

自己展開膜面トラスの振動特性

Vibration characteristic of self- deployable membrane truss

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

加藤渚

Nagisa Kato

Gossamer structure is suitable for large space structure because of its lightweight and high rigidity. As a method for further increasing the rigidity, a combination of a self- deployable truss and a membrane structure has been proposed. It is necessary to understand vibrations after deployment in order to realize a large space structure with the self- deployable membrane truss. Therefore, in this paper, I consider the vibration characteristics of self-developed membrane truss composed of boom, node and membrane. The natural frequency and the vibration mode were calculated and the difference between the case with the latch and without was discussed. Also I described that the stiffness of the whole self-deploying truss greatly affects the rigidity of the boom.

1. 序論

1.1. 研究背景

近年、ミッションの高度化に伴い、大型な宇宙構造物に対する需要が高まっている。大型宇宙構造物には、軽量かつ剛性の高いゴッサマー構造が適していると考えられている。ゴッサマー構造とは膜やケーブル等極めて柔軟で薄く、また細く、圧縮により容易に座屈する、収納・展開がしやすい部材を用いた構造である。このゴッサマー構造の剛性をより高くする方法として、自己展開トラス構造と膜構造を合わせた膜面トラスが提案されてきた⁽¹⁾⁻⁽²⁾。自己展開膜面トラスは図1に示すように、ブーム⁽³⁾、ハブ⁽⁴⁾、ノードと膜から成り立っている。モジュール化が可能であり、スターシェード⁽⁵⁾やSSPS⁽⁶⁾といった未だ実現していない大型宇宙構造物への適用が期待できると筆者らは考えている。大型宇宙構造物を自己展開膜面トラスで実現させるためには、展開後の振動特性の把握は必須であるが、まだ十分な研究はなされていない。

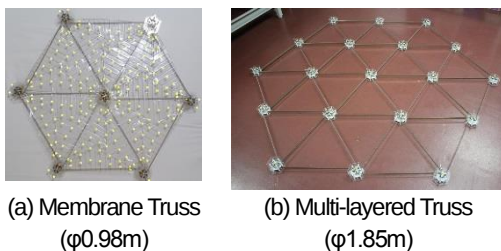


Fig. 1 Self-deployable truss

1.2. 自己展開トラスについて

著者らの研究室では、図2に示すような自己伸展部材のブームと収納部のノードから構成させている自己展開トラスの研究を行っている。中心に軸を通した円筒状のハブにブームを取り付け、軸でノードと固定することで構成される(図2(a))。ノードには伸展方向を定めるためのガイドローラーを取り付けており、ハブを保持状態から解放することで、ブームがガイドローラーに沿いながら直線に伸展する。ブームは収納性に優れていて、円筒状に巻きつけ保持することが容易なため、収納性に優れており、展開後も高比剛性を維持できる。ロケットに搭載できるペイロードは、大きさ、質量ともに制限があるため、収納性、展開性を必要とする大型宇宙構造物にとって、この保

持方式は大きな長所である。また、巻きつけ後に発生する歪エネルギーを解放することで、アクチュエータを必要とせずに自己伸展し、展開後、ブームは支持部材となる展開構造である。自己展開トラスは収納性、構造様式の簡素さ、展開後の剛性の高さ、モジュール化可能な点等の多くの利点を持つ。

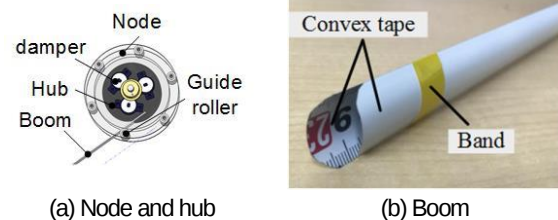


Fig. 2 Each Element

1.3. 目的

そこで、本研究では、大型宇宙構造物を自己展開膜面トラスで実現させるために自己展開膜面トラスの固有振動解析を行い、境界条件が固有振動数、固有振動モードへ及ぼす影響を評価する。

2. 3N3Bモデルの振動特性理論

この章では、自己展開膜面トラスの基本特性を理解するため、3N3Bモデルの振動特性を調べる。3N3Bとは図3に示すように、3本のブームと3つのノード及びハブから成るトラスに三角形膜を取り付けたもので、ハブとノードの回転軸を一本のシャフトで共有している(以降、これを3N3Bと呼ぶ)。3N3Bは三角形のトラス構造であり、主に軸力で外部負荷に耐えることで、ブームには曲げモーメントやせん断力がほとんどかからないという特徴がある。

