

柔軟構造物に関する研究

—膜面の変形の分岐構造と振動による膜の折り畳み形状の変化の研究—

宮崎研究室

屋宮 拓海, 西川 尚希

1 諸言

近年, 宇宙開発において, ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」に代表されるように大型の膜面構造物など, 高収納性, 可展開, 超軽量である柔軟構造物の利用が, 次世代の宇宙構造物として開発及び実証されている. 宇宙への搬送のコストの観点から, ペイロードはより小さく, より軽量であることが望ましい. 柔軟構造物は, 柔軟で低剛性といった特徴を有するが, それ故に薄膜の膜面構造物においては, 膜面が変形しやすく, しわや亀裂が生じ性能が低下するといった問題がある. また, これらの柔軟構造物は非常に軽量であるため, 地上実験の際には大気や重力の影響が大きく, 実験から宇宙空間での展開挙動や状態を推定することは難しい. そのため, 数値解析から膜面の変形を予測する技術確立が必要となる. 本研究では, 膜の面外座屈の解析手法と, 打上げ時の振動が膜の折り畳み形状に与える影響を数値計算により評価する.

2 膜面の変形の分岐構造に関する研究

2.1 背景

ソーラーセイルに代表される膜面宇宙構造物は, しわやたるみができてしまうと, その性能に大きな影響を与えることがある. 例えばソーラーセイルの場合, 想定外の部分にしわが残っていたり, 想定外の方向に膜面がたるんでいたりすると, 姿勢の制御が困難になってしまう. そこで, 膜面に生じるしわやたるみの形状の予測が重要になってくる.

2.2 目的

膜面構造物に実現象を正確に表現できる計算手法の開発を行うため, 構造解析に広く用いられる汎用非線形有限要素解析プログラム ABAQUS を用い,

しわの解析と形状予測を行い, 本研究室で行われてきた矩形せん断モデルの実験結果及び本研究室で現在柔軟構造物の解析に用いられている本研究室にて開発された計算コード NEDA (Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis code) を用いた解析モデルと ABAQUS で得られた解析結果の比較を行い, 解析の妥当性を評価する.

2.3 解析

2.3.1 解析手法

本論文では, Pellegrino^[1]らが行った実験及び数値解析を参考に解析を進めていく. 一般に構造物は, 例えば柱などは構造初期不整などが無い場合は座屈を起さずにそのまま圧縮される. そこで, 今回は上辺に y 方向へ予め変位を与えてやり構造的な不整を起し, その後 ABAQUS を用い座屈固有値解析を行い得られた座屈モードを形状初期不整として膜面に与えることによりしわを解析する.

2.3.2 実験及び解析モデル

実験用膜面モデルとして矩形せん断モデルを用いた. Fig.1 にモデルの詳細, Table.1 にモデルパラメータを示す. 矩形せん断モデルでは, 中央部に一様なしわが発生し左右両自由端付近にたるみが生じる.

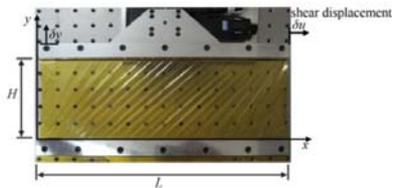


Fig.1 矩形せん断モデル

Table. 1 矩形せん断モデルパラメータ

膜幅	L	300 [mm]	変位量(せん断) δu	2 [mm]
膜高さ	H	100 [mm]	変位量(引張) δv	30 [μm]
膜厚	t	12.5 [μm]	ポアソン比 ν	0.3
ヤング率	E	3.0[GPa]	密度 ρ	1420 [kg/m^3]

2.3.3 実験結果との比較

せん断量 $\delta u = 2.0[\text{mm}]$ を上辺に加えた時の解析結果を以下に示していく。Fig.2 の左側に NEDA, 右側に ABAQUS でのしわの解析結果を示す。青色の部分が Z 軸の負の方向の変位であり、赤色の部分が Z 軸に正の方向の変位である。Fig.2 の右図を見ると、左上と右下の部分がたるんでおり、一番自由端に近い所に出来るしわの変位が大きいことがわかる。

