

展開膜面構造物に関する研究

宮崎研究室

村田 亮, 神田 智文

1. 緒言

近年、宇宙構造物において、ソーラーセイルや大型太陽光パドル・大型アンテナなどの大型構造物が注目されている。これら宇宙における大型構造物はロケットで打ち上げる際のペイロードより、軽量で展開が可能であり高収納であることが望ましい。このような観点より、現在、インフレータブル構造物や薄膜構造物といったゴッサマー構造物を宇宙で実用化するため研究が盛んに行われている。インフレータブル構造物・薄膜構造物の利点として、軽量・高収納であり部品数が少なく、構造が簡素で複雑なシステムを必要としないことが上げられる。しかし、その膜面の軽量さと柔軟さから、地球の重力の影響や空気抵抗によって地上で実験することが困難である。また、宇宙において薄膜構造物がどのような挙動を示すかシミュレーションによって解析する必要があるが、真空・無重力である宇宙と同条件における実験を地上ですることは困難であり、シミュレーションの妥当性を示すことができない。したがって、解析にフィードバックできる軌道上の実証例が必要となってくる。



Fig.1.1 ゴッサマー構造物の代表例 (左図:木星セイル, 右図:受動型通信衛星 ECHO)

2. インフレータブルチューブに関する研究

インフレータブル構造物とは袋状の薄い膜面で構成され、インフレーションガスを注入することで構造を維持するものである。この構造物は、収納性に

優れ、軽量であることが特長である。また、従来までの構造物に比べ、複雑な展開機構を必要とせず、部品点数の大幅な削減が可能であり、信頼性・製造コスト・開発期間の短さなど多くの点で圧倒的に優れている。一方で、薄い膜面を機械的に折り畳む技術が確立していないために、人の手で折り畳んでいるのが現状である。インフレータブル構造物の折り畳み方は展開挙動に強く影響する重要な要素であり、手作業による折目のばらつきは意図せぬ展開挙動を発生させる原因の1つである。また、本研究室で開発している超小型人工衛星「SPROUT」ではアルミラミネートフィルムを張り合わせて作製したチューブを使用するため、製作の段階でばらつきが生じることが予想される。そこで、手作業によって折りたたまれたインフレータブルチューブを題材とした曲げ剛性の算出方法の提案、および手作業による影響を評価することで、宇宙インフレータブル構造物の更なる発展を目指す。



Fig.2.1 Inflatable Antenna 展開の様子

2.1. 目的

超小型人工衛星 SPROUT で使用するためのインフレータブルチューブを自作し、塑性硬化法させた後の曲げ剛性を計測する実験方法を考案する。さらに、算出した曲げ剛性の値から、作製したインフレータブルチューブの作製精度と折目の影響を明らかにする。

2.2. 理論

長さ l の片持ち梁の先端荷重 P [N]と先端のたわみ w の関係より、曲げ剛性は次式のように表せる。

$$EI = \frac{l^3}{3} \cdot \frac{P}{w} \quad (2.1)$$

また、インフレータブルチューブを Fig.2.3 に示すような中空梁として取り扱う。

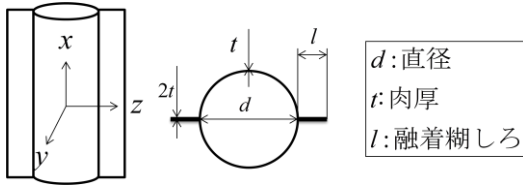


Fig.2.2 チューブの解析モデル

解析モデルの断面図より、 z 方向の曲げ剛性 EI は次式で表せる。

$$EI = E \left[\frac{\pi}{8} d^3 \cdot t + \frac{2t}{12} \left\{ (d+2l)^3 - d^3 \right\} \right] \quad (2.2)$$

2.3. 実験

(2.1)式を用い、インフレータブルチューブの曲げ剛性を算出するため、100[KPa]で塑性硬化後の1.6[m]のチューブの先端に引っ張り荷重を加え、座屈するまでの荷重と変位の履歴を記録する。線形性を有すると思われる範囲で線形近似を行い、 P/w を求める。折目ありのチューブは、座屈後に再度加圧し同様の実験を行う。ただし、荷重の最大値を座屈荷重とする。

