

遠心展開膜の展開挙動における相似則について

Scaling Law of Deployment Behavior for Spin Deployment Membrane

指導教授 宮崎 康行

M6019 鈴木 智大

Tomohiro Suzuki

In recent years, there are a lot of research on large membrane space structure. It is essential to estimate the deployment behavior of these structures before launch. However, it is difficult to use full-size membrane in the experiment because the deployment motion of large membrane is strongly affected by gravity and air drag. So, some scale model is often employed in the experiment to confirm the deployment behavior. But the scale model does not always have the same behavior as the full-size model. Therefore, it is necessary to design the scale model based on the appropriate scaling law to simulate the deployment motion of the full-size model. In this paper, a scaling law for spin deployment membrane is proposed and verified numerically.

変数定義

T_r	中心剛体トルク	E_{te}	テザーのヤング率
I_{rig}	中心剛体慣性モーメント	A_{te}	テザーの断面積
R_{rig}	中心剛体の半径	ρ	膜の密度
ω_0	初期角速度	h	膜厚
C	コンプライアンス	E	膜のヤング率
T	有次元時間	ν	膜のポアソン比
X	無次元時間	l_f	折り目の長さ

1. 序論

1.1 背景

近年、宇宙利用の拡大に伴い、軽量かつ可展開性を有する膜面構造物の利用が注目を集めている。その中でも本研究では遠心力を用いた膜面展開構造物に焦点を当てる。遠心力を展開に用いることで、構造物そのものに対して構造部材やアクチュエータを用いることなく大型の構造物を構築することができるため、非常に軽量の構造物を作ることができる。2010年 JAXA によって打ち上げられた IKAROS では、一辺 14m の正方形膜面を、遠心力を用いた展開方法で展開することに世界で初めて成功している^{[1][2]}。また、将来的に一辺 50m の正方形膜を有する構造物が構想されている。(Figure 1 参照)

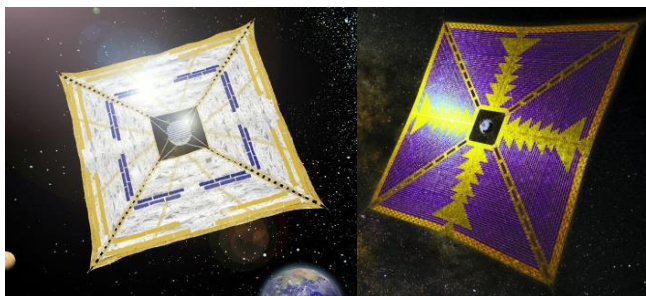


Figure 1 Left: IKAROS Right: OKEANOS

この IKAROS には十字形状を作る 1 次展開とその後、膜の固定ガイドを外し、正方形形状を作る 2 次展開の 2 段階の展開シーケンスがある。(Figure 2 参照)

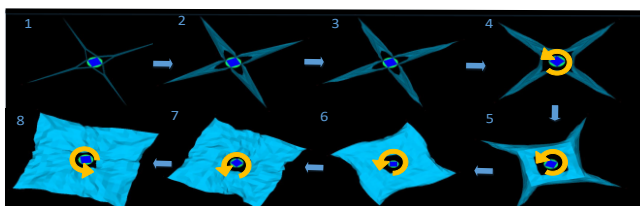


Figure 2 Deployment sequence

本研究では、2 次展開(Figure 2 No.5~ No.8)の展開挙動について焦点をあてる。

このような膜面宇宙構造物において、最も重要なことは、打ち上げ前にその展開の挙動を予測し、設計に反映することである。これは展開挙動が衛星の姿勢にクリティカルに影響しその後のミッションに影響するためである。そのため、今までにも数値解析ベースでその展開挙動は推定されている^[3]。しかし、その信頼性を高めるうえで、実験的に展開挙動を推定することは非常に重要である。しかしながら、実物大の膜面の実験は、重力、空気抵抗といった地上の外乱の影響を大きく受けてしまうため、極めて困難である。そこで、物理的、幾何学的に相似な小型膜面を用いた展開実験を行い、その結果が大型膜面の展開挙動と一致することが分かれば、地上での実験から、軌道上での展開挙動を実験的側面から推測できるのではないかと考える。この小型膜面を作成するにあたり、必要な相似関係（相似則）を定式化し、その妥当性を検証必要がある^[3]。

