

複合膜面構造物の軌道上での展開挙動の推定法

Prediction Method of On-Orbit Deployment Behavior of Combined Membrane Structure

指導教授 宮崎康行

M3019 藤原彰太

1. 序論

1.1. 背景

近年、大面積を有する宇宙構造物の構造様式として、ポリイミドフィルムなどの薄膜面（数 μm 程度）やインフレーション構造（ガスを注入して膨らませる袋状の膜）といった柔軟構造物が注目されている。これは、搬送コストの観点から高収納・可展開・軽量であることが望ましく、大面積を有する宇宙構造物の構造様式として柔軟構造物が適していると考えられる。このような大面積を有する宇宙構造物の実証例として、2010年5月には宇宙航空研究開発機構(JAXA)により、膜面展開構造を有した小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」が打ち上げられ、宇宙空間で14m四方の膜面の遠心力展開・展張、太陽光子による加速・航行を世界で初めて実証した^[1]。今後は直径50m級の膜面を有する次期ソーラーセイルの木星およびトロヤ群小惑星の探査が計画されている(Fig. 1)。

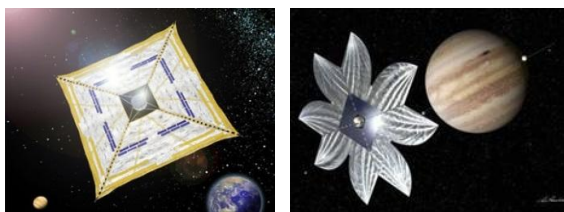


Fig. 1 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」(左)と次期ソーラーセイルによる木星探査計画概念図(右)

この他に膜面を宇宙で展開する方式として、剛性を持った伸展部材と膜面から成る複合膜面構造物が注目を浴びている。このような複合膜面構造物の利点として、柔軟構造物の利点に加え展開後の構造物が剛性を有することが挙げられる。このような複合膜面構造物の展開方式としては、ばね性を有する弾性素材を用いる方法やインフレーションチューブを用いる方法が提案されている。日本大学では、インフレーションチューブを用いた複合膜面構造物のコンセプトを提案すべく、2014年5月に超小型衛星「SPROUT」を高度約600kmの太陽同期軌道に打ち上げ、現在、運用を行っている。SPROUTは約一辺20cmの立方体であり、メインミッションとして二本のインフレーションチューブと膜面から成る一辺1.5mの正三角形の「複合膜面構造物」の展開実証を行う。インフレーションチューブの宇宙実証としては、2012年8月に「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームにて「SIMPLE」が挙げられるが^[2]、インフレーション構造を支持部材とした複合膜面構造物の展開実証は世界初の試みである。なお、展開実証は2015年3月を予定している。

しかし、複合膜面構造物の展開を保障する技術が未だ確立されていなく、地上実験に関していえば、重力・空気抵抗の影響が大きいため宇宙空間で大規模・長時間模擬した実験を行うのは困難である。また数値解析に関してはエネルギー・モーメント法(EMM)をベースとした非線形有限要素法を用いた解析手法が提案され、IKAROSの軌道上のデータと数値

予測結果を比較することにより、数値予測手法の妥当性を示されつつあるが^{[3][4]}、まだ実証例が少なく複合膜面構造物に関しては数値解析が行われていない。今後、複合膜面構造物を実用化していくためには、軌道上での挙動推定法の確立が望まれる。

1.2. 本研究の目的

1.1節を踏まえ、本研究では、数値解析と軌道上の展開挙動を推定することを目的とする。推定方法は、解析で得られる展開挙動には、計算誤差が含まれる。その計算誤差を明らかにするためには、地上実験の展開挙動と比較し計算誤差がどの程度であるか見積もる必要がある。しかし、地上の展開挙動には計測誤差が含まれてしまう。よって、数値解析で得られた展開挙動には、計算誤差と計測誤差の双方が含まれることになり、この両者の誤差を明らかにすることで数値解析結果から実機の軌道での展開挙動を推定できる(Fig.2)。

