インフレータブルチューブを支持部材とする膜構造物の展開挙動

Deployment Behavior of Membrane Structure Using Inflatable Tube as Support Member

指導教授 宮崎康行

M5020 山田諭 Satoshi Yamada

Nano-Satellite Project Team of Nihon University developed a CubeSat named SPROUT, and launched it in 2014. They conducted a mission to deploy a membrane supported by two inflatable tubes in 2015. However, according to on-orbit photos of the membrane, it turned out that whole membrane structure spiraled drastically. Therefore, the author conducted the deployment experiment of the membrane under micro-gravity environment by the parabolic flight of an airplane, and the deployment experiment in 1G environment after a long-term storage of the membrane structure. This paper clarifies the reason why the membrane deployed imperfectly and estimates how the membrane structure deployed if the deployment succeeded. Furthermore, based on these results, the author suggested the points to improve the design of future membrane deployment structures.

## はじめに

日本大学の学生チームが設計・開発し,2014年5月に打ち 上げられた超小型人工衛星「SPROUT」は,2015年6月に軌 道上にて膜面展開ミッションを実施したが,膜構造物が完全 には展開しきらなかった.そこで本研究では軌道上膜面展開 の結果をまとめたうえで,さらに追加実験を行うことでその 原因の究明と完全に展開した場合の展開挙動の再現を行った. また,それらの結果を基に今後の膜面展開構造物の設計をす るにあたって改善すべき点の提案を行った.

### 1. 背景

# 1.1 超小型人工衛星「SPROUT」

近年,宇宙空間での大型宇宙構造物の構築方式として,軽 量で収納性・展開性に優れた膜面宇宙構造物が注目されている<sup>[1]</sup>. 膜面宇宙構造物の例としては,インフレータブルアン テナ実験機「SPARTAN」<sup>[2]</sup>や小型ソーラー電力セイル実証機 「IKAROS」<sup>[3]</sup>などが挙げられる.

日本大学理工学部航空宇宙工学科宮崎・山崎研究室でも小型人工衛星における膜面宇宙構造物の基礎技術実証試験の先 駆けとして、2014年5月24日に超小型人工衛星「SPROUT」 (Figure 1.1)を打ち上げ、管制運用を行っている.



Figure 1.1 Nano-satellite "SPROUT".

SPROUTは一辺が約20 cmの立方体, 質量約7.1 kgの超小型 人工衛星である<sup>[4]</sup>. SPROUTは将来の大型膜面展開宇宙構造物 に向けた展開実証というだけでなく,小型衛星特有の重量や 容量の制限がある場合においても軽量・高収納性を示すこと によってその特性を最大限に生かすことができる設計を目指 して学生が主体となって設計・開発した.

# 1.1.1 展開方式

SPROUTは2本のインフレータブルチューブと1枚の正三角 形の膜面で構成された複合膜面構造物を有している.チュー ブは長さ1562 mmの2枚のアルミラミネートフィルムを重ね て熱融着することにより貼り合せた後に八角形折りをするこ とで袋状に成形して製作した.膜面は片面アルミ蒸着ポリイ ミドフィルムを一辺が1540 mmの正三角形に切り出し、ミウ ラ折りをすることで製作した.チューブと膜面の形状・寸法 をFigure 1.2に示す.



Figure 1.2 Inflatable tube (left) and membrane (right).

チューブと膜面は収納機構に収納されており、収納機構の 蓋が開く(一次展開)と同時にチューブ内にN2ガスが注入さ れる(二次展開). 膜面は頂点の内2つがそれぞれチューブの 先端と接続されているため、チューブの伸展により牽引され て展開する(Figure 1.3).



Figure 1.3 Storage mechanism and deployment sequence.

SPROUT の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.ガスカートリッジには N2ガスが 12 MPa の圧力で充填されており, SMA バルブ内にあるニクロム線の 加熱により伸展したニードルによって蓋が押し当てられるこ とで穴が開く.開放された N2 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,電磁バルブを用いてチュー ブ内の圧力が 50 kPa になるように圧力制御される<sup>[5]</sup>.このシ ステムと展開した SPROUT 地上モデルを Figure 1.4 に示す.



