

## 動的モード分解を用いた遠心展開膜の運動モード解析

## Motion mode analysis of centrifugally deployed membrane using dynamic mode decomposition

○吉光航平<sup>1</sup>, 山崎政彦<sup>2</sup>\*Kohei Yoshimitsu<sup>1</sup>, Masahiko Yamazaki<sup>2</sup>

Abstract: Gossamer structures such as membranes have high nonlinearities such as easy buckling, small damping, large displacement and large rotation. Therefore, it is not easy to predict the dynamics and the behavior after deployment of the membrane, and it has not yet been understood quantitatively. The purpose of this study is to extract the main motion modes using the modal decomposition method and clarify the composition of the deployment motion of the membrane. In this paper, we have extracted motion modes that represent the shape of the membrane after deployment and vibration components in the in-plane and out-of-plane directions. In the future, we will clarify the difference in the motion modes extracted from the deployment motion in different analysis conditions.

## 1. 研究背景・目的

非常に薄い膜面(数  $\mu\text{m}$  程度)やケーブルといった極めて柔軟な展開構造(ゴッサマー構造)は、軽量でありながら、小さく折りたたんだ状態で打ち上げ、軌道上で展開することにより大面積を確保することが可能なため、ソーラーセイルやサンシールドなどの大型宇宙構造様式として注目されている。2010年、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」を開発し、その軌道実証により、膜面の展開・展張および光子加速下での航行・軌道制御に世界で初めて成功した。また IKAROS の成功を受け、現在 JAXA は木星トロヤ群小惑星の探査を目的とした次期ソーラーセイル「OKEANOS」の開発を行っている。

膜のようなゴッサマー構造は、容易に座屈し、減衰が小さく、運動が大変位・大回転である等、高い非線形性を持つ。また膜面上には薄膜太陽電池や液晶デバイス等が多く貼付されており、これらが展開形状に影響を及ぼすことも考えられる。従って、膜面の展開運動や展開後の挙動を予測することは容易ではなく、現在も膜面の運動を定量的に理解するまでには至っていない。

そこで本研究では、モード分解法を用いて主要な運動成分を抽出し、膜面の展開運動の構成を明らかにすることを目的とする。また膜の剛性や先端質量の重さ等の設計パラメータに対して、運動モードの構成がどのように変化するかを明らかにすることで、展開の妨げになる、もしくは展開をアシストする要因が明らかとなり、膜面の展開性の評価につながるかと考えている。

## 2. モード分解法

スピン展開式のソーラーセイルの展開運動は、①衛星スピンによる回転運動、②膜の内力による伸縮運動及び、③衛星の姿勢や先端質量の位置による面外方向の振動といった、複数の周期的な運動から構成されていると考えることができる。以上より、本研究では、動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)<sup>[1]</sup>を用いて、主要な運動成分を抽出する。DMDは、時系列データの時間発展に注目してモード分解を行うことで、ある一つの周波数を持つ固有モードの重ね合わせとして運動を表現することが可能である。

## 3. 数値計算

解析モデル Fig.1 に、解析手順を Table.1 に示す。

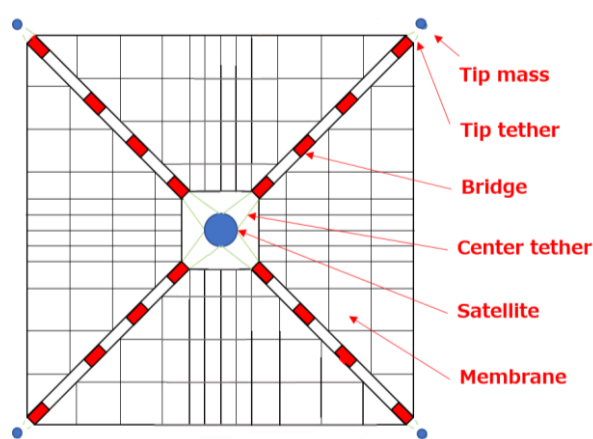


Fig.1. Analysis Model

Table.1. Specifications of Analysis Model

Item	Value
Length of membrane (In/Out)	0.2 / 1.0 [m]
Number of folds	4 [-]
Weight of tip mass	0.01 [kg]
Number of nodes/elements	242 / 221