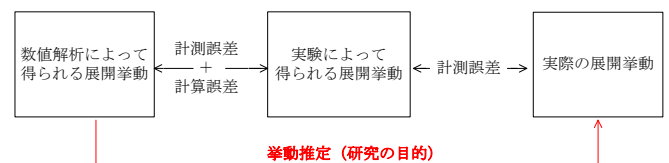


Fig.2 本研究の目的

1.3. 本研究でのアプローチ

本研究では、柔軟宇宙構造物として今後の応用が期待されていて、SPROUTにも搭載しているインフレーションチューブを支持部材として伸展させその伸展に付随させる形でチューブに接合した膜面を展開させる「複合膜面構造物」(Fig.3)を対象とする。1.2節で示した推定方法の妥当性を示すため一辺が440[mm]の小規模膜モデルを用いて、空気中重力下での展開挙動、空気中微小重力下の展開挙動の実験を行う。そして、それらの結果を用いて真空無重力化での挙動推定する。最後に実機での挙動推定方法を示す。



Fig.3 インフレーションチューブ(左)と複合膜面(右)

2. 実験^[5]

空気中重力下、空気中微小重力下にて一辺440[mm]の小規模モデルで実験を行った。

2.1. 実験手順・実験装置

実験は以下の手順で行った。

1. 複合膜面を折り畳んで収納機構(Fig.4 左図)に収納する

2. 実験開始信号を検知し、収納機構を保持するテグスをヒートカットすることで収納機構の蓋を開放する
3. 電磁バルブを用いた圧力制御により、インフレータブルチューブにガスを注入して伸展させ、それに伸展に伴いチューブに接合された膜面を展開する(Fig.4 右図)
4. 展開の様子を 7 台のカメラで撮影する
5. 膜面に貼付された特徴点の座標を映像から読み取り、ステレオ視法によって 3 次元位置へと復元する
6. 1~5 の手順を地上実験と微小重力実験で行い、得られた特徴点の時刻歴軌跡から軌道上での挙動推定を行う

実験供試体および実験装置を Fig.4, Fig.5 に示す。支持部材であるインフレータブルチューブは 2 枚のアルミミネートフィルムの両端を熱融着し、8 角形折りにより成形したものを使用する。膜面は厚さ $12.5\mu\text{m}$ の片面アルミ蒸着ポリイミド膜を使用しており、一辺 440mm の膜面を二重波形可展面(通称、ミウラ折り)を用いて折り畳んでいる。2 本のインフレータブルチューブにガス(Air)を圧力 70kPa で注入し伸展させ、その伸展に付随させ膜面の展開を行う。

2.2. 実験結果

地上実験、微小重力実験の様子と 3 次元位置復元結果を Fig.6, Fig.7 に示す。図中に示す時間は収納機構の蓋開放を 0.00 [sec] とした秒数である。

