

複合膜面構造物におけるインフレータブルチューブの伸展挙動 Deployment Behavior of Inflatable Tube of Combined Membrane Structure

指導教授 宮崎康行

M4027 丸木悠暉

1. 序論

1.1. 柔軟宇宙構造物

近年、ソーラーセイルや通信用のアンテナ、太陽発電システムなどを始めとした大型宇宙構造物の開発が盛んとなっている。しかし、ロケットのペイロードの制限から、そのような構造物を実現するには軽量かつ収納性、展開性に優れた構造様式が求められる。その一例として、インフレータブル構造が挙げられる。インフレータブル構造は複雑な展開システムを必要としないものの、未だ軌道上実証が十分にはなされていない。その基礎研究として、2012年には「きぼう」日本実験棟船外プラットフォームにて実証されたインフレータブル伸展マスト「SIMPLE」による伸展実験が行われた^[1]。しかし、インフレータブル構造を支持部材とした複合膜面構造物の軌道上実証は未だなされていない。

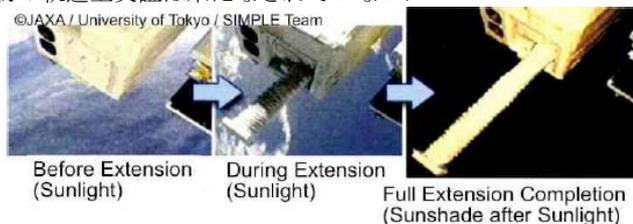


図 1.1 SIMPLE によるインフレータブル伸展マストの軌道上実証^[1]

1.2. 超小型衛星 SPROUT

日本大学では前節で述べた、複合膜面構造の軌道上展開実証をコンセプトに、超小型人工衛星「SPROUT」を打ち上げ、現在軌道上にて管制運用を行っている。SPROUTでは、二本のインフレータブルチューブを支持部材とし、三角形上の薄膜を展開することで、複合膜面構造物によるデオービット機構を実現する。

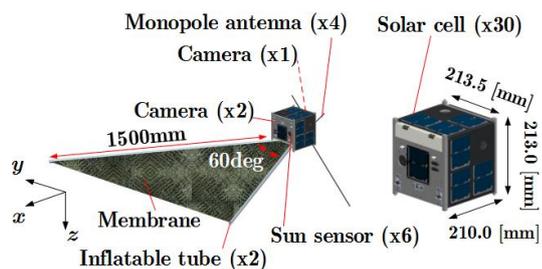


図 1.2 超小型衛星 SPROUT

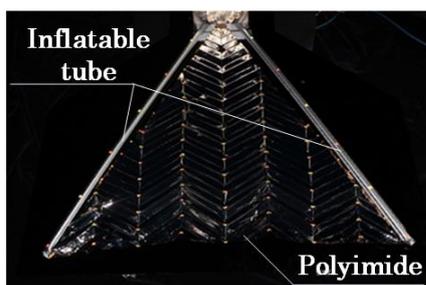


図 1.3 複合膜面構造物

1.3. 複合膜面構造物の展開システム

膜面及びチューブは収納機構に収納されている。収納機構を展開後、チューブに N₂ ガスを注入し、伸展するチューブが膜面を牽引することにより展開する。図 1.4 に膜面展開のシーケンスを示す。

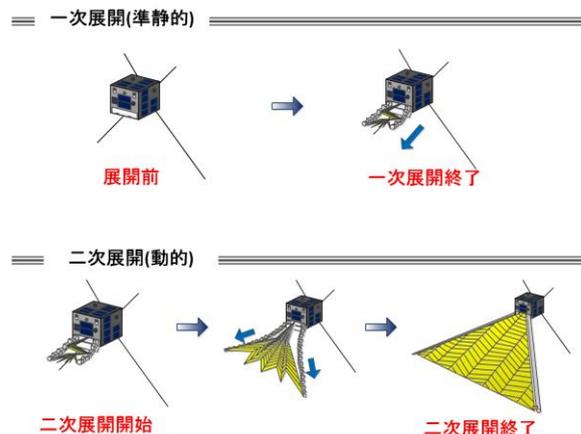


図 1.4 複合膜面構造物の展開シーケンス

また、図 1.5 に SPROUT のガス注入システムを示す。ガス注入システムは、ガスカートリッジ、SMA バルブ、ガスレギュレータ、電磁バルブとそれらを接合する配管で構成されている。ガスカートリッジは 12 [MPa] の圧力で充填されており、容量は約 20 [ml] である。SMA バルブはニクロム線によって加熱することによりニードルを伸展し、ガスカートリッジの蓋を押し当てることで蓋に穴を開ける。開放された窒素ガスは、レギュレータを介して約 200 [kPa] まで減圧される。その後、チューブ内の圧力が 50[kPa] になるように電磁バルブを用いて圧力制御を行う。