2.1. 膜面内の自己平衡状態

まず、膜面を一様に展張するために必要な支持力を求める。支持力以外の外力が作用せず自己平衡状態にあるときの形状等を図4(a)に示す。また式の導出の際に必要な変数や記号を表1に示す。

固有振動数や振動モードを得るためには、自己平衡状態を理解することが必要である。

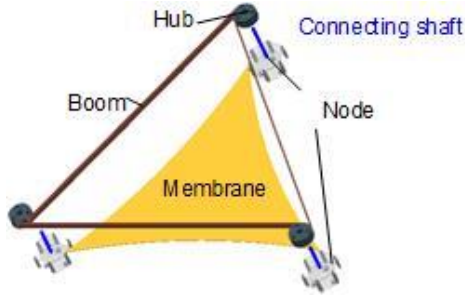
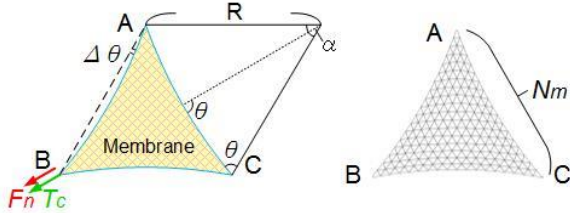


Fig. 3 3N3B membrane truss



(a) Triangular membrane (b) Finite element mesh

Fig. 4 Membrane under uniform tension

Table.1 Nomenclature

T	ブーム 2 本の内力の合成
T_c	テープの張力
F_m	膜力
F_n	膜の張力

膜は正三角形の周辺を半径 R ，内角 α の円弧状に切り，テープで補強したものであり，三角形の頂点間の変形前の長さを L_{om} ，変形後の長さを L_m とする。

$$L_m = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2.1.1)$$

$$l_m = 2R \sin \frac{\alpha}{2N_m} \quad (2.1.2)$$

弧状のエッジ部分を N_m 本で要素分割する場合，変形後の要素長さを l_m とする。折れ線のなす角を θ ，膜の頂点において膜が削られている部分の角度を $\Delta\theta$ とすると(図 4)，

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{\alpha}{N_m} \right) \quad (2.1.3)$$

$$\Delta\theta = \theta - \frac{1}{2} \pi - \alpha \quad (2.1.4)$$

と表せる。エッジ上の接点に作用する力の方向はエッジの法線方向であり，膜やエッジの工学歪を ε_m とすると，その大きさは

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{E_m h}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot 2l_{om} \sin \theta \quad (2.1.5)$$

である。ただし，膜のヤング率を E_m ，厚さを h ，ポアソン比を ν とする。 e は膜の Green-Lagrange 歪であり，次式で表せる。

$$e = \varepsilon_m + \frac{1}{2} \varepsilon_m^2 \quad (2.1.6)$$

$$l_m = l_{om}(1 + \varepsilon_m) \quad (2.1.7)$$

また，エッジの張力は

$$T_c = E_c A_c e(1 + \varepsilon_m) \quad (2.1.8)$$

である。ただし，テープの断面積を A_c ，ヤング率を E_c とする。ここで，エッジ上における節点の力の釣り合いより，

$$\frac{1}{2} \frac{E_m h}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot 2l_{om} \sin \theta = 2E_c A_c e(1 + \varepsilon_m) \cos \theta \quad (2.1.9)$$

となる。また，膜の頂点に作用する力，張力 F_n は膜力と 2 本のテープの張力の和であるから，次式で表せる。

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{1}{2} \frac{E_m h}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot 2l_{om} \sin \left(\frac{\pi}{6} - \Delta\theta \right) \\ &\quad + 2E_c A_c e(1 + \varepsilon_m) \cos \left(\frac{\pi}{6} - \Delta\theta \right) \\ &= \frac{E_m h l_{om}}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi}{6} - \Delta\theta + \theta \right)}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

よって，膜が削られている部分の角度 $\Delta\theta$ と分割数 N_m を与えると張力 F_n が決まる。

2.2. ハブとノードの相対回転拘束がない場合のブーム内力

ハブとノードがラッチによって固定されていない場合（以下，モーメントフリーハブ），ハブ単体でモーメントが釣り合っている必要がある。

モーメントフリーハブの場合，以下の条件が成り立つ。

- (1) ブームの曲げモーメントとブームの内力によってハブのまわりのモーメントは生じない。
- (2) ノードの中心は膜の中心と頂点を結ぶ線上にある。
- (3) ブームの内力の合成 T は膜の中心と頂点を結ぶ線上にある。