地上実験結果

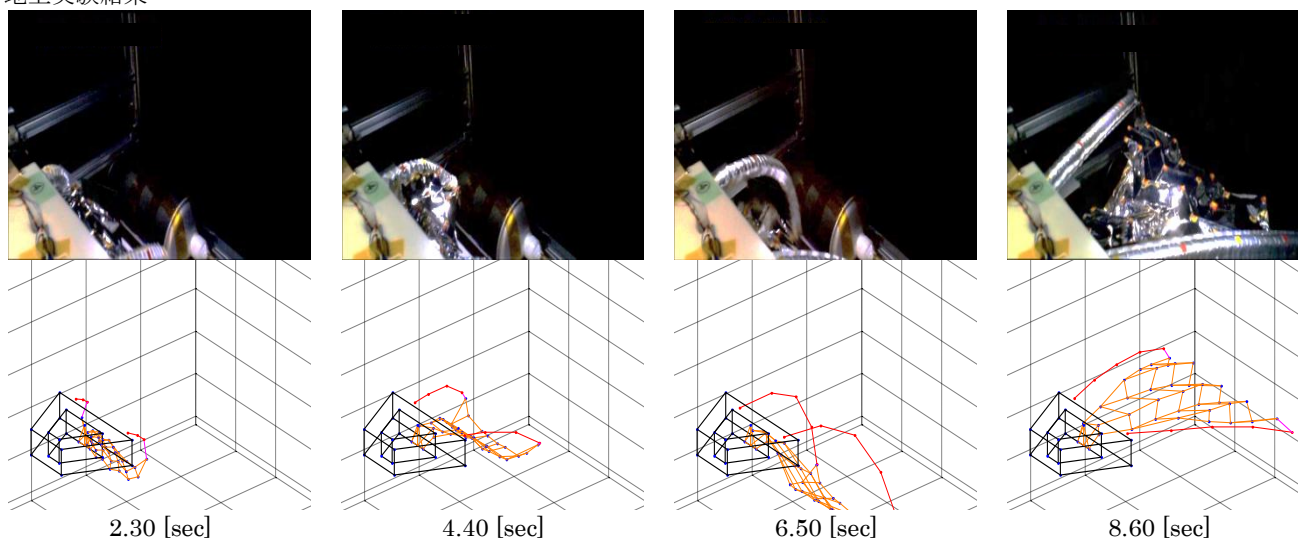


Fig.6 地上実験の様子(上)と 3 次元位置復元結果(下)

微小重力実験結果

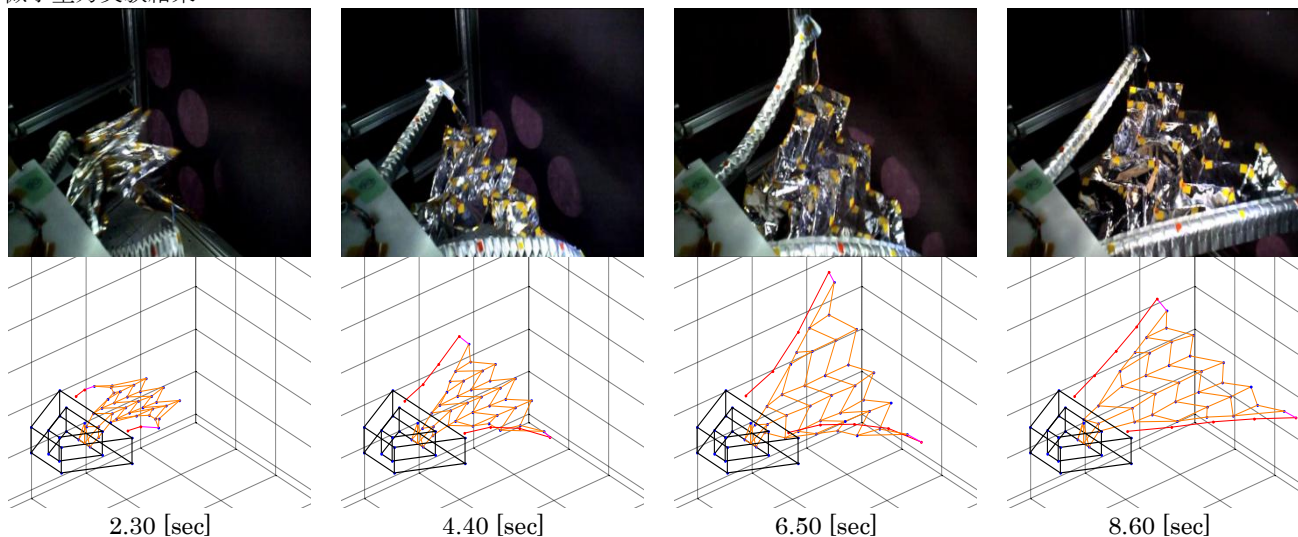


Fig.7 微小重力実験の様子(上)と 3 次元位置復元結果(下)



Fig.4 実験供試体(左: 収納状態, 右: 展開状態)

