

# インフレーターチューブを用いた膜面宇宙構造物の設計法の研究

## Study on Design of Membrane Space Structure Using Inflatable Tube

指導教員 宮崎康行

M9021 藤井大輔

### 1. 緒言

#### 1.1. 膜面宇宙構造物

今日の宇宙開発において、衛星用アンテナ、太陽電池パドルなどの物理的に大きいほど利用価値が高まる構造物は大型化が進んでおり、小さく収納した状態で打上げて宇宙で大きく展開する軽量の膜面宇宙構造物への期待が高まっている。

膜面宇宙構造物は薄くて柔らかいため大気や重力の影響を受け易く、宇宙と地上では構造特性や挙動が大きく異なることが予想される。しかし、地上で宇宙環境を模擬した実験は時間やコストがかかり、また実機と同等のスケールで完全に宇宙環境を模擬することは困難である。そこで、事前にクリティカルな問題を把握し、膜面宇宙構造物の展開を保証するためにも数値シミュレーションによる補完が必要となる。一方、製作の面でも薄くて柔らかい膜面は機械的な加工が難しく、手作業による工程が必要となり高い精度での製作や初期不正や製造誤差の除去は事実上不可能である。このことから過剰な補強といったオーバースペックとなることも少なくなく、膜面宇宙構造物の設計法はこれらの問題を考慮した上で、実機の開発に適用できることが必要となる。

#### 1.2. 超小型人工衛星 SPROUT

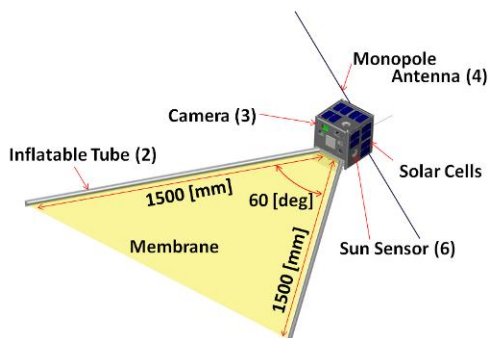


Fig.1 SPROUT と膜面宇宙構造物

SPROUT は 20[cm]立方、質量約 5.3[kg]の人工衛星で、一辺が 1.6[m]の正三角形の膜面宇宙構造物を衛星内部に収納している。これを軌道上で展開させ、空気抵抗を増加させることで軌道降下を行う人工衛星である。

この SPROUT の膜面は膜面宇宙構造物の典型的な一例であり、将来的に想定している構造物と比べると 1.5[m]と小型ではあるが、1.1 節で述べた課題を同様に含んでいる。逆にこの大きさの膜面構造物ですら宇宙

実証されていないのが現状であり、前述した課題を解決できるような設計を行い、設計法を構築することができれば、膜面宇宙構造物の技術実証そして実用化を行う上で重要な成果となる。ならびに、その設計法は大型の膜面宇宙構造物の設計にも反映することができ、大型膜面宇宙構造物を用いた今後の宇宙ミッションの成功に貢献することができる。

#### 1.3. 研究目的

膜面宇宙構造物は軌道上での実績が少なく、明確な設計手法や試験基準を示せるほどのデータの蓄積があるとは言いがたい。また、技術実証の場となる軌道上実験の機会は打上の面からも限られる。

そこで、低コスト・短期間での開発が可能で打上機会も豊富な超小型人工衛星に膜面構造物を搭載した SPROUT を題材に、地上検証や数値シミュレーション、製造面での問題を考慮した設計・評価を行うことで、技術実証に向けたデータの蓄積と設計法の構築を図る。

### 2. 膜面宇宙構造物の設計

#### 2.1. 設計上の問題点

膜面宇宙構造物を設計するには、以下の 3 点が問題となる。

- 宇宙環境を模擬した地上実験はコストがかかり、大気や重力の影響を完全に除去することはできない。
- 大型化が必要とされるため、重量増加等を伴うようなオーバースペックを許容する設計には限界がある。
- 製作・加工に手作業が必要となり、高い精度を要求することや初期不正の除去が困難である。