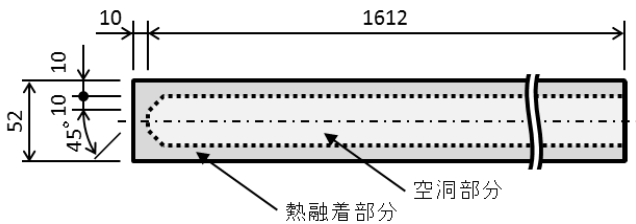


Fig.2.3 使用するチューブ



Fig.2.4 曲げ試験

2.4. 実験結果・考察

折目なしのチューブの荷重-たわみ線図を Fig.2.5、折目ありのチューブの荷重-たわみ線図を Fig.2.6 に示す。

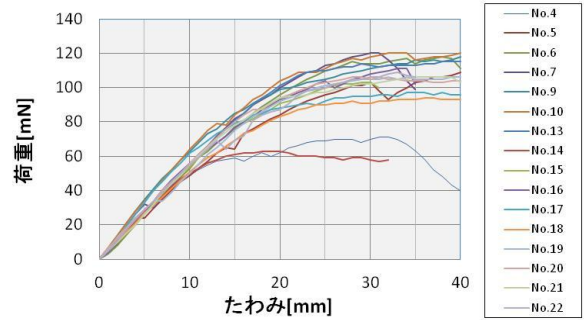


Fig.2.5 荷重-たわみ線図（折目なし）

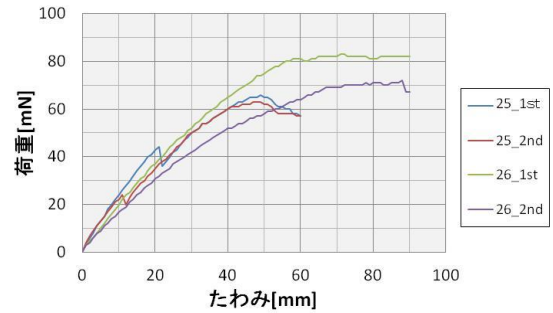


Fig.2.6 荷重-たわみ線図（折目あり）

Fig.2.5を見ると、曲げ剛性に大きなばらつきはないが、座屈荷重が平均よりの半分程度しかないものがある。これは、チューブを取りつける際の根元のシワなどが原因であると考えられる。Fig.2.6より、折目ありの場合、1度座屈したあとでも加圧することで、座屈前の約8割程度の曲げ剛性があることがわかる。たわみ0~10[mm]の範囲で平均値の線形近似を行い、それぞれの P/w を求めた。また、Table2.1に示す諸元のモデルについて(2.2)(2.3)式を用いて曲げ剛性の理論値と計算値を算出し、比較する。Table2.2に計算結果を示す。

Table2.1 諸元

d [mm]	20
l [m]	1.6
t [μ m]	20
E [Pa]	7×10^{10}
ρA [kg/m]	10.0

Table2.2 計算結果

種類	EI [$N \cdot m^2$]
理論値	13.42
折目なし	7.731
折目あり	3.075

曲げ剛性は折目ありの場合、折目なしの場合の半分以下であった。理論値と折目なしの値が大きすぎるのは、薄い膜上のアルミニウムに対して、理論式が適用できない可能性が考えられる。

2.5. 結論

- ・自作のインフレーターチューブの曲げ剛性及び座屈荷重のばらつきを測定した結果、曲げ剛性に関しては大きなばらつきはないが、座屈荷重には大きなばらつきがあることがわかった。
- ・チューブは折り畳むことで、曲げ剛性及び座屈荷重が低下することがわかった。
- ・根本の取り付け誤差が座屈荷重に強い影響を与えることがわかった。

2.6. 今後の展望

今回の実験は、融着部分方向に対しての曲げ剛性を図ったものであり、垂直方向への曲げ剛性と座屈荷重に関しても同様の実験を行う必要がある。座屈荷重のばらつきを減らすため、取り付け方法を確立する必要がある。

3. 膜面の重力に対する折り目解析

3.1. 研究背景

宇宙における薄膜構造物の実証のひとつとして、JAXA によって開発された小型ソーラーセイル実証機 IKAROS が上げられる。

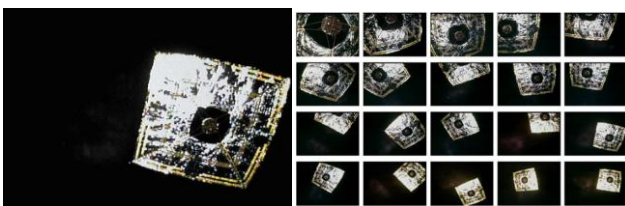


Fig3.1 小型ソーラーセイル実証機 IKAROS

この IKAROS の実証に伴い、浮かび上がってきた膜面構造上の問題点のひとつとして、膜面の折り目の影響がある。膜面に折り目が存在すると、想定していた太陽光圧の方向が狂い思い通りの推進力を得られない、膜の展開面積が減少してしまうといった問題が生じる。

IKAROS の展開シミュレーションでは、膜面に折り目をつけた後、膜面の片端を単純支持し、重力によって垂れ下げた時の折り目部の復元力による影響を実験し、得られた値から折り目部を回転バネに近似している。しかし、IKAROS の実証に伴い、折り目の影響を考慮するためにはこの近似では荒いことがわかってきた。したがって、薄膜構造物を宇宙で実用化するため、構造上の問題として上がっている折り目の構造を定量的に評価して数学的に解析し、セイル全体の折り目の影響によるセイル形状の変化をシミュレーション及び地上実験によって解析していき、膜の折り目の数学的モデルの提案をする必要がある。そこで本卒論では、膜の折り目の数学的モデルの提案をする前段階として、IKAROS で行ったのと同様の実験と比較するためのシミュレーションを提案する。