作用する力を図 5 に示す。ブームの変形後長さを l_b ，ハブの半径を r_b ，ハブの接線方向のブーム内力を T_b ，法線方向の内力を S_b ，曲げモーメントを M_b とすると，ハブ周りのモーメントの釣り合いは次式で表せる。

$$M_b - T_b r_b = 0 \quad (2.2.1)$$

式(2.2.1)は，ハブがノードに対して相対回転することで満たされる。その相対回転角を θ_h とする。

また，ハブ中心に作用する力は

$$T_m = \sqrt{3} \sqrt{T_b^2 + S_b^2} \quad (2.2.2)$$

となる。

ハブの中心に作用する力の方向は

$$\frac{\pi}{6} + \tan^{-1} \left(\frac{S_b}{T_b} \right) + \theta_h \quad (2.2.3)$$

である。また，膜の張力の方向は

$$\frac{\pi}{6} + \tan^{-1} \left(\frac{2r_h}{d_m} \right) \quad (2.2.4)$$

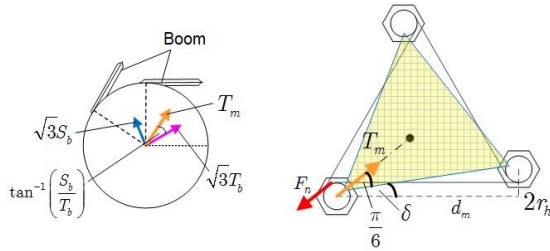
である。膜の張力とハブ中心に作用する力が釣り合っていないとなければならない。

$$\frac{\pi}{6} + \tan^{-1}\left(\frac{2r_h}{d_m}\right) = \frac{\pi}{6} + \tan^{-1}\left(\frac{S_b}{T_b}\right) + \theta_h \quad (2.2.5)$$

となるように、 L_b を決定する。式(2.25)を δ とおくと、式(2.2.1)～(2.2.5)より、モーメントフリーハブにおいては

$$\begin{cases} M_b = T_b r_b \\ F_n = T_m = \sqrt{3}\sqrt{T_b^2 + S_b^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{S_b}{T_b}\right) + \theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{2r_h}{d_m}\right) \equiv \delta \end{cases} \quad (2.2.6)$$

を満たさなければならない。



(a) Force acting on the hub (b) Moment free hub 3N3B
Fig. 5 Force balance in 3N3B

2.3. ハブとノードの相対回転拘束がある場合のブーム内力

ハブとノードがラッチによって固定されている場合、ブームは膜力によって圧縮され、膜の中心と頂点を結ぶ線はブームの内力の合成 T の作用線を通る。ハブの中心に作用する力は次式で表せる。

$$T_m = \sqrt{3}\sqrt{T_b^2 + S_b^2} \quad (2.3.1)$$

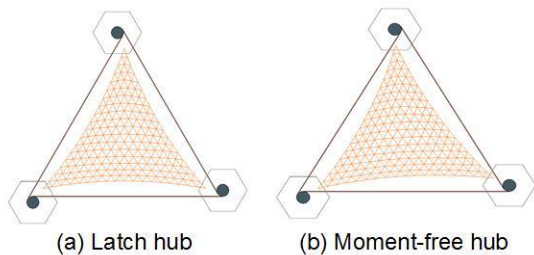
相対回転拘束がある場合では、

$$F_n = T_m = \sqrt{3}\sqrt{T_b^2 + S_b^2} \quad (2.3.2)$$

を満たせばよい。

2.4. 数値解析

有限要素法を用いて数値解析を行う。膜のエッジは図4(b)のように等間隔で N_m 個の要素に分割する。ハブがラッチによってノードに固定されている場合とハブが固定されていない場合の自己平衡状態を図6に示す。ハブが固定されていないとシャフトはモーメントフリーになる。ラッチ付きのハブの場合 F_n と T は同一直線上に作用する。表2は、有限要素法解析に用いた 3N3B の特性を示す。なお、膜の分割数 N_m は18で、ブームの分割数は20とする。