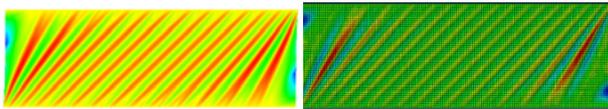


Fig.2 NEDA 及び ABAQUS の解析結果

次に、Fig. 3 に実験結果、NEDA と ABAQUS による計算結果での中央断面のしわの形状比較したものを示す。また、Table.2 に各解析で出来たしわの数をまとめる。

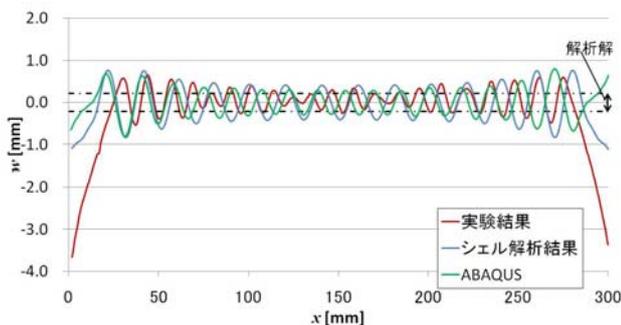


Fig.3 中央断面のしわ波形

(実験結果、NEDA と ABAQUS の計算結果の比較)

Table.2 しわ形状の比較

	実験結果	NEDA	ABAQUS
しわの数	21	14	18
しわの高さ(平均値)[mm]	0.3203	0.5327	0.3739
しわの波長(平均値)[mm]	6.1155	9.9535	8.3583

まず、Fig. 3 より定性的に結果を見ると、自由端に近づくにつれ、しわの高さが大きくなる傾向は、NEDA 及び ABAQUS 共に解析できている。また、Table.2 より、定量的な値は ABAQUS での解析の方が実験結果に近い値となっているが、精度的には両者の解析結果とも、実験結果から若干離れた値となっている。特に、Fig.3 からわかる通り、ABAQUS では左右反対称な形状となっており、これは、

ABAQUS では重力を考慮していなかったためと考えられる (ABAQUS で重力を考慮せずに座屈解を求める際には、形状初期不整に可能な限り固有値の小さい固有モードを使用した)。ただし、それでも、ABAQUS の結果はより実験に近いものとなっている。次に、しわの数でも、NEDA に比べて、ABAQUS ではより実験に近い結果を得ることができた。これは、用いている要素の違いと考えられ、薄膜の変形をシェル要素で解析する場合には、NEDA が用いている MITC シェル要素ではなく、ABAQUS が用いている DKF 要素がより適していると考えられる。

2.4 結論

ABAQUS では、NEDA と比較してしわの形状がより実験に近いものを得ることができた。今後は重力も考慮したうえで、より実験に近い解が得られるか確認したい。

3 振動による膜の折り畳み形状の変化

3.1 背景

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」は、薄膜を利用したソーラーセイルを実装しており、折り畳んだ膜を探査機に巻きつけて収納している。低エネルギーで展開できるよう、膜の四隅に先端質量をつけ、探査機の遠心力で展開できるような折り畳み方をしている。Fig.4 に IKAROS の膜面展開時、収納時の様子を示す。



Fig.4 IKAROS 膜面展開時・収納時 [2]

膜面構造物は非常に薄いため、収納時に強固な固定をしてしまうと摩擦などの影響により、膜面が破れてしまう可能性があり、強固な固定ができないため、ロケットの打ち上げ時の振動により、膜の折り

畳み形状が変化してしまう問題がある。Fig.5に振動による膜の折り畳み形状の変化の様子を示す。

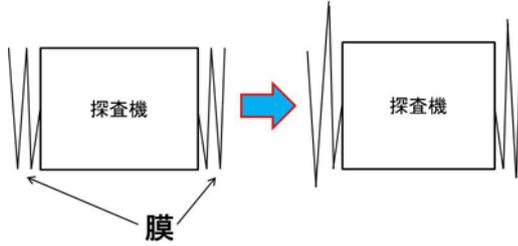


Fig.5 折り畳み形状の変化

Fig.5のように膜の折り畳み形状が変化してしまうと、低エネルギーで展開ができるよう折り畳んで収納したにも関わらず、膜の展開挙動に影響がでる可能性がある。したがって、振動が膜の折り畳み形状にどのような影響を与えるのかを予測する必要がある。