Figure 1.4 Gas injection system and SPROUT model.

# 1.2 SPROUT の軌道上膜面展開結果

打ち上げから約1年後の2015年6月23日にメインミッション である軌道上での膜面展開を行った. SPROUTではステレオ 視によりチューブ・膜面に取り付けられた特徴点から三次元 位置を計測することを念頭に置いていたため, 膜面の左右か ら2台のカメラで撮影を行った (Figure 1.5). 特徴点とは光が 当たると反射するテープを切って作成したものであり, チュ ーブと膜面の決められた場所に複数箇所貼りつけてある.



Figure 1.5 Camera mounting position.

展開後に撮影した画像が以下のFigure 1.6である. この撮影 画像と,撮影画像から三次元位置復元した結果得られた三次 元位置座標を基に地上にて展開状態を再現した模擬撮影を行 った. その画像が以下のFigure 1.7である. また, Figure 1.7 を別角度から撮影するとFigure 1.8のようになった.



Figure 1.6 Deployment photos on orbit.



Figure 1.7 Shape reproduction photos in darkroom.



Figure 1.8 Shape reproduction photos taken from different viewpoints.

この結果から、チューブは大きくスパイラルし、膜面はめ くれ上がるような形状であることが明らかとなった.また、 これを三次元位置復元して膜面展開率を計測した結果、当初 予定していた80%を大きく下回る約15.2%ということが判明 した.

## 2. 研究目的とアプローチ方法

本研究では以下のアプローチに従い,「展開失敗の原因の究 明と完全に展開した場合の展開挙動の再現をすること」を目 的として研究を行う.

(1) 軌道上の膜面の状態を確かめたうえで、原因の推測をする.(2) 推測した原因を基に実験のパラメータを決め、実際に実験

(航空機微小重力実験と長期収納後展開実験)を行う.

これによって推測の妥当性の検証とともに,無重力と長期 収納が複合膜面にどのような影響を与えたのかを検証し,考 察をする.

## 3. 実験

### 3.1 航空機微小重力実験

展開の検証を行うにあたり、宇宙空間特有の環境である微 小重力環境を模擬するため、航空機がパラボリックフライト することで作り出した微小重力下で再現実験を行った.その 際、カメラ撮影による展開動画、チューブに流入するガスの 温度・圧力、および、チューブ表面に貼付したピエゾセンサ によるチューブの歪の時系列データを取得した.構造物は鉛 直下向きに展開させ、2台のカメラで膜面の面と垂直方向から 撮影を行った. Figure 3.1に使用した航空機及び機内レイアウ トと実験装置配置のイメージ図を示す.



Figure 3.1 Image of experiment layout (1100 mm membrane model).

# 3.1.1 実験実施項目

実験実施項目をTable 3.1に示す. 航空機内で行うことがで きる実験回数やスペースに制限があるため,実験実施項目は 以下の要件を満たすように選定した.

- ▶ サイズは実寸大のものだけでなく、実寸よりも小さい縮小 モデルでも大まかな挙動をみる.
- ▶ チューブによる影響と膜面による影響を切り分けられる ようにする.
- ▶ ガス注入圧の違いによる変化をみる.
- ➤ 回数は製造誤差による違いの影響と重要度を考慮し実寸 大のものを優先して行う.縮小モデルについては製造誤差 の影響が小さくなると考えられるので,各1回ずつ行う.

