

遠心力を用いた膜面展開の挙動における相似則に関する研究

The research of similarity rule for deployment behavior of membrane using centrifugal force

宮崎・山崎研究室
Miyazaki・Yamazaki Laboratory
鈴木 智大
Tomohiro Suzuki

The use of lightweight and large deployable membrane structures has been attracting attention recently for utilization in space. In this research, we focus on membrane deployment by centrifugal force. It is difficult to carry out the deployment of large membrane on the ground. Therefore, this research intends to formulate the similarity between small and large membrane structure on the basis of the theory and the experimental results in microgravity environment.

1. 緒言

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、自己伸展力等を持つような構造部材なしで大型の構造物を作ることができるため、比較的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成功している^[1]。

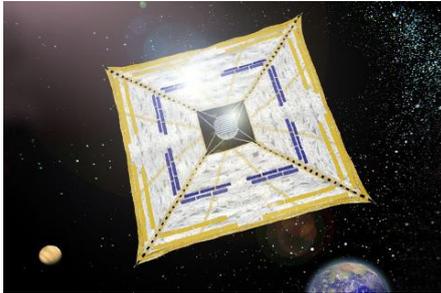


Figure 1 IKAROS

宇宙で利用する大型膜面構造物の展開挙動を検証することは信頼性を高める上でも重要であり、そのためには展開の実験を欠かす事はできない。しかし、地上での実験では重力や大気抵抗の影響から実寸の膜面を、宇宙環境を模擬して実験するのは極めて困難である。そこで、小型の膜面展開の観測から大型膜面の展開挙動の推定をできるような相似則を立てることができれば、比較的低コストの実験で大型の膜面構造物の展開挙動を推定出来る。

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. 小型の膜面モデルから大型の膜面の展開挙動を推定する相似則に必要な要素を定式化する。
2. 小型の膜面モデルを用いた宇宙環境下（微小重力、真空）での実験から小型膜面モデルでの運動を観察する。

以上のことから、本研究の目的は微小重力環境において膜面展開の展開挙動を観測し、相似則パラメータの中でも展開に大

きく寄与するパラメータを抽出することである。

2. 相似則

相似則の理論式を導くにあたり、考慮したパラメータとして、膜に作用する慣性力、重力、空気抵抗、内力、折り目、の5つのパラメータを考慮した。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、地上における外乱、及び膜に作用すると考えられるパラメータを選択した。

2.1 相似則理論式

2.1.1 前提条件

一般に、運動方程式が

$$m\ddot{x} + kx + \alpha\dot{x} = 0 \quad (2.1)$$

と与えられるとき、時間 t 、位置 x を無次元量 T, X を用いて

$$t = T\tau, \quad x = X\xi \quad (2.2)$$

と表すと、式(2.1)は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx + \alpha \frac{dx}{dt} = 0 \quad (2.3)$$
$$\frac{mX}{T^2} \zeta'' + kX\zeta + \frac{\alpha X}{T} \zeta' = 0$$

と書き換えることが出来る。また、基礎方程式を Lagrange の運動方程式を元に考えていくものとする。

2.1.2 慣性項

膜面に作用する慣性力によるエネルギーは

$$T^{(m)} = \int \frac{1}{2} \rho N_i N_j \dot{x}_i \dot{x}_j dA \quad (2.4)$$

と表せる。ただし、各変数を以下のように定義した。

Table 1 記号の定義

ρ	膜面密度
$N_i N_j$	補関数
$\dot{x}_i \dot{x}_j$	微小要素の速度
dA	微小面積
i, j	微小要素の軸
h	膜の厚さ
α	無次元面積

ここで微小面積 dA を

$$dA = a^{(m)} d\alpha \quad (2.5)$$

とし, $T^{(m)}$ の一つの要素を取り出すと

$$\begin{aligned} \tilde{T}^{(m)} &= \frac{1}{2} \rho h N_i N_j \dot{x}_i \dot{x}_j dA \\ &= \rho h \frac{X^4}{T^2} \left\{ \frac{1}{2} N_i N_j \zeta_i' \zeta_j' a^{(m)} d\alpha \right\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