#### 2.2. パラメータ設計を用いたアプローチ

そこで、効率良くロバストな機能設計が可能なパラメータ設計を適用することで、初期不正や製造誤差が構造特性や展開挙動に与える影響を感度解析により定量的に評価し、低減させることで再現性を持たせつつ、これらを許容できるパラメータを選択する。更に、費用やスケールの面からも回数を多くこなすことのできる要素技術の地上検証に重みを持たせ、宇宙環境を模擬した上位の試験で試行するパターンを厳選することで地上での検証実験を効率的・系統的に行うことも狙っている。また、数値シミュレーションでも同様にパ

ラメータ設計を行うことで、シミュレータの精度向上を図ると共に、下位の地上検証と上位の地上検証の間の補完、軌道上での実証となる実機的设计へのフィードバックを行う。

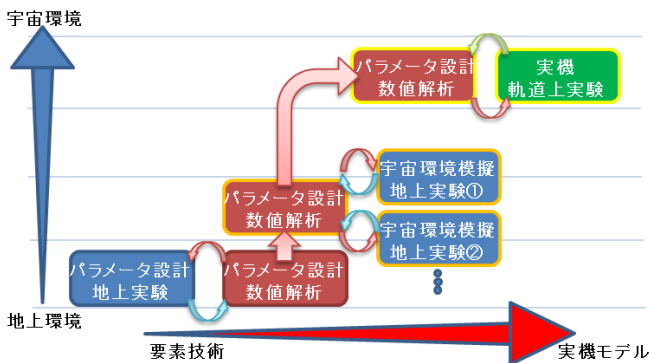


Fig. 2 設計プロセス

### 3. パラメータ設計

パラメータ設計とは、システムにおいて意図した出力値を得る際にノイズがあったとしても出力がばらつかず目標値を満たし、システムの基本機能が理想的な状態に近付くようにパラメータを設定する手法である。

パラメータ設計の特徴として次の3点が挙げられる。

- ① ノイズを除去するのではなく、パラメータの組み合わせによりノイズの影響を抑えることが目的。
- ② 繰り返し実験により偶然誤差が生じるのを待つのではなく、意図的にノイズを条件  $N_1, N_2$  として与えることにより少ない実験回数で効率的に評価する。
- ③ パラメータの出力変動、出力平均に対する効果をSN比と感度を使って次式により定量化できる。

【SN比】  $\eta = 10 \log \beta^2 / \sigma^2$  [db]

入力に対する出力のばらつきの程度を表わし、高い値であるほどばらつきが少ない。

【感度】  $S = 10 \log \beta^2$  [db]

入出力間の傾きの大きさを表わし、高い値であるほど入力に対する出力が大きい。

ここで、出力のばらつきとは理想機能と考える入出力間の比例関係からのばらつきのことを指し、 $\sigma$  は標準偏差、 $\beta$  は入出力間の傾きである。 [1][2]

### 4. SPROUTの膜面宇宙構造物

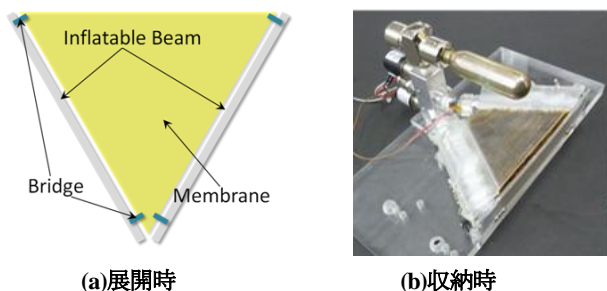


Fig. 3 膜面構造物の構成

SPROUTの膜面構造物は内角  $60^\circ$  に配置された長さ 1.6[m] (衛星からの露出部分は 1.5[m])、直径 20[mm] の2本のインフレータブルビームと、その間に取り付けられた一辺 1.6[m]の正三角形ポリイミドフィルム膜から成る。これらは左右ビーム根元と先端の計4か所をブリッジにより結合されており、各々異なった折り畳み方で衛星内部の収納機構に拘束されている。拘束を解き、インフレータブルビームにガスを注入することでビームが伸展し、その伸展力で膜面が展開される。