まず事前解析により、解析モデルの各節点の位置ベクトルの時系列データを取得する。膜の運動解析には非線形有限要素法解析コード NEDA を使用した。得られた各節点の位置ベクトルを用いて、以下のような行列  $\mathbf{X}$  を定義する。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{a,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1,b} & \cdots & x_{a,b} \\ y_{1,1} & \cdots & y_{a,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1,b} & \cdots & y_{a,b} \\ z_{1,1} & \cdots & z_{a,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1,b} & \cdots & z_{a,b} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$  は  $i$  ステップ目における節点  $j$  の位置ベクトルである。  $a$  は総ステップ数、  $b$  は総節点数である。 行列  $\mathbf{X}$  を時間ステップ方向に 1 つずつずらした行列  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$  より求めた遷移行列  $\mathbf{A}$  の固有値  $\Lambda$ 、固有ベクトル  $\Phi$  を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{a-1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{X}_2 &= \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & \cdots & x_a \end{bmatrix} \\ \mathbf{X}_2 &\approx \mathbf{A}\mathbf{X}_1 \Rightarrow \mathbf{A} \approx \mathbf{X}_2\mathbf{X}_1^{-1} \\ \mathbf{A}\Phi &= \Phi\Lambda \end{aligned} \quad (2)$$

また、固有値(周波数)、固有ベクトル(DMD モード)より元の運動を復元することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\approx \sum_k \phi_k \exp \omega_k t \mathbf{b}_k = \Phi \exp \Omega t \mathbf{b} \\ \omega_k &= \ln \lambda_k / \Delta t, \quad \mathbf{b} = \Phi^{-1} \mathbf{x}_1 \end{aligned} \quad (3)$$

周波数の小さいモードから順に低次モードとし、それぞれのモードがどのような運動を表しているのかを比較した。その結果を Fig.2 に示す。

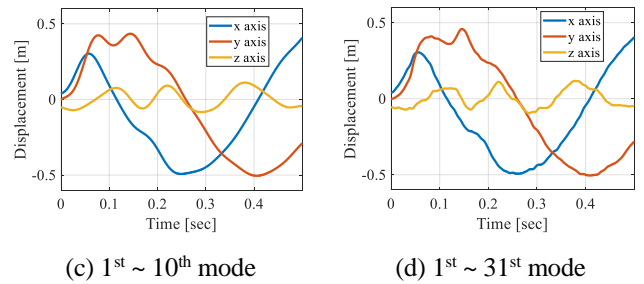
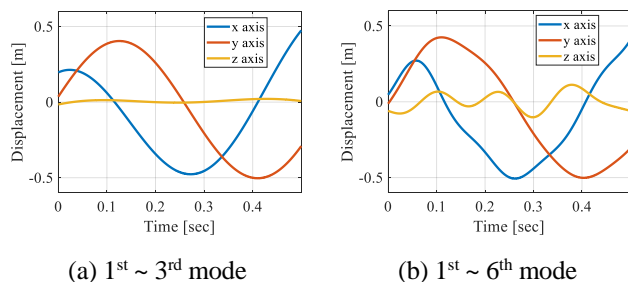


Fig.2. Comparison of Motion Modes

Fig.(a)と(b)を比較すると、3<sup>rd</sup> mode までは  $z$  軸方向の振動成分が見られないのに対して、6<sup>th</sup> mode までを考慮すると振動成分が現れている。つまり 3<sup>rd</sup> mode までは展開後の膜面形状を表しており、6<sup>th</sup> mode までを考慮するとそれに面外方向の振動が加わっていると考えられることができる。さらに Fig.(c)の  $y$  軸の値がピーク付近で振動していることから、10<sup>th</sup> mode までを考慮すると、膜の内力による面内方向の伸縮運動を表現することができると考えられる。Fig.(d)より、さらに高次のモードまでを考慮すると、各軸の運動にのっている高周波の振動成分が表現できている。

#### 4. 結論

本稿における結論を以下に示す。

- 膜面の展開運動に動的モード分解を適用することで、展開運動を周波数ごとの運動モードに分解することができた。
- 展開後の膜面形状や面内・面外方向の振動成分を表す運動モードを抽出することができた。

今後は、異なる解析パターンにおける展開運動から抽出された運動モードにどのような違いが見られるのかを明らかにする。また、それらが展開を妨げる、もしくはアシストする成分なのかを明らかにすることで、展開性の評価を行う。

謝辞

膜の運動解析コードを提供していただいた宮崎康行教授に感謝いたします。

#### 5. 参考文献

[1] J. Nathan Kutz, Steven L. Brunton, Bingni W. Brunton, Joshua L. Proctor : “Dynamic Mode Decomposition: Data-Driven Modeling of Complex Systems”, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2017, p1-24.