3.2 目的

振動による膜面の折り畳み形状の変化を予測することが本研究の目的である。

3.3 解析モデル

振動によって、折り目部分の形状がはみだすときの条件を推定したいため、以下のような簡易モデル(Fig.6)で表現した。ここで m_n は質点の質量、 k_n はバネ係数、 L_n はバネの長さである。左側の壁を振動数 f で強制振動させる。

振動によって、折り目部分の形状がはみだすときの条件を推定したいため、以下のような簡易モデルで表現した。

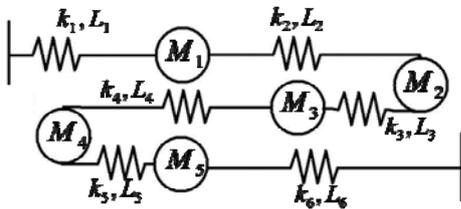


Fig.6 解析モデル

この系の運動方程式は

$$m_1 \dot{v}_1 = -k_1(x_1 - L_1 + f) + k_2(x_2 - x_1 - L_2) + D_1 \quad (3.1)$$

$$m_2 \dot{v}_2 = -k_2(x_2 - x_1 - L_2) + k_3(x_2 - x_3 - L_3) + D_2 \quad (3.2)$$

$$m_3 \dot{v}_3 = -k_3(x_2 - x_3 - L_3) + k_4(x_3 - x_4 - L_4) + D_3 \quad (3.3)$$

$$m_4 \dot{v}_4 = -k_4(x_3 - x_4 - L_4) + k_5(x_5 - x_4 - L_5) + D_4 \quad (3.4)$$

$$m_5 \dot{v}_5 = -k_5(x_5 - x_4 - L_5) + k_6(x_5 - L_5) + D_5 \quad (3.5)$$

ここで、 v_n は質点の速度、 D_n は質点にかかる摩擦力である。

3.4 計算

3.3で述べたFig.6のようなバネマス系をルンゲクッタ法で解く。

質点に作用する張力 T は、

$$L_n < x_{n+1} - x_n \quad : \quad T = k(x_{n+1} - x_n - L_n)$$

$$0 < x_{n+1} - x_n < L_n \quad : \quad T = k'(x_{n+1} - x_n - L_n)$$

$$-L_n < x_{n+1} - x_n < 0 \quad : \quad T = k'(x_{n+1} - x_n + L_n)$$

$$x_{n+1} - x_n < -L_n \quad : \quad T = k(x_{n+1} - x_n + L_n)$$

(3.6)

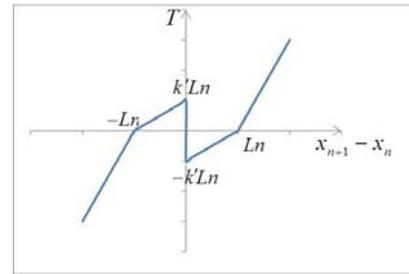


Fig.7 変位 $x_{n+1} - x_n$ と張力 T の関係

とする。変位 $x_{n+1} - x$ と張力 T の関係をFig.7に示す。折り目部分と隣接している部分は、剛性が高くなっていると考えられるため、バネ係数 k' は以下のように判定を行う。

折り目と隣接している : $k'(k' < k)$

折り目と隣接していない : $k'(k' \cong k)$

膜の折り畳み形状の変化には膜面間の摩擦が大きく関与していると予想される。そこで以下の通り、摩擦を考慮することとする。膜面同士の摩擦の判定をするためにFig.8のようなモデルを考える。まず、摩擦の方向については、質点と質点と触れ合う膜面部分との相対速度 $(v - v')$ の正負より判定を行う。 v は膜面と触れ合っている質点の速度、 v' は質点と触れ合う膜面部分の速度である。摩擦力の大きさは、質点 M にかかる摩擦力を D とすると、質点 M_n, M_{n+1} にかかる摩擦力 D_n, D_{n+1} は、

$$D_{n-1} = \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n - x_{n-1}} D, \quad D_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} D \quad (3.7)$$

と計算する.