#### 4.1. インフレータブルビーム

インフレータブルビームには Fig.4 に示す厚み 85[um]アルミラミネートフィルムを用い、ビームの折り畳み方は以下の理由により示す8角形折りとし、機械で畳めないため、全て手作業によって行った。

- ①  $D = 20[mm]$ の細いチューブ状に成型されたフィルムでも容易に折り畳むことができる。
- ② インフレーションガスの流路面積をビーム断面積のおよそ  $1/15 \sim 1/2$  まで確保できる。

このビームは内圧によって生じる塑性変形により硬化し、強度を得る構造物であり、ミッション期間中に加わる負荷に対しては十分な強度を有する設計になっている。フィルムの積層構造を Table1 に示す。

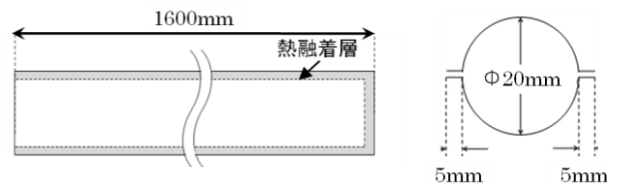


Fig.4 インフレータブルビーム

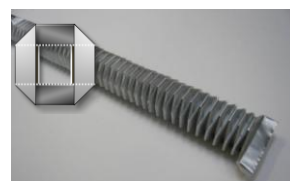


Fig. 5 8角形折り

Table1 積層構造	
外面	
15um	酸化ケイ素蒸着ナイロン
20um	アルミニウム
50um	LLDPE(熱融着材)
内面	

#### 4.2. 膜面

膜面は厚さ 12.5[um]の片面アルミ蒸着ポリイミドフィルムを使用しており、ミウラ折りにより収納機構に収まるサイズまで折り畳まれている。

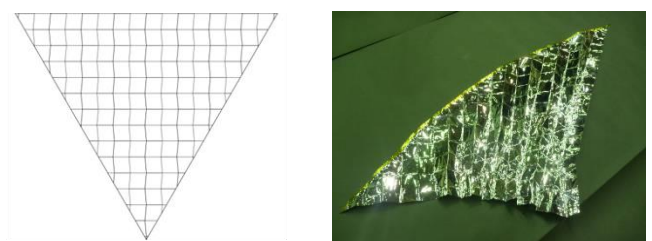


Fig.6 ミウラ折りの三角形ポリイミド膜

ミウラ折りは収納効率が非常に高く、対角方向に引っ張る力だけで簡単に全体を開くことができ、また折り目の山谷が反転することなく、重なることもないためスムーズな展開が可能なことから、膜の折り方として選定した。しかし、薄くて柔らかい膜面は折り目がつけにくく、人の手で折るにはSPROUTの膜の収納サイズが小さいため、正確に折り畳むには技術が必要である。また、SPROUTの膜面は1枚の原反から切り出せないため複数の膜面をカプトンテープで貼り合わせて製作しており、亀裂伸展を防ぐために末端にも同様にカプトンで補強している。補強部分は局所的に厚く硬いため、展開時の収縮が強く均一に展開しないことがある。これはカプトンテープを細くすることで対処している。

## 5. 設計・評価

### 5.1. パラメータ設計の適用範囲

膜面構造物の確実な展開を目的に、SPROUTの膜面構造物のうち展開制御を担っているインフレーターブルビーム1本を600[mm]まで短くしたものに對し、大気圧下・鉛直下向き展開にて行った。これは作業・コストの面から実験回数を多くこなせる要素技術に絞った為であり、真空槽内や実機サイズのビーム、膜面に対してはこの結果を元に行うことで効率化を図っている。

また、手作業によるインフレーターブルビームの特性ばらつきを抑制するようパラメータ設計を用いることで、次の2つの利点が生まれることを狙った。

- ① 折り目にばらつきがあっても、展開挙動に再現性のあるインフレーターブルビームを設計できる。
- ② 人が折り畳むことにより生じる折り目のばらつきの、展開挙動に対する影響を定量的に評価できる。

### 5.2. 基本機能

パラメータ設計を行うにあたり、インフレーターブルビームの基本機能を次のように設定した。

【入力】ビーム長さ

$$M_1 = 300[\text{mm}], M_2 = 450[\text{mm}], M_3 = 600[\text{mm}]$$

【出力】 $y_1$  : 展開時のビーム先端の最大たわみ[mm]