先行研究においても、相似則に関する理論の研究は行われてきたものの、そのパラメータは並進運動のみを考慮したものであった^[4]。しかし軌道上での膜の展開運動を考えるに当たり、回転運動も考慮しなければならない。これは、膜面の展開シーケンスからも明らかである^[1]。従って今までの相似パラメータだけでは、軌道上の膜と物理的に相似であると言いきれない。そこで本研究では過去に考えられていなかった運動について新たに理論を立て、検証する。これにより、軌道上の衛星により近い条件での地上実験が可能になる。

1.2 目的

以上の背景から本研究の目的を以下のようにおいた。

1. 大型膜面と小型膜面との間の回転運動を含めた物理的な相似関係を定式化し、相似パラメータを導く。
2. 数値計算にて大型、小型膜面の展開挙動を評価して、相似パラメータの妥当性を確認するとともに、地上実験可能な小型膜面モデルを提案する。

以上の目的を達成することが出来れば、今後小型の実験モデルを作成し、実験により大型膜面の展開挙動を知ることが出来る。

2. 相似則

本研究では、地上での実験結果を元にして、軌道上の展開挙動を推定するため、相似則の理論式を導くにあたり、地上における外乱を含む、膜に作用する力として、慣性力、重力、空気抵抗、弾性力、折り目によるばね力の5つを考慮した。

2.1 理論式

ここでは、上述した回転運動に関する相似パラメータの理論を記述する。並進運動に関する相似パラメータは、参考文献[4]を参照されたい。

2.1.1 回転運動方程式

一般に回転の運動方程式は

$$I_{rig}\ddot{\theta} = T_r \quad (2.1)$$

と与えられる。時間 t 、角度 θ を有次元量 T, θ 、無次元量 τ, ζ を用いて

$$t = T\tau, \quad \theta = \theta\zeta \quad (2.2)$$

と表すと、式(2.1)は

$$\frac{I_{rig}\Theta^2}{T^2} \frac{d^2\zeta}{d\tau^2} = T_r \quad (2.3)$$

と記述することができる。またトルクは

$$T_r = \frac{E_{te}A_{te}R_{rig}^2}{X} \quad (2.4)$$

で記述できる。式(2.3)と式(2.4)から、式(2.3)以上の式より回転運動による相似パラメータは、

$$\frac{E_{te}A_{te}R_{rig}^2T^2}{\Theta^2XI_{rig}} \quad (2.5)$$

となる。ここで、 Θ を合わせるために大小の膜の角速度を合わせる必要がある

$$\omega_{0S}T_S = \omega_{0L}T_L \quad (2.6)$$

により2次展開開始時の角速度を決めることができる。以上式(2.5)及び式(2.6)を合わせることで、回転運動についての相似関係を築くことができる。

2.1.2 全体の相似パラメータ

2.1.1節で求めた回転の相似パラメータと先行研究により求められている並進の相似パラメータをTable 1, Table 2に示す。

Table 1 Scale parameter (Rotation motion)

Motion	Contents	Parameter
Rotation motion	Center rigid body mass	$\frac{E_{te}A_{te}R_{rig}T^2\Theta^2}{I_{rig}}$
	Angular velocity	ω_0T

Table 2 Scale Parameter (Translation motion)

Motion	Contents	parameters
Translation motion	Inertial force term	$\frac{\rho h X^3}{T^2}$
	Gravity force term	$-\rho h X^2 g$
	Membrane force term	$\frac{EhX}{1-\nu^2} \tilde{C}$
	Aerodynamics force term	$-\rho_{air} \frac{X^4}{T^2}$
	Spring back force at crease term	$Eh^2 \frac{F_l}{X}$
	Tip mass term	$\frac{R_t^2 m_T}{XT^2}$

2.2 数値解析

以上の理論の妥当性を確認するため、数値解析による比較を行った。一般に、柔軟な膜面やケーブルと剛体を同時に含む宇宙構造物のダイナミクス有限要素解析は非線形性の強い問題となることが知られている。本解析では柔軟多体有限要素モデルのエネルギー・モーメント法に基づく陰解法(NEDA: Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis Code)[7][8]にて解析を行った。