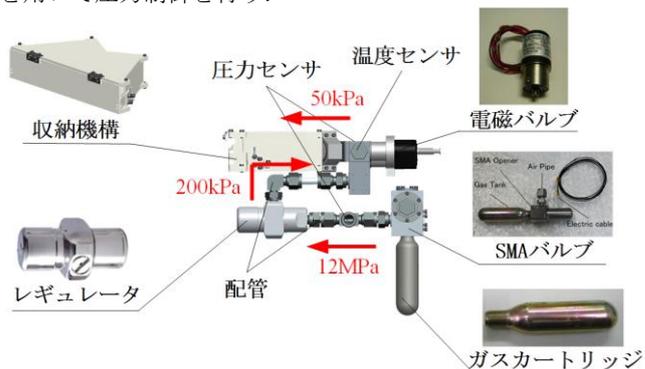


図 1.5 ガス注入システム^[2]

展開挙動の計測には 2 台のカメラを用いたステレオ視を用いており、膜面上のマーカの三次元位置座標を取得する。また、伸展時にはチューブ内圧、チューブの振動履歴、注入するガスの温度も同時に取得する。

1.4. 複合膜面構造物の軌道上実験

SPROUTは2015年6月に軌道上にて複合膜面構造物の展開を実施した。複合膜面構造物の展開時の連続撮影については、機器の不調により取得には至らなかったものの、改めて展開後に膜面の撮影を行った。その際の撮影画像を図1.6に示す。また、膜面展開時のガスタンク内圧とチューブ内圧の履歴を図1.7に示す。

膜面の撮影画像から、膜面上の折り目が伸びきっておらず、チューブも真っすぐには進展せず、右側のチューブについてはスパイラルのような状態となっていることがわかる。左側のチューブについても途中で湾曲し、膜面の裏側に隠れてしまっている。図1.7の圧力履歴より、ガスのリークが激しく、十分な伸展力が得られなかったことが原因の一つではないかと考えられるが、詳細な原因がこれらのデータだけでは不十分であり、より詳細な検証が必要である。

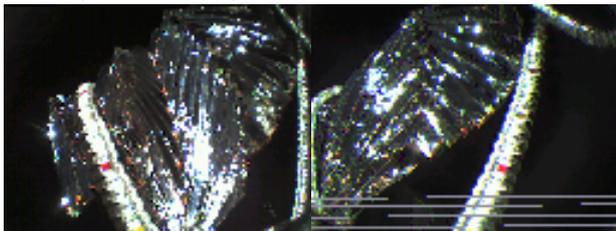


図 1.6 左右のカメラで撮影した軌道上の膜面画像

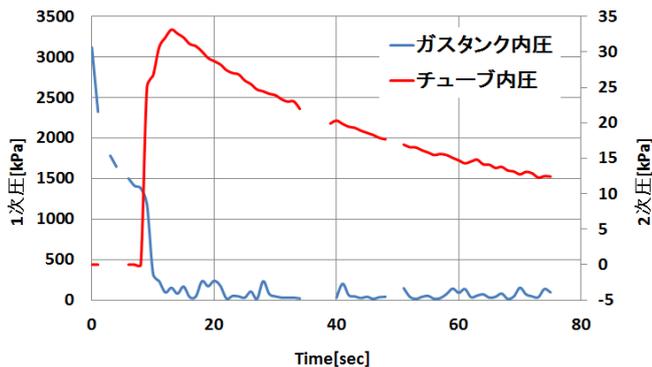


図 1.7 軌道上の膜面展開時のガスタンク内圧とチューブ内圧の履歴

2. 本研究の目的

軌道上にて、複合膜面構造物の展開実験を実施したが、その詳細な膜面形状の推定、やチューブのスパイラルといった不具合事象について検証を行う必要がある。そこで、本研究の目的を以下にまとめる。