$y_2$  : 展開時のビーム先端の経路長[mm]

【ノイズ】 $N_1$  : 展開図に沿って折り畳む条件

$N_2$  : 展開図なしで折り畳む条件

【パラメータ】※Table2参照

Table 2 パラメータとその水準

制御因子	水準		
	1	2	3
A 糊しろ向き	同方向	逆方向	-
B 基準流路面積	25mm <sup>2</sup>	49mm <sup>2</sup>	81mm <sup>2</sup>
C テープ	順テープ	テープなし	逆テープ
D ガス圧力	35kPa	50kPa	65kPa
E ガス流量	4l/min	6l/min	8l/min
F 押し潰し量	1/10	3/40	1/20
G 収納率	固定なし	3/20	1/10
H -	-	-	-

ビームの長さを入力としてパラメータ設計を行うことで、長さを変えたとしても再現性のある展開挙動を示すインフレーターブルビームの設計方法を示すことができる。これにより、要求される長さが決まる前から開発が可能であり、開発期間の短縮にも繋がる。折り目のばらつきをノイズとして意図的に与えるために、折り畳むビームに展開図を書くか否かで状況の違いを作った。

ここで、表1の水準とは制御因子毎に設定できる値であり、後述する直交表の大きさにより因子と水準の数が決まり、空欄の制御因子Hは誤差計測用の因子である。また、出力を2つ設けることで、1度の実験で最大たわみと経路長それぞれに対してパラメータ設計を行った。

### 5.3. 設計手順

Table2で示したパラメータの組み合わせにおいて、どのパラメータが出力の変動を変え、どれが出力の平均を変えるのかを効率よく系統的にデータを収集・解析できる実験計画法の直交表 $L_{18}$ (表2)を用いる。表2に従って作成した18個のパターンすべてに対して $M_1, M_2, M_3$ と $N_1, N_2$ の組み合わせ、計6通りの実験をそれぞれ行い、各制御因子の水準のSN比と感度Sを算出する。その結果からSN比が最も高い水準を組み合わせることで、出力のばらつきが最も小さく、再現性のある展開挙動を示す水準の組み合わせを求める。この時点ではまだ推定に過ぎないため、実際にそれを作成して確認実験を行うことにより、パラメータ設計が妥当であったかを評価する。

### 5.4. 地上実験

#### 5.4.1. 実験概要

18パターン各々に $M_1, M_2, M_3$ と $N_1, N_2$ の組み合わせ6通り、計108通りのチューブを展開装置に固定した状態から鉛直下向きに伸展させ、2方向から動画撮影することで展開時のビーム先端の最大たわみの計測を行った。この実験結果から各制御因子のSN比と感度を求め、最適化したビームと、比較用のビームのSN比と感度を各々予測し、伸展実験により実験の再現性の確認を行った。

#### 5.4.2. 実験結果

SN比が高くなる水準の組合せを便宜上最適条件と呼び、最適条件の改善率を評価するためにSN比を低くなるよう組合せたものを参照条件と呼ぶ。これら2つの条件に対して同様の実験を行いSN比と感度を算出し、推定値と比較した結果をTable4に示す。

Table3 直交表 $L_{18}$

パターン	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

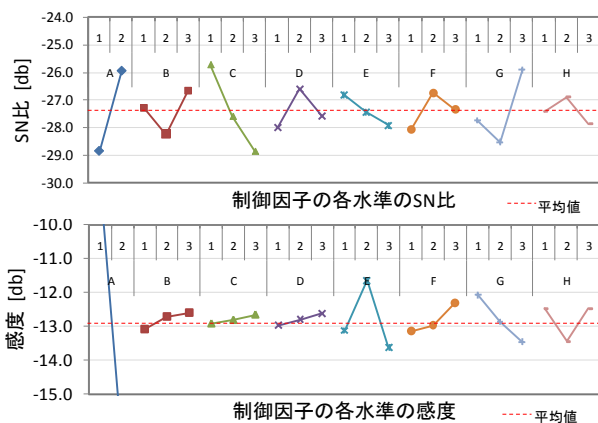


Fig.7 SN比と感度の要因効果図

Table4 再現性確認実験の推定値と実験値

	SN比(db)		感度(db)	
	推定	確認実験	推定	確認実験
最適条件	-22.04	-21.90	-17.96	-18.06
参照条件	-32.31	-31.06	-10.01	-10.42
利得	10.27	9.16	-7.95	-7.63
確認実験-推定値	1.11		-0.32	

