年9月1日.

[2] 荻芳郎, 石村康生: “弾性梁により補剛された円筒空気膜構造の展開と収納”, 第27回宇宙構造・材料シンポジウム, 相模原, 2011年12月8日.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻 芳郎 (OGI, Yoshiro)

東京大学・生産技術研究所・特任講師

研究者番号: 00512005