	Tubes + membrane	Pressure	Number
Size	or	control	of
	Only tubes	value	times
440 mm (Tube: 462 mm)	Tubes + membrane	30 kPa	1
		50 kPa	1
		70 kPa	1
	Only tubes	30 kPa	1
		50 kPa	1
		70 kPa	1
1100 mm	Tubes + membrane	50 kPa	3
(Tube: 1122 mm)	Only tubes	50 kPa	2
1540 mm (Tube: 1562 mm)	Tubes + membrane	50 kPa	3

### Table 3.1 Experiment contents.

## 3.2 長期収納後展開実験

SPROUTでは打ち上げから膜面展開までに約1年の時間が あった.そこで,航空機微小重力実験では検証することがで きなかった長期収納による影響をみるため複合膜面構造物の 長期収納展開実験を行った.供試体には複合膜面構造物収納 後,約3年5か月間保管してあった物を使用し,大気下・重力 下でエアーコンプレッサーを用いて50 kPaのガス圧にて展開 させた.その際,カメラ撮影による展開動画を取得した.構 造物は治具に設置したアクリル板に沿うように展開させ,2 台のカメラで膜面全体を,1台のカメラで記録用として本来衛 星がある方向から撮影を行った.Figure 3.2に実験装置配置の イメージ図を示す.



# 4. 実験結果

## 4.1 航空機微小重力実験

展開実験の結果,「膜面サイズ1540 mm, チューブ+膜面, 50 kPa」の実験の内1回で,展開時に膜面が収納機構内部で引 っかかることによって展開が妨げられる現象が発生した (Figure 4.1).



Figure 4.1 Deployment restraint by catching the membrane.

軌道上膜面展開において膜面が拘束されたであろう位置は, 最後に膜面を収納機構内に収納するときの「く」の字型の折 り目付近であるとみられる.この場所には膜面の折り目が集 中しており,段差(高さ)が付きやすい.「く」の字型の折り 目は,打ち上げ前に地上で展開試験をしているときにも引っ かかったことがある場所である(Figure 4.2 左).今回の航空 機微小重力実験で膜面が拘束された位置も,画像を見ると「く」 の字型の折り目付近である(Figure 4.2 右).



Figure 4.2 Restraint of membrane by fold. (left: Ground simulation, right: Micro-Gravity experiment)

膜面やチューブが引っかからなかった場合においては,展 開途中のチューブの動きについて三次元位置復元を行った. その結果すべての実験パターンについてチューブが展開方向 に対して上側に湾曲しつつ展開していることが判明した.ま た,膜面が付いていないチューブのみの場合でも実験を行い 三次元位置復元したところ,同様に湾曲しながら展開をして いた.さらに,膜面がある場合とない場合で比較すると,膜 面がある場合の方が展開しきるまでに時間を要していた.

### 4.2 長期収納後展開実験

次に長期収納後展開実験を行った結果,一次展開時にはチ ューブも膜面も復元力によって押し出されることはなく (Figure 4.3 左),ガスを注入する二次展開時においても膜面 が収納機構内部に引っかかることによって展開が妨げられる 現象が発生した(Figure 4.3 右).この後に手で牽引しつつ展 開をさせようとしたものの複数の特徴点の粘着層が膜面とく っついていたこと,チューブが2本とも完全に折れ曲がってし まったことから50 kPaで展開しきるということはなかった.



Figure 4.3 Primary development and secondary deployment.

膜面が拘束された位置は航空機微小重力実験同様,「く」の 字型の折り目付近であった.

# 5. 考察·結論

航空機微小重力実験での展開については、膜面の有無に関 わらずチューブが湾曲しながら展開していることが見て取れ た. したがって湾曲することに関してはチューブ自体に原因 があることが推測できる.また、膜面がある場合の方が展開 しきるまでに時間を要していたことから、膜面の展開がチュ ーブの展開を妨げる方向に影響を与えていたことがわかる. さらに展開の様子を細かく見ていくと,展開初期のチューブ のたわみが展開後期の形状に影響を与えていることがわかっ た. このことより、チューブにあらかじめ付いていた曲がり 癖がそのまま残る形で最終形状に達しているといえる. 展開 初期にたわみが付く原因としては、チューブは収納機構に収 納する際に伸展とは逆方向に圧縮して押し込んでいるが、収 納機構はチューブの太さよりも若干幅が広くなっているため 圧縮した状態では全体的に波打ってしまっていたことが考え られる.実際、フライトモデルのチューブ収納時の画像を確 認したところ、圧縮されている段階でチューブが波打ってい た (Figure 5.1)



Figure 5.1 State of tube storage.