- ・ 軌道上の複合膜面構造物の形状の推定を行う。
- ・ 複合膜面構造物の展開後形状について、その不具合事象の原因の推定を行う。

3. 本研究でのアプローチ

軌道上の複合膜面構造物の形状を推定するために、得られた画像データを用いてステレオ視による三次元位置計測を行う。画像の粗さから細部の計測が困難であるため、その画像データを元に、地上にて模擬撮影を行い、それにより軌道上の膜面形状を推定する。

また、展開後のチューブのスパイラルや、膜面の不十分な展開について、ステレオ視により得られた三次元位置座標やセンサデータより考察しつつ、航空機による微小重力実験における挙動とも比較し、複合膜面構造物の展開挙動について評価を行う。

4. 軌道上膜面の形状推定

4.1. ステレオ視による三次元位置座標の計測

ステレオ視により、膜面上のマーカの三次元位置座標を計測する。計測したマーカ位置を図4.1に、座標系定義を図4.2に示す。画像が粗く、読み取りが難しいため、読み取り易い6つの点について計測している。また、計測した結果を表4.1に示す。

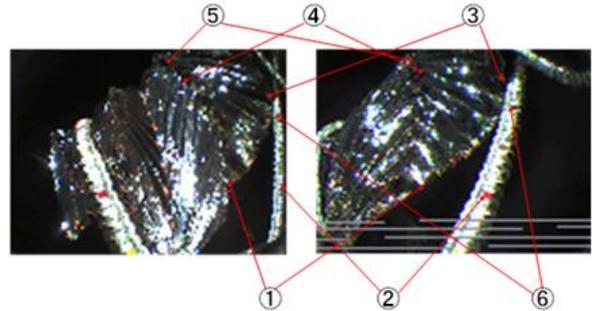


図 4.1 軌道上の撮影画像から読み取れる膜面上のマーカ位置

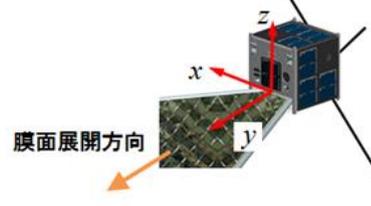


図 4.2 座標系定義

表 4.1 三次元位置座標の計測結果

番号	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
①	37.87	119.97	14.56
②	113.12	88.08	44.32
③	155.05	240.22	128.86
④	17.08	331.98	112.46
⑤	-27.73	387.32	139.91
⑥	165.32	204.73	95.66

4.2. 模擬撮影

軌道上の膜面画像と、そこから得られた三次元位置座標より、地上にて膜面の状態を再現し、軌道上を模擬した撮影を行った。その撮影画像を図4.3に、そのときの、衛星からの視線とは違った角度から撮影した膜面の様子を図4.4に、さらに模擬した膜面のマーカから膜面の形状を三次元計測した結果を図4.5に示す。

膜面形状の再現の度合いについて、表4.1に示した6点で比べると、最小で1[mm]ほど、最大でも50[mm]ほどのずれであったため、おおよその膜面形状の模擬は出来ているのではないかと考える。

チューブの形状を再現した結果、右側のチューブは大きくスパイラルし、左側のチューブも膜面の下に隠れる形で大きく折れ曲がっている。また、膜面の形状については、膜面の折り目の数と向きから、収納機構内部に膜面の一部が残っていると考えられる。