今回、出力の平均が小さくなるならないに拘わらず、ばらつきである分散が小さい方がいいため、SN比から $\beta^2$ を消去して $\eta = 10 \log 1/\sigma^2$  [db]として評価した。表3より、SN比と感度共に再現性があり、パラメータ設計による推定が妥当であることがわかる。

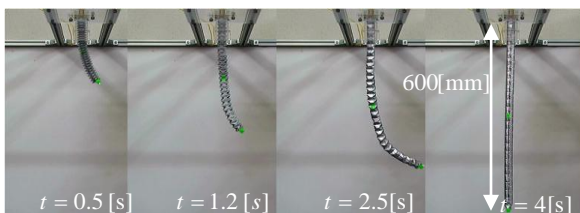


Fig.8 伸展するインフレータブルビーム

この結果から以下のことが言える。

- ① 手作業による構造特性のばらつきは定量化でき、低減することで再現性を確保することが可能である。
- ② 流量は小さいほど展開挙動がばらつかない。
- ③ 根元から先端にかけて流路面積を小さくし、折り目の数を減らすと挙動が安定する。

## 6. 設計結果の適用

前節のパラメータ設計結果がSPROUTの膜面構造物にどう反映されたかを、開発状況を添えて報告する。

### 6.1. インフレータブルビームの構成変更

パラメータ設計ではチューブ状に成型された状態で購入していたビームを、性能向上のためフィルム状態で購入したアルミからシーラーで熱融着することで自作することとなった。また、フィルムの構成も85[um]→52[um]→75[um]と二転している。理論では十分な剛性を得られるとの判断から、より折り畳み易い52[um]厚に変更したが、熱解析結果を基にしたビームの耐熱・耐圧試験を行った結果、薄いフィルムは極低温・

高温環境下での耐圧性能の低下が著しいことから、最終的に75[um]のフィルムへと再変更している。

Table5 変更後の積層構造

外面
15um 酸化ケイ素蒸着ナイロン
20um アルミニウム
40um LLDPE(熱融着材)
内面

## 6.2. 膜面との結合

正三角形膜用の薄いポリイミド膜が入手困難となり、以前の倍の厚みの膜面を採用したこと、膜の亀裂を防ぐ端末処理にカプトンテープを膜面に貼ったことから、折り畳んだ状態での膜面の折り目剛性が大幅に増加し、インフレータブルビームと結合させるとビームが膜に引っ張られ、展開中にビームが大きいたわむ、若しくは座屈してしまう現象が顕著に現れた。



Fig.9 水平方向, 展開中 Fig.10 鉛直下向, 展開後形状

同様に膜面構造物の展開後形状にも影響し、全体的に内側に収縮するため展開後面積の減少が問題となっている。これは実験方法の問題でもあり、鉛直下向きに展開した場合は膜とビームの自重も影響し、水平方向に滑らせながら展開した場合は床面との摩擦も影響してくる。

このことから、大気や重力影響を十分なレベルでキャンセルする、若しくはその影響を切り分けて考えられる地上検証を考案していく方向性と、数値シミュレーションによる膜面を追加したパラメータ設計などの補完の方向性が必要である。

## 7. 結言

- 手作業による構造特性のばらつきは定量化でき、低減することで再現性を確保することが可能である。
- パラメータ設計を用いて、製造面での初期不正を考慮した設計を行い、有用性を示した。

## 8. 参考文献

- [1] <http://www.jspec.jaxa.jp/activity/ikaros.html>
- [2] 田口玄一, ロバスト設計のための機能性評価, 日本規格協会, 2000
- [3] 藤井, 宮崎, “品質工学を用いたインフレータブルビームの設計法”, 第51回構造強度に関する講演会, JSASS-2009-3071, pp.205-207.