3.2. 膜面の折り目解析

本研究では、薄膜を人が「折る」という動作を平板の曲げ加工などに用いられる「ヘミング加工」に模擬し、膜厚 $25\mu\text{m}$ 、長さ 2.5mm のポリイミドフィルムに折り目を付けた後、片端を単純支持し、膜面を垂れ下げた状態における折り目の変形状について、有限要素法解析ソフト ABAQUS / Standard を用いて解析する。以下に、今回行った解析の手順を示す。

Table3.1 解析手順

第1工程	膜面を下から Punch で 90 度になるまで押し上げる。
第2工程	45 度の傾きを持った Pre-Hemmer により、折り癖をつける。
第3工程	Final-Hemmer を曲げ部材が厚さ $50[\mu\text{m}]$ の InnerPanel に完全に密着する位置まで押し下げる
第4工程	膜の片端を単純支持し、膜面に重力をかける。

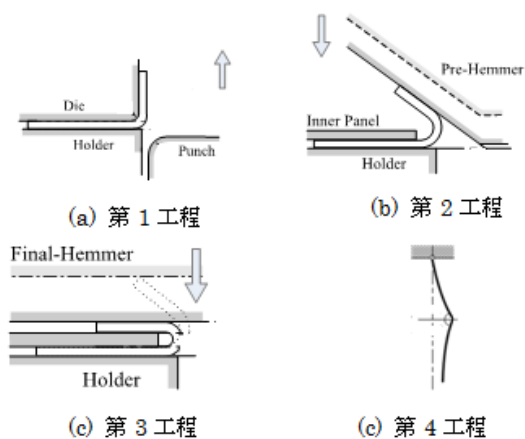


Fig3.2 ヘミング加工による変形工程

また、今回使用したポリイミドフィルムの応力-歪線図は以下のとおりである。

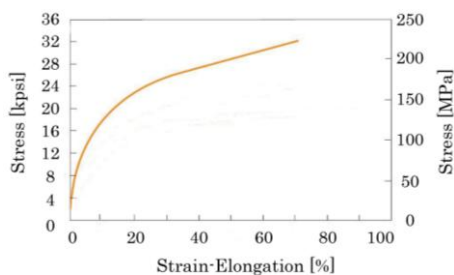


Fig3.3 カプトンフィルムの 応力-歪線図

3.3. 解析結果・考察

以下に今回行ったシミュレーションの解析結果を示す。

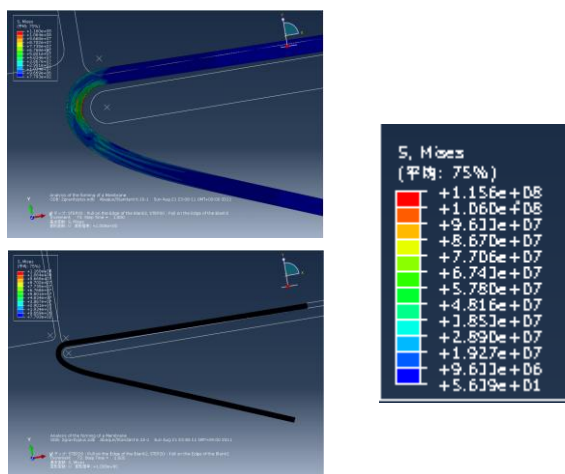


Fig3.4 重力下における膜面の折り目構造のシミュレーション結果

今回の解析モデルにおいて、膜の片端を単純支持し、膜面に重力をかけたときの折り目の折れ曲がっている箇所の角度は約 21.2 度になる。また、折り目部の中心では 110 MPa 程度の高い応力を示し、膜材全体に渡って材料が降伏している。

3.4. 今後の展望

今回の解析は膜の長さが 2.5 mm ととても短い膜面を想定しているものであり、実験と比較できる膜面の長さを用いた折り目の解析が必要である。また、解析した後、IKAROS における膜の折り目に関する実験と同様の実験を行い、シミュレーションとの比較し、シミュレーションの妥当性を評価するべきである。

4. 結言

今回示したような地上実験や挙動解析を行っていき実測データ、解析方法の正確性・信頼性を高め、今後の宇宙柔軟構造物の発展に貢献したいと考える。

参考文献

- [1] 片山範将, “超小型人工衛星のための非デブリ化展開膜構造物に関する研究” 平成 19 年度日本大学卒業論文 2007
- [2] 池田雅央, “インフレーション構造物に関する研究—インフレーションチューブの曲げ剛性測定法の提案—” 平成 21 年度日本大学卒業論文 2009
- [3] 早瀬亮, 薄膜構造物における折り目の力学モデルに関する研究, 日本大学修士論文, 2011
- [4] 宮崎康行, 森 治, 小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS のセイル膜面の数学モデルについて, 宇宙構造材料シンポ, 2009
- [5] 橋口総太郎, 数値解析によるスピン展開膜面の折畳み法の比較, 日本大学修士論文, 2007