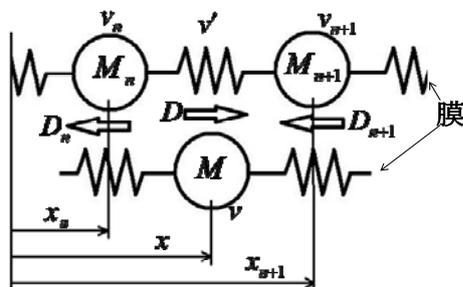


Fig.8 概要モデル

3.5 結果

Table3に質点の初期位置, Fig.9と Fig.10に質点の初期位置は動かさず, 強制振動を与えて振動させた計算結果を示す. Fig.10より, 質点1は強制振動している壁と隣接しているため, 強制振動の影響を最も受けており, 質点3~5は強制振動の影響をあまり受けていないが, 振動が収まることはなく規則的振動を続けていることがわかる.

Fig.9は $t=0\sim 350s$ での質点2~4の振動の様子をグラフ化したものである. 質点2と3のグラフを見ても, 質点の位置が一時的に入れ替わっていることが確認できる. しかし, 質点位置が入れ替わった状態を維持することはなかった (Fig.10).

また, Fig.10から, それぞれの質点位置が初期位置から $0.05\sim 0.25[m]$ 程度ずれた位置を中心とした規則的振動に収まっていることが確認できた.

Table.3 質点の初期位置

質点の初期位置	$M_1 = 1.0$
	$M_2 = 2.5$
	$M_3 = 1.5$
	$M_4 = 0.0$
	$M_5 = 1.0$

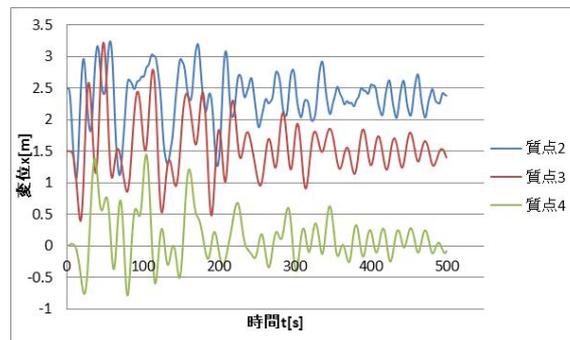


Fig.9 時間 t - 質点の変位 x

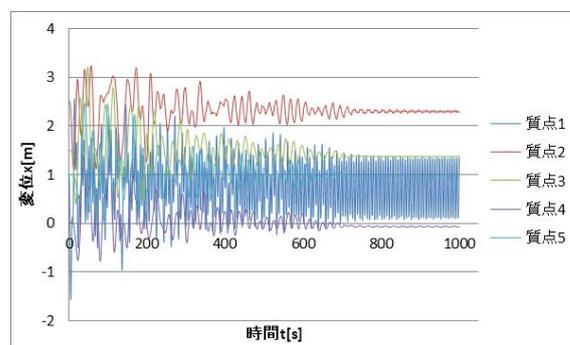


Fig.10 時間 t - 質点の変位 x

3.6 結論

Fig.6に示したモデルで数値計算を行った結果, 振動により膜の折り畳み形状が変化することを確認することができた. したがって, Fig.6のモデルでこの計算を行えば, 振動による膜の折り畳み形状の変化を予測することができる.

4 結言

柔軟構造物に関する各研究を進め, 今回示した解析方法に, 地上実験などによる実測データ併用し, 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.

5 参考文献

- [1] Wong, Y.W. and Pellegrino, S., "Wrinkled Membranes Part III: Numerical Simulations", *Journal of Mechanics and Materials and Structures*, January 2006
- [2] JAXA, HP (http://www.jaxa.jp/index_j.html)
- [3] L. マイロビッチ: 電子計算機活用のための振動解析の理論と応用(上), ブレイン図書出版株式会社