2.2.1 解析モデル

解析に際して、Table 2、の相似パラメータを一致させたモデルを使用した。使用したモデルをFigure 3に示す。

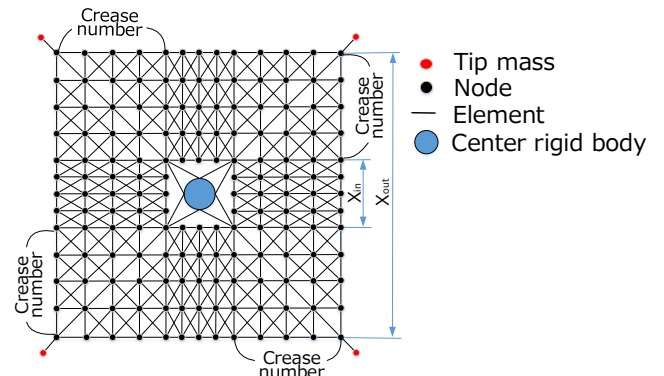


Figure 3 Numerical analysis model

上記モデルでは、大小のモデルで折り目の数、ブリッジの有無を除き、幾何学的な形状をIKAROSと一致させており、その他(膜の厚さ、中心剛体の直系、先端マスの重さ)は全て、Table 2、の相似パラメータを一致させるようにモデルを作成した。

2.2.2 解析手順

2次展開の挙動はその初期形状すなわち、一次展開完了時の形状に依存しやすいことが知られている。そのため、まずは1次展開終了後の定常回転の解を求めておき、その後2次展開の解析を行う。

3. 結果

相似則理論の妥当性確認のために複数のモデルを使用した解析を行った。その結果を以下に記述する。

3.1 膜の大きさによる影響

相似則及びパラメータの妥当性を確認するために、異なる大きさの膜面による挙動の解析を行った。これはモデル自体

のパラメータは大小で異なるものの、相似パラメータは全て一致している。それらのモデルを Table 3 にその結果を Figure 4 に示す。

Table 3 Model parameter (Difference of membrane size)

Parameter	Model1	Model2	Model3	IKAROS
Membrane size	0.3m sq	0.8m sq	5m sq	13.6m sq
Crease number	5	5	5	18.5
Membrane Thickness	10 μ m	10 μ m	10 μ m	7.5 μ m
Tip mass weight	0.1g	0.5g	9g	500g
Spin rate	76rpm	47rpm	18rpm	2rpm
Center rigid body mass	0.01kg	0.07kg	2.8kg	307kg

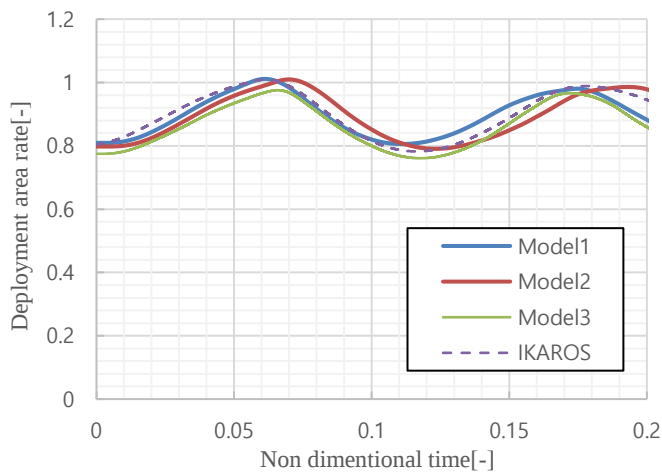


Figure 4 Analysis result (Difference of membrane size)

この結果の通り、面積展開率が最大に至るまでの時間が各モデル変わらないことから展開挙動はほぼ一致していることが分かる。すなわち、膜の大きさが異なるものでも、相似パラメータを一致させることで展開の挙動はほぼ一致することが言える。

3.2 折り目による影響

地上での実験では一辺 0.8m 程度の膜面の実験が限界である。この大きさの膜に IKAROS と同じ数だけの折り目をつけることは極めて困難である。そのため折り目の数を減らした実験モデルを作成しなければならない。そこで、折り目の数の違いによる幾何形状の違いが展開の挙動に影響しないかどうかを検証する必要がある。そこで、異なる折り目の回数のモデルで解析を行った。各モデルの諸元を Table 4 に、その結果を Figure 5 に示す。なおこの時、折り目によるばね力のパラメータは一致しているが、折り目による幾何形状は一致していない。