以上のエネルギーの式を変位で微分することで慣性力による膜面にかかる力を得ることができ, 以下ようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{ex} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \tilde{T}^{(m)}}{\partial \dot{x}_i} \right) \\ &= \rho h \frac{X^3}{T^2} \left\{ \frac{1}{2} N_i N_j \zeta_i' \zeta_j' a^{(m)} d\alpha \right\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.1.3 重力項

続いて膜面に作用する重力によるエネルギー $V_g^{(m)}$ に関して記述すると,

$$\begin{aligned} V_g^{(m)} &= - \iint (\rho h dA) g x \\ &= - \iint (\rho h) N_i X \xi_i g_i X^2 a^{(m)} d\alpha \\ &= -(\rho h X^3 g_i) \iint N_i \xi_i a^{(m)} d\alpha \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる. ここで式(2.8)を変位で微分することで,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V_g^{(m)}}{\partial x_i} \right) &= \left(\frac{\partial V_g^{(m)}}{\partial_i X \xi_i} \right) \\ &= -(\rho h X^3 g_i) \iint N_i \xi_i a^{(m)} d\alpha \end{aligned} \quad (2.9)$$

となり, 膜に作用する重力による外力となる.

2.1.4 空気抵抗項

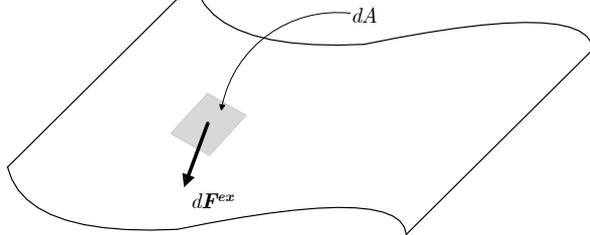


Figure 2 Air resistance acting on the membrane structure

Figure 2 にあるように微小面積 dA に空気抵抗 $d\mathbf{F}_i^{ex}$ が作用していることを考える. $d\mathbf{F}_i^{ex}$ により仮想変位 $d\mathbf{x}$ とした時に仮想仕事の原理より等価節点外力は

$$d\mathbf{F}_i^{ex} = -\frac{1}{2} \rho_{Air} dA^{(m)} C_D |\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{n}|^2 \mathbf{n} N_i \quad (2.10)$$

以上の式を空気抵抗が作用する面で積分すると

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i^{ex} &= \iint -\frac{1}{2} \rho_{Air} dA^{(m)} C_D |\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{n}|^2 \mathbf{n} N_i \\ &= -\frac{1}{2} \rho_{Air} C_D \frac{X^4}{T^2} \iint |\xi'| \cdot \mathbf{n}|^2 \mathbf{n} a^{(m)} N_i d\alpha \end{aligned} \quad (2.11)$$

となり, 膜面に作用する空気抵抗による力が得られる.

2.1.5 膜の内力項

ある点 m での膜の内力によるエネルギー $V_s^{(m)}$ は膜にかかる応力ベクトルを σ , 歪ベクトルを ε とすると

$$\begin{aligned} V_s^{(m)} &= \frac{1}{2} \iint \sigma \varepsilon h \cdot dA^{(m)} \\ &= \frac{1}{2} \frac{EhX^2}{1-\nu^2} \iint \tilde{\mathbf{C}} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon \cdot a^{(m)} d\alpha \end{aligned} \quad (2.12)$$

となり, 膜面に付与する内力のエネルギーが得られる.

2.1.6 膜の折り目(断面)項

膜の折り目にかかるエネルギーは初期の曲がり角 θ_0 その後 θ になっている曲がり梁にさらに曲げた時 (Figure 3) を基礎理論として考える. ^[8]

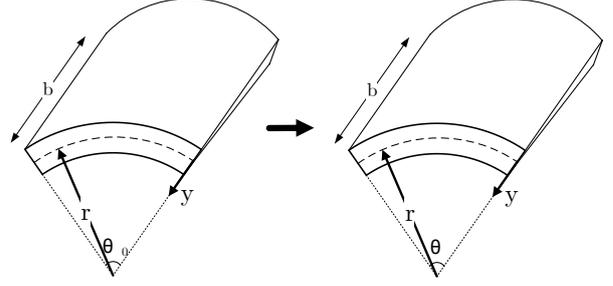


Figure 3 Fold model

以上のモデルから折り目における歪み ε は

$$\varepsilon = \frac{y \cdot d\Delta}{(r-y)\theta_0} = \frac{y(\theta_0 - \theta)}{(r-y)\theta_0} \quad (2.13)$$