膜面の展開率については、X-Y平面上に投影した面積において膜面展開率を概算すると、約15.2[%]であり、膜面は展開しきっていないことがわかる。

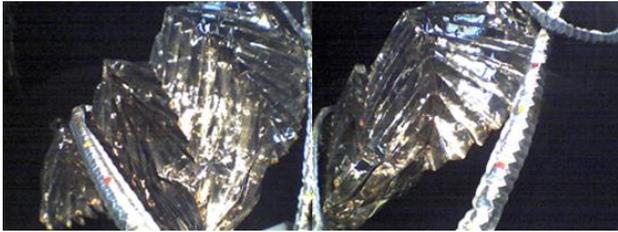


図 4.3 地上における模擬撮影の結果

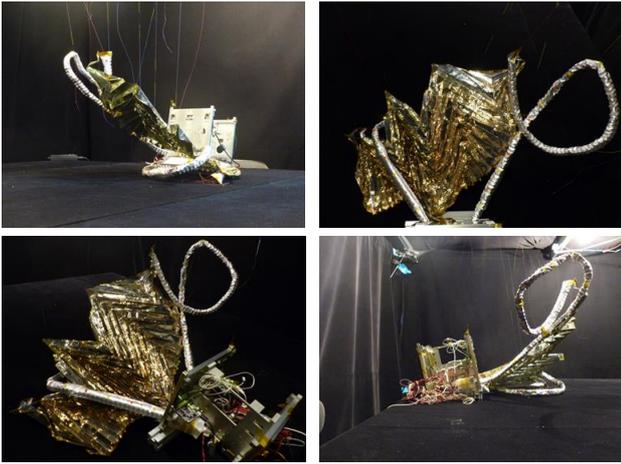
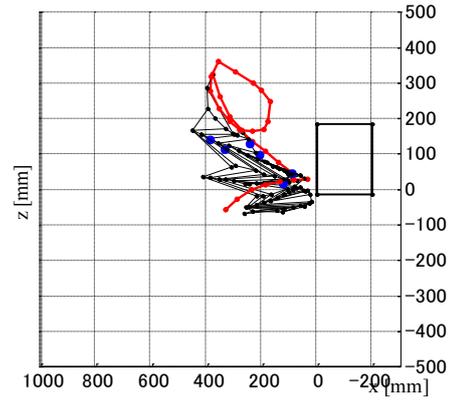
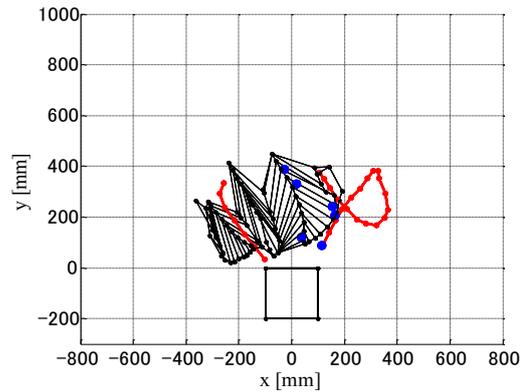


図 4.4 地上における模擬撮影の様子

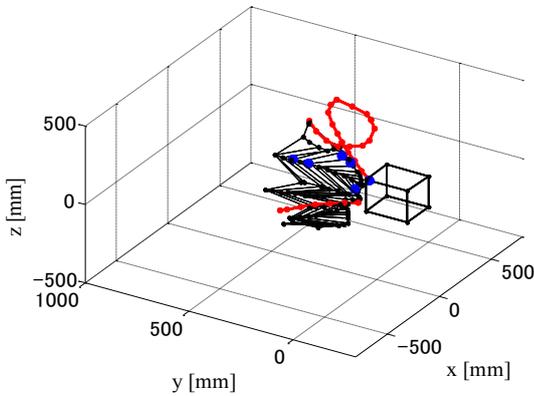


(b) 投影図 (xz 面)



(c) 投影図 (xy 面)

図 4.5 模擬撮影の復元結果 (続き)



(a) 立体図

図 4.5 模擬撮影の復元結果

5. 微小重力実験

軌道上では複合膜面構造物の展開挙動を撮影することが出来なかったため、微小重力下での展開挙動を計測するために航空機による微小重力実験を行った。

図 5.1 にはチューブのみと膜付きの伸展挙動を、チューブ内圧の履歴を図 5.2 に示す。また、膜面を付けた場合で、膜面が収納機構内部に引っかかってしまった展開の様子を図 5.3 に、その際のチューブ内圧を図 5.4 に示す。

チューブのみと膜付きの場合の挙動を比較する。チューブの内圧はどちらの場合もガス注入開始から 4 秒まではほぼ同じであるが、その挙動には大きな違いが見られる。チューブのみの場合には、微小重力下においてある程度曲がりながら伸展するものの、大きな湾曲なく伸展しきっている。しかし、膜面を付けた場合、膜面を牽引する際に湾曲が見られ、また、チューブのみの場合に比べ展開に時間がかかっており、膜面を付けた場合に大きな影響を受けていることがわかる。膜が引っかかり、拘束されている場合には、図 5.3 に示すようにさらに大きな湾曲を示すことがわかる。