また、二次展開にてガスが注入されると、一次展開時に付いてしまっている曲がり癖に沿ってガスが流れるため、カー ブの外側にガスの力が集中してしまう. さらに膜面が付いている場合は、膜面の方が展開するのに時間がかかるので、チューブは膜面に引っ張られてより大きく湾曲することで最終 形状に至ることが考えられる.

構造物が展開しきらなかった直接の原因としては航空機微 小重力実験,長期収納展開実験と過去の地上試験にて確認さ れた膜面の折り目が集まって高さ方向に厚みが出ている部分 が収納機構との摩擦によって引っかかったことだと推測でき, これは軌道上での撮影画像と比較しても整合性が取れている.

### おわりに

本研究では軌道上の結果を基にその再現と原因の解明,完 全に展開したらどうなるかを明らかにするために2つの実験 を行った.それらの結果から膜面の引っかかりが起きたこと が明らかとなったものの、これを回避するためには単にガス 圧を高くすればいいというものではない.ガス圧に関しては、 高くしすぎるとチューブの破裂を招くことが耐圧試験によっ て確認されている.実際、軌道上での50 kPaという数字はそ の耐圧試験の結果から導き出された値である.したがって完 全に展開させるためには、収納機構・チューブ・膜面・特徴 点いずれかの構造を変えなければならない.

例えばFigure 5.2に示すようにチューブと膜面の部分で収 納機構寸法を変えることもその一つである.チューブは収納 機構に引っかかる現象は今までに確認されておらず,引っか かったのはどの展開の場合でも膜面のみである.現在の設計 では収納機構内部の縦方向の高さは基本的に膜面のミウラ折 りの折り幅基準で設計されているためチューブにとっては縦 方向に緩く,膜面にとってはぎりぎりの幅である.そこで, チューブの収納部はもう少しチューブの縦幅に沿って狭くす る.また,チューブの横幅方向にも狭くすることでチューブ の全体的なたわみを防止できる (Figure 5.2 青枠).膜面の収 納部については縦方向にもう少し広くする (Figure 5.2 橙枠). これは新たな展開方法を構築することに比べれば,比較的簡 易に実現でき,重量や容量もそれほど変化が伴うものではな い.この収納機構の内部寸法設計の考え方はSPROUT以外の 膜面展開構造物についても同様に応用できるものである.



Figure 5.2 Improvement plan of storage mechanism.

今後の課題としては数値解析において実験結果の妥当性を 評価するとともに、より多様な複合膜面構造物の展開挙動を 事前に推定し、収納時の条件までも考慮した展開構造物の設 計ができるようになることを目指す.

#### 参考文献

- 嶋崎信吾,村田亮,丸木悠暉:パラボリックフライトによる微 小重力環境を利用した柔軟宇宙構造物の軌道上挙動推定法. Int. J. Microgravity Sci. Appl. Vol. 31 No. 3, 2014, p.142.
- [2] NASA SPINOFF TECHNOLOGY TRANSFER PROGRAM, CY BERNET: Solid-State Recorders Enhance Scientific Data Collect ion. At. <u>https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/ct\_8.html</u>.
- [3] 奥泉信克,白澤洋次,宮崎康行,森治:小型ソーラーセイル実 証機IKAROSの薄膜セイル展開挙動.日本マイクログラビティ 応用学会誌 Vol. 29 No. 1, 2012, p.48.
- [4] 大日向健人、日本大学超小型人工衛星開発チーム、山崎政彦、 宮崎康行:複合膜面構造物展開実証衛星「SPROUT」の運用速 報及び今後の計画.第58回宇宙科学技術連合講演会、 JSASS-2014-4513, 2014, p.1.
- [5] 丸木悠暉: 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. 日本大学大学院修士論文, 2016, p.6.