となる. 従って折った時に生じるエネルギー V_f は

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{1}{2} \int_{-h/2-(R-r)}^{h/2-(R-r)} \sigma \varepsilon \cdot b \cdot (r-y) \cdot \theta_0 dy \\ &= \frac{EbRh}{2\theta_0} (\theta_0 - \theta)^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

となる, ここで完全に折り目をつけた時を考えると以下の Figure 4 に示すモデルを用いて

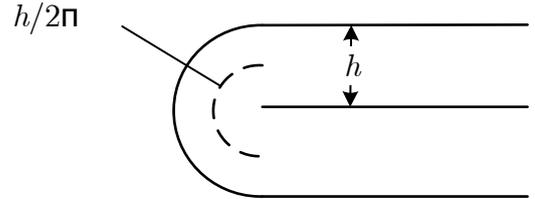


Figure 4 Model when it is folded in completely

このモデルで $\frac{h}{2} \pi = R\theta_0$ と仮定し, 変位 \mathbf{x} で微分すると,

$$\frac{\partial V_f}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial V_f}{\partial X \zeta} = \frac{Eh^2 \pi (\theta_0 - \theta)^2}{\zeta 2\theta_0^2} \quad (1.15)$$

となり, 折り目 (断面) に関しては強くおった時と, 緩く折ったときの2つの場合を考えることができる. ^[8]

2.1.7 折り目(折り線)項

折り目の項で考えるべき事として, 折り目に対して縦方向の影響を考える. (Figure 5 参照)

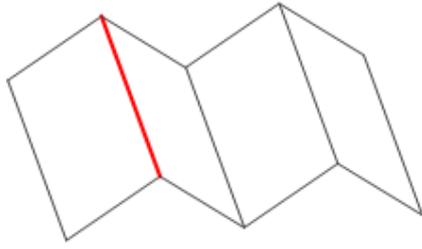


Figure 5 vertical fold model

$$F_{fs} = \frac{EI}{lX} \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{\theta^2}{2} \times \frac{FL}{X} \quad (1,16)$$

ここで l は膜面の大きさに関する変数なので、 l を X と置き換えると

$$F_{fs} = \frac{EI}{X^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{\theta^2}{2} \times \frac{FL}{X} \quad (1,17)$$

となる。

2.1.8 相似則パラメータ

以上の相似則パラメータを一致させるために慣性項で全てのパラメータを割るこれにより、考慮すべき項が一つ減るため、パラメータの調整がしやすくなり、

Table 2 のようになる。相似則ではこれらの値を大小のモデルで一致させなければならない

Table 2 parameter of similarity

重力	$-\frac{gT^2}{X}$	空気抵抗	$-\frac{\rho_{AIR}X^2}{\rho h}$
膜の内力	$\frac{T^2E}{\rho X^2(1-\nu^2)} \tilde{C}$	折り目(断面)	$\frac{EhT^2}{\rho X^3}$
折り目 (縦)	$\frac{Eb^3T^2}{\rho RX^6} FL$		

2.2 実験

以上の理論が成立するかを確認するため、本研究では宇宙環境を模擬するために航空機及び、真空槽を用いた微小重力兼真空環境実験を行った。また重力がどの程度展開挙動に影響を与えるのかを比較するために地上での真空環境実験を行った。

2.2.1 実験モデル

実験に際しては厚さ、折数、折の強さを変えた実験供試体を用い (Figure 6 参照) 回転数等を変え全 15 パターンの実験を行った。その詳細な値は Table 3 に示す。