Table 4 Model parameter (Difference of crease number)

Parameter	Model4	Model5	Model6
Membrane size	0.8m	0.8m sq.	0.8m sq.
Crease number	5	7	9
Membrane thickness	40 μ m	25 μ m	10 μ m

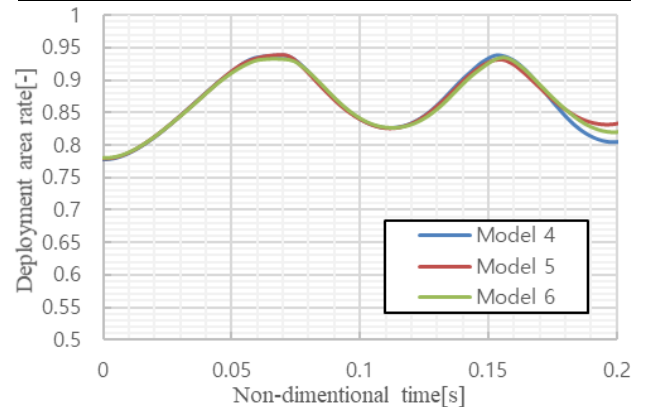


Figure 5 Analysis result (Difference of crease number)

以上の結果から、折り目によるばね力のパラメータを合わせれば、異なる折り目の数の膜だとしても、展開挙動には影響を与えていないことが分かる。すなわち、幾何的な形状は膜の展開挙動には影響しない。

3.3 重力による影響

重力による影響を検証するために 2 つのモデルを使用して解析を行った。3.1,3.2 項の解析は全て、無重力環境下での解析であった。しかし、今後実験的な比較をするにあたり、地上での実験は避けることはできない。そこで、重力による影響がどれくらいあるのかを検証する必要がある。そのために以下の Table 5 のようなモデルを作成し解析を行った。このモデルでは、スピンレートを IKAROS と同様して、重力の影響を見やすくしている。その結果を Figure 7 に示す。

Table 5 Model parameter (Difference of gravity)

Parameter	1G	0G
Membrane size	0.8m sq.	0.8m sq.
Crease number	3	3
Gravity force	1G	0G
Spin rate	2rpm(torque free)	2rpm(torque free)

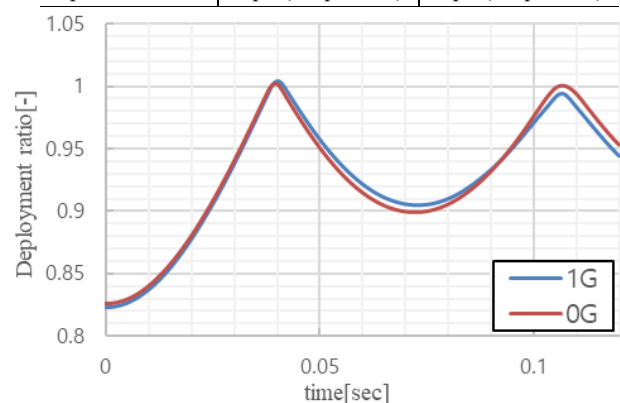


Figure 6 Analysis result2 (Difference of gravity)

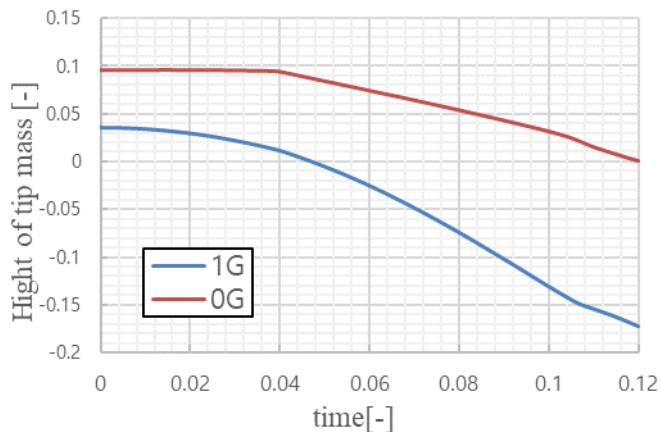


Figure 7 Analysis result 1(Difference of gravity)