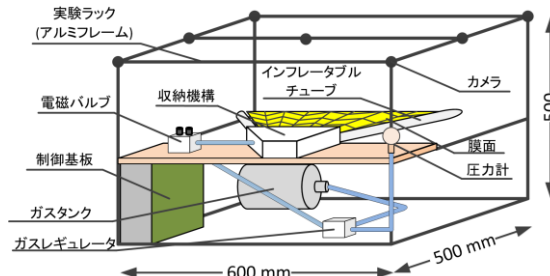


Fig.5 実験装置概念図

3. 解析

本節では、解析手法について述べる。また、今回の解析には、非線形弾性動力学解析ソフト NEDA（Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis code）を用いて解析を行った。

3.1. 解析対象

解析対象である膜面の寸法を Fig.8 に膜面の緒言を Table.1 に示す。

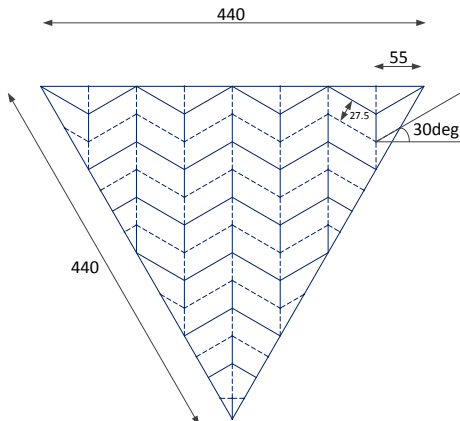


Fig.8 膜面寸法と特徴点番号

Table.1 膜面の緒元

材料	ポリイミド膜
折り方	ミウラ折り
厚さ	12.5 μ m
一辺長さ	440mm

3.2. 節点の座標設定

解析で使用する節点の座標は、Fig.8を参照し各折り目の交点に節点座標を配置した。また、展開前の膜面が折り畳まれた状態を初期位置として設定するため、収納膜面した各節点座標を展開した膜面の節点座標から幾何学的に算出した。Fig.9 に展開時の膜面から収納する膜面までの流れを示す。

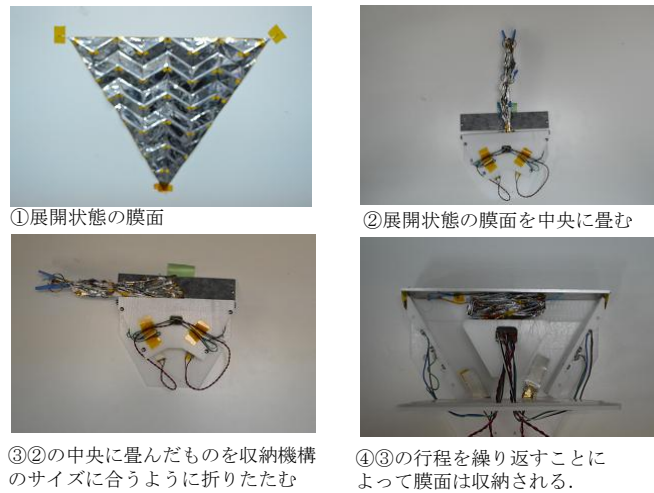


Fig.9 膜面の折りたたみ手順

まず、Fig.9の①の状態では各折り目の頂点に節点座標を置き、①から②、③の順に幾何学的に座標変換することで収納状態を模擬することが出来る。

3.3. 膜面のモデル化

膜面のモデル化にはケーブル要素にてモデル化を行った。モデル化した膜面を Fig.10 に示す。また、モデル化に使用した各種パラメータを Table.2 に示す。

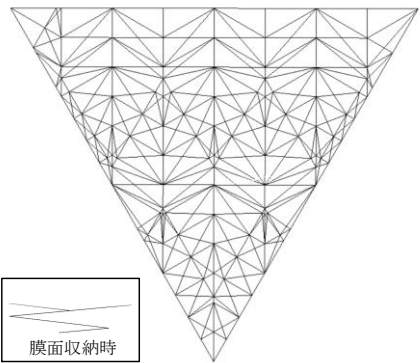


Fig.10 モデル化した膜面 (収納時と展開時)