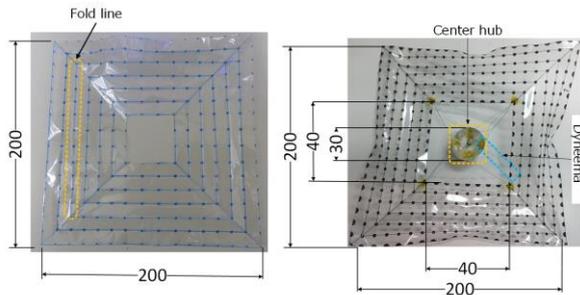


Figure 6 Experiment model (Left : before fold, Right : after fold)

Table 3 Experiment pattern

Times of fold [time]	0	3	5
Thickness of membrane [μ m]	4.5	11.5	23
Forth of fold	Strong Weak		
Spin rate[rpm]	30 250		

本要旨では複数ある供試体のなからから代表として Table 4 に示す供試体を用いる。

Table 4 Sample conditions

Sample No	1	2	3
Times of fold [time]	0	5	5
Thickness of membrane [μ m]	4.5	4.5	4.5
Forth of fold	-	strong	strong
Spin rate[rpm]	250	250	250
Experiment environment	Micro gravity	Micro gravity	1 gravity

膜面を保持・開放する機構に関しては 4 本のガイドで十字状に保持し (Figure 7 参照)、展開の方法に関しては展開の同期を取るために 4 つの電磁石を用いてガイドバーの固定する方法を用いた。展開のトリガーとしては赤外線を用い、航空機内でも問題なく使用できる仕様とした。保持・開放機構の外観を Figure 8 に示す。

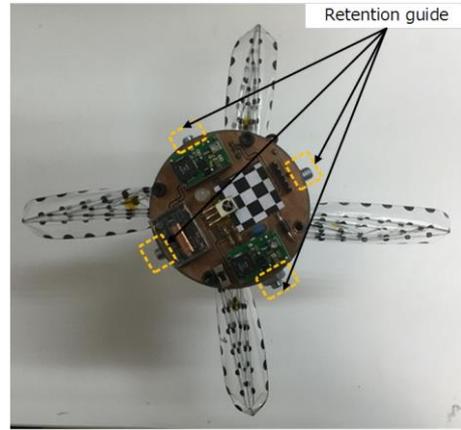


Figure 7 Storage state

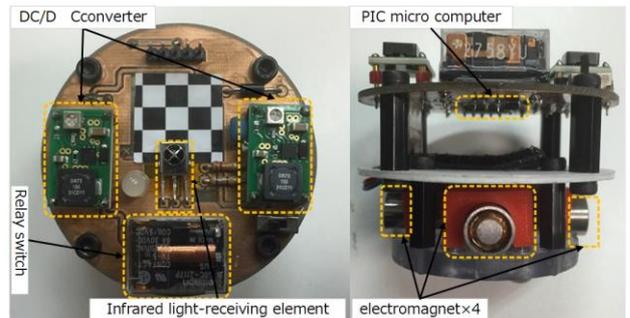


Figure 8 Deployment mechanism

2.3 展開挙動結果

展開挙動の観測に関しては、1000fps で撮影可能な高速度カメラを2台用いたステレオ視撮影で行った。Figure 9, Figure 10 では展開の際の動画を切り抜いたものを掲示する。

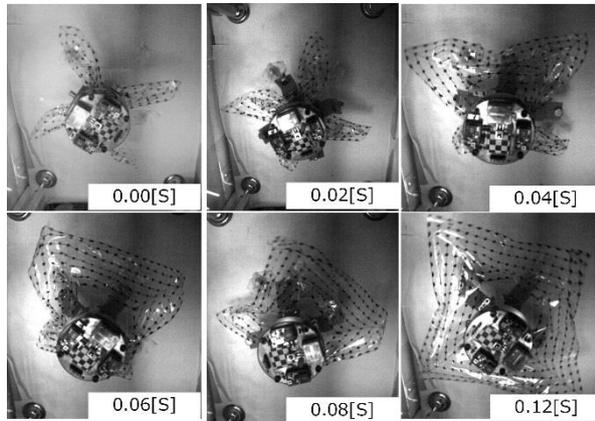


Figure 9 deployment picture (sample No.1)