以上二つの結果から Z 方向すなわち、面外方向の挙動は異なるが、X-Y 方向すなわち面内方向の挙動は一致していることが分かる。

4. 考察

上記の結果から、フルモデルサイズの膜の展開挙動をスケールダウンしたモデルを使った実験から予測することは可能であると考えられる。また、回転運動を理論に加えたことにより、スケールダウンしたモデルであれば、角速度を速くしても展開挙動を一致させることはできる。加えて、折り目によるばね力のパラメータを合わせれば、異なる幾何形状であっても展開の挙動は一致する。

地上実験を行う際の実験膜の作成において、薄い小型の膜に多くの折り目をつけることが困難であると問題視されていたが、上記の結果から、膜の厚さを厚くし、かつ折り目を減らすことが可能である。

しかし、面外方向の挙動において重力の影響を無視することが出来ない。過去の研究では、航空機を用いた無重力かつ真空環境での展開実験及び、地上での高真空環境での実験を行っている。その結果、重力の影響はほとんどないと結論付けられている^[4]。その根拠として実験を行った角速度が大型膜面よりも 20 倍以上速く、重力よりも回転による遠心力が支配的であったためであると考えられている。これを踏まえると、重力環境下であっても回転速度を速くすることで、面外方向の挙動も確認できるのではないかと考える。回転速度を速くすることは、上述した考察と矛盾しないことから、地上実験で面外方向の挙動を見ることも可能ではないかと考える。

5. 結論

本研究の結言を以下に記す。

- 1) 回転運動を加えた新たな相似パラメータを導出し数値計算にてその妥当性を確認した。
- 2) 相似パラメータを一致させることで大小の膜面の展開挙動は一致することを示した。
- 3) 実験モデルの作成において、折り目の違いを考慮した相似パラメータを提案し、その妥当性を数値解析により示した。

- 4) 地上実験において、面内方向の展開挙動を模擬することが可能であることを、数値解析により示した。

6. 今後の展望

現在までに、解析結果と実験結果を比較するまでには至っておらず、解析結果を基にした実験を実施中である。今後この実験では下記の内容を実施予定である。

1. 面内方向の実験的な評価を目的とした実験を行うに当たり、高真空環境での高スピンレート地上実験を実施し、解析結果と比較する。
2. 面外方向の実験的な評価を目的とした、微小重力環境での低スピンレート実験を実施し、解析結果と比較する。

以上を行うことにより、数値解析による展開挙動の妥当性、及び、遠心展開膜構造の地上実験手法を確立できると考える。

謝辞

本研究は、文科省・科研費 JP17H03477, JP15K18285, JP15H04204 の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構：「小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS 飛翔実験計画書」,pp.320
- [2] Mori, O., Sawada, H., Funase, R., Morimoto, M., Endo, T., Yamamoto, T., Tsuda, Y., Kawatsu Y., Kawaguchi, J., IKAROS Demonstration Team and Solaarsail Working Group, First Solar Power Sail Demonstration by IKAROS, Proceedings of 2nd International Symposium on Solar Sailing, 2009
- [3] G. Greschik, M. M. Mikulas and R. E. Freeland, THE NODAL CONCEPT OF DEPLOYMENT AND THE SCALE MODEL TESTING OF ITS APPLICATION TO A MEMBRANE ANTENNA", Proc. of the 40th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Adaptive Structures Forum, April 12–15, 1999, St. Louis, MO. Session ASF-05, Inflatable Space Structures II. Volume 4 AIAA, pp. 2546–2554,
- [4] 立松裕基：「遠心展開式膜面の展開相似測に関する研究」平成 28 年度日本大学修士論文, 2017
- [5] 奥泉信克, 白澤洋次, 宮崎康行, 森治：「小型電力セイル実証機 IKAROS の薄膜セイル展開挙動」日本マイクログラフィティ応用学会誌 Vol. 29 No. 1,(2012),48-55
- [6] 三田恭平：「固有直交分解を用いた計測データと数値解析の統合による遠心力展開膜面の形状推定」日本大学大学院 修士論文,2015,pp. 15-20
- [7] Y. Miyazaki and T. Kodama: "Formulation and interpretation of the equation of motion on the basis of the energy-momentum method", Journal of Multi-body Dynamics, pp.218 ,2004, 1
- [8] Y. Miyazaki: "Wrinkle/Slack Model and Finite Element Dynamics of Membrane", International Journal for Numerical Methods in Engineering, pp.66 ,2006, 1179.