Table.2 膜面の各種パラメータ

ヤング率	3.0[GPa]
断面積	$1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2]$
質量	$1.42 \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$
圧縮剛性	$1.0 \times 10^{-4} [-]$

3.4. 解析結果

今回の解析では、3.2 節から 3.3 節で作成した膜面のモデルの先端を予想されるチューブの変位に付随させることで膜面の展開挙動を解析する。Fig.10 の膜面収納時の状態から膜面の先端の位置座標を $[0.5\cos(\pi/3), 0.5\sin(\pi/3), 0]$ の速度で変位させた。解析結果を以下 Fig.11 に示す。

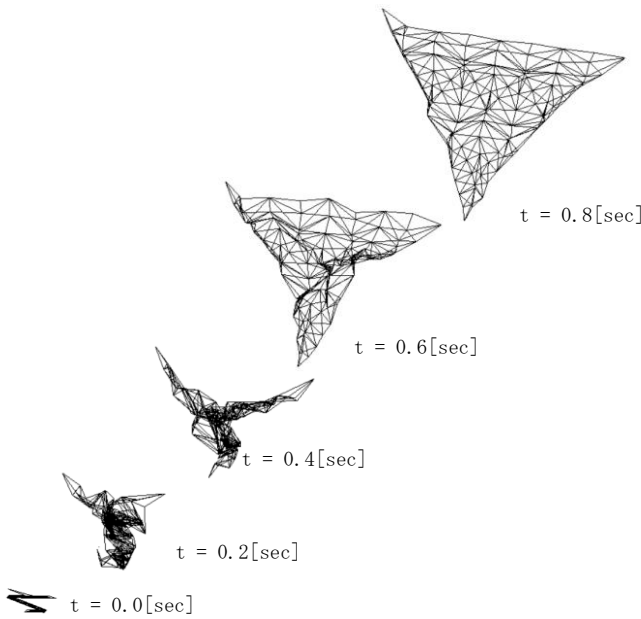


Fig.11 解析結果

4. 考察

Fig.11 の結果を見ると 2 種類の実験(Fig.6, Fig.7)に比べ伸展途中の膜面の先端中央部変位量が少ない。また、Fig.6 の

$t=2.3[\text{sec}]$ に関しては、チューブよりも膜面が先行して伸展していることがわかる。これは、収納機構を解放した際に膜面が折り目によって伸展力を持っているからだと考えられる。しかし、解析モデルには、このような折り目による伸展力を考慮していないためこのような伸展の挙動に違いが見られたと考えられる。また、Fig.12 に実験結果と解析結果の膜面の先端中央部の変位と時間を無次元化したグラフを以下に示す。

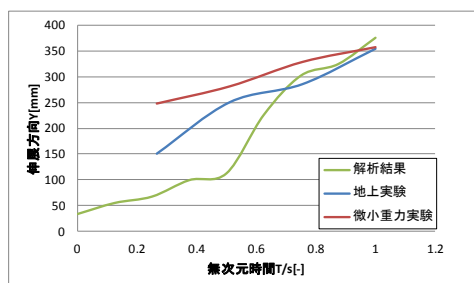


Fig.12 無次元時間と膜面の伸展方向の変位

Fig.12 からわかるように 0.6 秒付近までは、解析結果が実験値と比べ変位量が少ないことがわかる。また、0.6 秒以降は、解析による膜面の変位量は地上実験と微小重力実験の間であることがわかる。これは、実験 0.6 秒以降は膜面の折り目による伸展力でなくチューブによる伸展力によって膜面が伸展しているからだと考えられる。そのため、0.6 秒以降は膜面の形状は、チューブに依存しているため解析結果と実験値の膜面の変位の推移の仕方がほとんど類似していると考えられる。特に 1.0 秒での膜面の変位量はほとんど同じ値を示しており、地上実験 354[mm]、微小重力実験 357[mm]と誤差が最大で 21[mm](5.9%)で予測することが出来ていると考えられる。