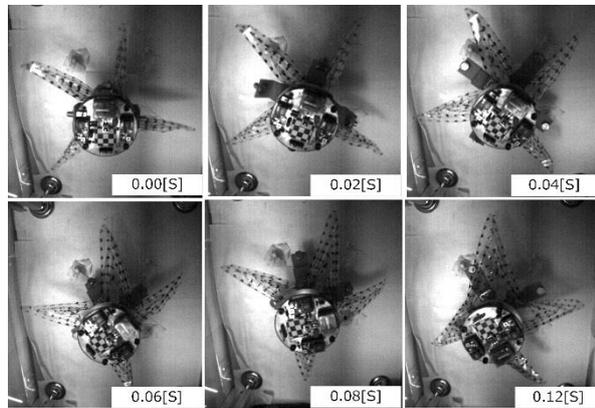


Figure 10 deployment picture (sample No.2)

3. 考察

本研究では、理論的に相似則の関係式を求めたものの、その理論式で相似則が成立するかどうかの検証を行うには至らなかった。しかし、地上環境実験及び、微小重力環境実験の結果から、定性的ではあるが折り目の影響が膜面展開に大きく寄与するパラメータであると考えられる。特に重力環境では膜に重力の力が加わり開きやすいが、無重力ではその力が働かないため、折り目による影響がより顕著に現れた。また、膜面に折り目がついている場合には、折り目のエネルギーが強く、膜本体にかかる慣性力のみでの完全展開は難しいと考えられる。これは、理論式にもあるように慣性力によるエネルギーが折り目による剛性エネルギーよりも小さかったためと推測できる。そのため完全に展開させるためには膜全体にかかる慣性エネルギーを増やす必要があると考えられる。今後この項目に関して定量的に評価していく必要がある。

Figure 9, Figure 10 から膜面を保持していたガイドの同期性は取れているにも関わらず、展開における対称性はほぼないと言える。本来膜にかかる遠心力は一樣であるため展開には対称性が見られると考えていた^[4]。これは折り目なしの供試体でも同様のことが言えるため、微小ではあるが、真空槽内にある微小な空気の影響を受けていることも考えられる。その他にも、展開の初期状態の違いも原因の一つとして考えられる。これらの

検証に関しては、今後地上での実験で明らかにしていく必要がある。

地上での重力環境と微小重力環境での展開の差は定性的にはあまり変化は見られなかった。地上では重力による影響から低スピンドルでの実験は困難であるため、無重力環境実験で低スピンドルでの実験を行い、他のパラメータの影響を限りなく受けないような状態で重力パラメータを抽出することで、地上での実験から、無重力環境での展開挙動を推定できるのではないかと考えられる。また、重力環境での実験及び無重力環境での実験を今後より定量的に比較し、重力による影響を考慮していかなければならない。

4. 結言

本研究の結言を以下に記す。

1. 遠心力を用いた膜面展開における相似則の理論式を求めたがその評価には至らなかった。
2. 膜面展開において折り目がある膜は、折り目による影響力が強く膜面のみには負荷する慣性力のみでは展開しないことが示された。
3. 展開挙動の非対称性は折り目及び重力以外のパラメータが要因であることが定性的に示された。

5. 今後の展望

以上を踏まえ、今後実際に航空機実験で行った実験を元に、ステレオ視法による特徴点追尾によって3次的に膜の挙動を復元し、以下のことを行っていく予定である。

1. 小型の膜面と中型の膜面の実験を通して相似関係を定量的に比較して、本研究で求めた理論式の妥当性の検証を行う。
2. 本研究で行った複数の実験結果を定量的に比較することで、複数あるパラメータの内どのパラメータが強く影響するのかを比較・評価する。
3. 本実験の結果から数値計算を用いて、実際に宇宙空間で利用されるような大型の膜面との相似則の成立性に関して、評価するとともに、どの程度の大きさまで、相似則が成立するのかを定量的に評価する。
4. 求めた相似則を元に、大型の膜面の展開挙動を数値解析及び、本研究の実験結果を元に推定する。

以上の事を今後の研究として行っていく。

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」
- [2] 日本機械学会：「JSME テキストシリーズ 材料力学」2012年
- [3] 柳澤正弘：「遠心展開方式膜面構造物の相似則に関する研究」日本大学卒業論文、2007年
- [4] 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年