(a) Latch hub (b) Moment-free hub
Fig. 6 Self-equilibrium state

Table.2 Material and geometrical properties

Item	Values	Item	Values
E_m	3.0GPa	l_m	0.4m
ε_m	1.0×10^{-4}	h_m	12.5 μ m
ν_m	0.3	$\Delta\theta$	10 deg

よって、図7～9に4～7番目の固有振動モード及び対応する固有振動数を示す。なお3番目までのモードは剛体の並進運動であるので省略する。4番目のモードは剛体の回転運動を示している。

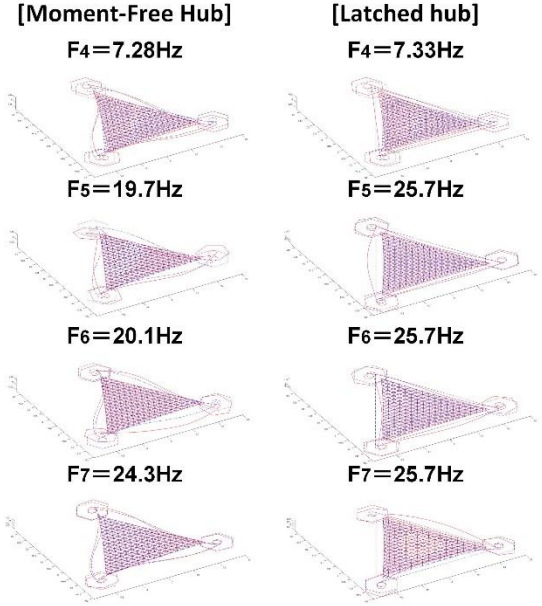


Fig. 7 Natural frequency mode ($\Delta\theta = 2.4[\text{deg}]$)

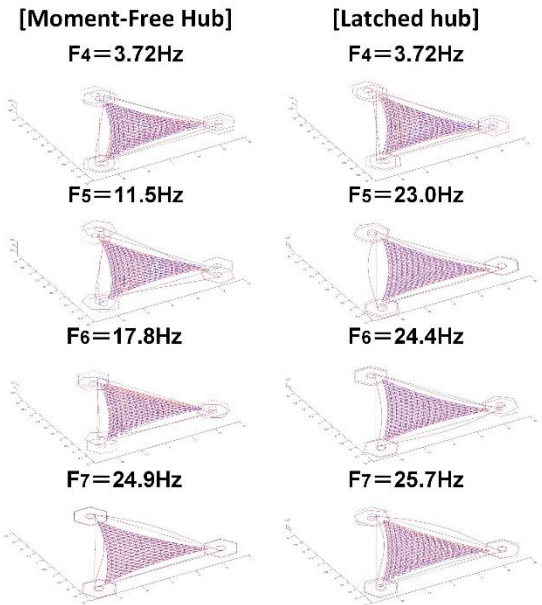


Fig. 8 Natural frequency mode ($\Delta\theta = 10[\text{deg}]$)

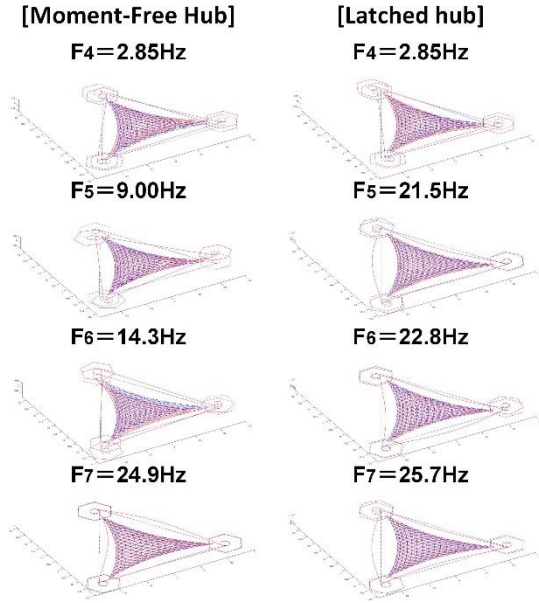


Fig. 9 Natural frequency mode ($\Delta\theta = 18[\text{deg}]$)