2.525[sec]



3.525[sec]



4.525[sec]

図 5.1 チューブのみ及び膜付きの伸展挙動(上図：チューブのみ，下図：膜付き)

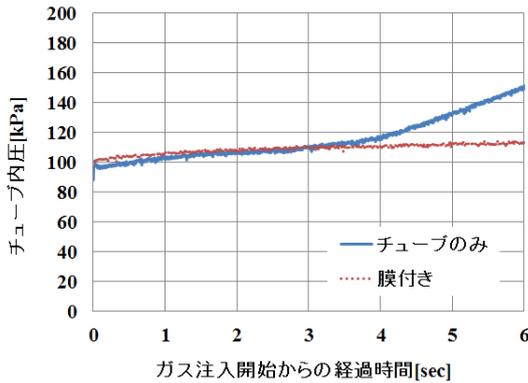


図 5.2 チューブのみ及び膜付きのガス注入開始からのチューブ内圧の履歴



図 5.3 膜面が引っかかった場合のチューブの様子 (ガス注入から約 8 秒)

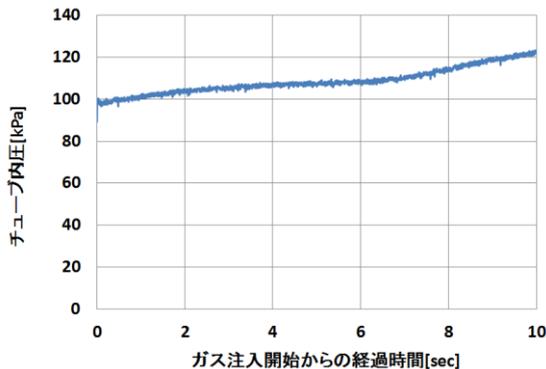


図 5.4 引っかかりが生じた展開のガス注入開始からのチューブ内圧の履歴

6. 考察

軌道上の膜面展開について、形状の推定結果より、膜面が展開し切らなかったことがわかる。また、チューブの形状に大きなスパイラルが見られた。膜面については収納機構内部に残っており、微小重力実験時の図 5.3 に示すように、膜面が引っかかってしまった可能性が考えられる。さらに、この場合もチューブに大きな湾曲が見られる。また、引っかかった膜面は微小重力環境から重力環境へと遷移する際、引っかかりがとれ、展開している。このことから、今回のような複合膜面構造の場合、軌道上での展開挙動を予測するには、重力下での展開実験だけでは不十分であり、微小重力実験のように、重力の影響を考慮した検証を行う必要があったことがわかる。また、軌道上においても、また引っかかりが生じた微小重力下での実験(図 5.3, 5.4)においても、予定していたチューブ内圧である 50kPa(微小重力実験においてはゲージ圧で 50[kPa])には到達していない。そのため、伸展力が十分であれば引っかかりを解消でき、十分な展開を行うことが出来た可能性が考えられる。

7. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 軌道上の膜面形状について、ステレオ視による三次元的な計測を行った。また、画像の粗さから計測が困難な箇所については、撮影画像を元に地上で形状を再現し、膜面の形状の推定を行った。
- 微小重力環境における複合膜面構造物の展開実験を行い、軌道上では得られなかった展開挙動の撮影を行った。
- 微小重力環境での実験結果から、チューブの伸展挙動には膜面の影響が大きいことがわかる。
- 軌道上の膜面の形状の推定及び微小重力環境での展開実験より、膜面が展開し切らなかった要因として、ガスリークや膜面の収納機構の引っかかりが原因の可能性として挙げられる。

今後の複合膜面構造物の研究・開発を進めていく上で、無重力環境下での、チューブの伸展挙動が牽引する際に十分な伸展力を予測する手法を模索していく必要がある。

8. 参考文献・出典

- [1] Higuchi, K., Aoki, T., Miyazaki, Y., Watanabe, A., Hori, T., Ito, H., Development Test of Inflatable Extension Mast for SIMPLE Verification, Proceedings of 57th Space Sciences and Technology Conference, pp. JSASS-2013-4676, 2013.
- [2] 大日向他, 「複合膜面構造物展開実証衛星「SPROUT」の膜面展開結果(第一報)」, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2111, 2015.