また、3 次元位置復元の精度を検証するため、マス目の大きさが既知であるチェスボードを、実験で用いたものと同様の計測システムで撮影し 3 次元位置に復元。基準点からの距離を計測し真値との比較を行った。その結果を Fig.14 に示す。検証の結果、計測した全 52 点の特徴点の真値からのズレは最大で 4.0mm、平均で 2.3mm であった。人間が画像から特徴点のピクセル値を読み取り復元しているため誤差の値はその読み取りの精度に依存にもするが、およそこのオーダーで復元できていると考えられる^[6]。

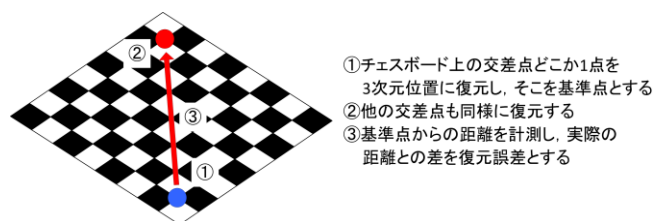


Fig.13 復元誤差の算出方法

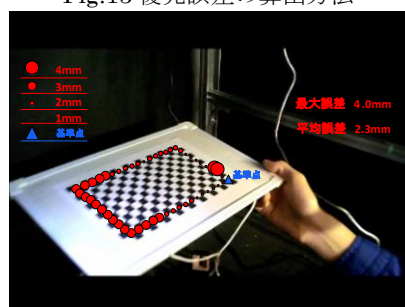


Fig.14 基準点から各特徴点への復元誤差

3 次元位置復元の精度については、カメラの画素数に大きく依存しているため、3 次元位置復元の誤差を少なくするには、カメラの画素数が高いもので計測する。

以上から、複合膜面構造物のようなある程度の剛性を持った伸展部材に付随する形で展開する膜面は、伸展部材の伸展後の形状を予測し伸展後の形状へ時々刻々変位させることでそれに付随する膜面の最終形状の誤差は、解析と地上実験の誤差が 21[mm]であり計測による誤差が最大で 4.0[mm]であるため、軌道での展開挙動は、数値解析の結果から最悪でも誤差 5.9%~7.1%の精度で予測することが可能であると考えられる。

5. 実機の軌道上での挙動推定方法

実機サイズの数値解析を行い、SPROUT で使用するカメラによる計測誤差(3.4%)と計算誤差(7.1%)から実機の軌道予測を行う場合は、最悪でも誤差 9.3%~10.5%の範囲で予測できる。

6. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 挙動推定方法を提案し小規模モデルで、その妥当性を示した。
- 実機サイズでの挙動推定手順並びに推定挙動の妥当性を示した。
- 計算誤差と計測誤差の量はせいぜい 8.6%である。

今後は、SPROUT の実機サイズの挙動解析と軌道上での展開挙動の計測データを用いて推定する手法の妥当性を示す予定である。

7. 参考文献

- [1] Shirasawa, Y., Mori, O., Miyazaki, Y., Sakamoto, H., Hasome, M., Okuizumi, N., Sawada, H., Furuya, H., Matunaga, S. and Natori, M.: Analysis of Membrane Dynamics using Multi-Particle Method for Solar Sail Demonstrator "IKAROS", AIAA paper 2011-1890 (Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), 2011, pp.1-14
- [2] K.Higuchi, Y.Miyazaki, et.al, "Initial Operation and Deployment Experiment of Inflatable Extension Mast in Simple on JEM Exposure Platform in ISS", Trans. JSASS, Vol.12, No.ists29, p.Pc_1-Pc_7, (2014).
- [3] Miyazaki, M., Shirasawa, Y., Mori, O., Sawada, H., et.al., "Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail "IKAROS"", AIAA-2011-2181, 2011.
- [4] 山崎政彦, "膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスの低次元化手法の研究", 平成 23 年度日本大学大学院理工学研究科博士論文, p16-23, 2011.
- [5] 嶋崎信吾, バ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, 平成 25 年度 日本大学修士論文
- [6] 間戸場包弥, 計測データと数値解析の統合による膜面展開宇宙構造物の形状推定に関する研究, 平成 24 年度 日本大学修士論文