ラッチ付きハブの3N3B、モーメントフリーハブの3N3B両方とも、膜の切り込み角度を大きくすると振動数が小さい値になる。これは、式(2.1.10)、表3からもわかるように、テープの張力が小さくなるため振動数も小さくなる。それにより、自己展開膜面トラス全体の剛性が低くなる。切り込み角度を小さくしすぎると、モーメントフリーハブの3N3Bではブームの内力が大きくなり圧縮がかかるためSカーブのように座屈した状態で自己平衡を保っている。また、曲げモーメントがブームの内力により、大きくなっていることがみえる。よって、切り込み角度は10[deg]が適している。

低振動モードであるほど、ブームがたわみ、膜はほとんど変化しない。この結果より、3N3Bだけでなく、より大きな自己展開膜面トラスにおいても、構造全体の剛性は、主にブームの剛性によって影響を受けるといえる。

Table.3 The force due to change in angle

$\Delta\theta$	T_c	F_m	F_n
2.4[deg]	0.0563	56.8	56.8
10[deg]	0.0410	11.0	11.0
18[deg]	0.0252	6.42	6.42

3. 3N3Bモデルの応用

3.1. 7N12Bモデルの自己平衡状態

自己展開トラスの基本構造となる3N3Bの自己平衡状態を求め、数値解析を行った。次に、3N3Bを応用させた、さらに大きい自己展開トラス7N12Bモデルの自己平衡状態を示す。7N12Bとは7つのノードと12つのブーム、ハブ、と六角形の膜を取り付けた構造である。ラッチ付きハブの7N12Bの自己平衡状態にあるときの形状等を図10に示す。ただし、半径方向ブームの軸力を T_1 、周方向ブームの軸力を T_2 、周方向ブームの軸力の合成を T_2' としている。7N12Bにおける、膜の張力は2.1節同様に計算すると、

$$F_n = \frac{1}{2} \frac{E_m h}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot 2\ell_{om} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta\theta\right) + 2E_c A_c e(1 + \varepsilon_m) \cos\left(\frac{\pi}{3} - \Delta\theta\right) \quad (3.1.1)$$

$$= \frac{E_m h \ell_{om}}{1 - \nu} e(1 + \varepsilon_m) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \Delta\theta + \theta\right)}{\cos\theta}$$

となる。展開後、ブームに作用する軸力は周方向ブームの軸力 T_2 のみで、 $T_1 = 0$ より、展開後は $F_n = T_2'$ となる。したがって、ブームの軸力と膜の張力は同一直線上で作用する。

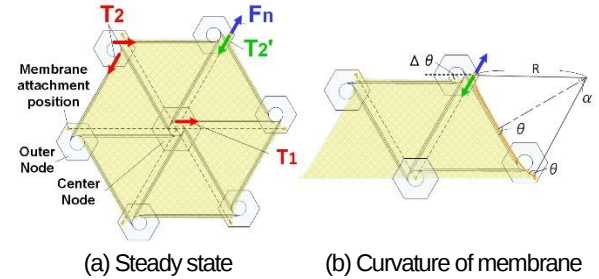


Fig. 10 7N12B membrane truss

4. 結論

自己展開膜面トラス3N3Bの振動特性を示した。パラメータの変化に応じた自己平衡状態の形状を知ることで、try&errorによる設計ではなく、数値解析をもとにした設計を可能にすることが出来る。

自己展開膜面トラス全体の剛性はブームによる影響が高いことがいえる。これらを踏まえ、振動の影響を考慮した自己展開トラスを提案していく予定である。また今後は7N12Bの振動特性も示したい。

謝辞

本研究は文科省・科研費18H03817の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] 渡邊, 伊藤, 堀, 組紐を被覆した伸展構造物の検討, 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4496, pp.1-6, 2012.
- [2] Miyazaki, Y, Fukunaga, M., and Kousaka, D, Membrane Structure Supported by Self-Deployable Truss for Space Applications, 2018 AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-1201, pp.1-13, 2018.
- [3] 田村明寛, バイコンベックスブームを用いた自己展開構造物の展開挙動, 平成28年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2017年.
- [4] 福永桃子, 宮崎康行, 高坂大樹, 片岡星大, 円筒に巻きつけられたコンベックステープの自己伸展運動における非剥離条件, 第62回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1M18, pp.2-3, 2018.
- [5] NASA: Exo-S Final Report, Exoplanet Exploration, <https://exoplanets.nasa.gov/exep/about/exos/>, 2015.
- [6] J.O. McSpadden and J.C. Mankins: Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology, IEEE Microwave Magazine, Vo.3, pp.46-57, 2002