

自己展開膜面トラスの展開性向上

Improvement of Deployment Behavior of Self-Deployable Membrane Truss

指導教授 宮崎 康行

M7029 福永 桃子
Momoko Fukunaga

Deployment structure using self-extensible booms has been expected to realize large space structure. The author previously proposed a concept of self-deployable truss consisting of bi-convex booms and the nodes in which the booms are stored to stow the truss and investigated its deployment behavior using conceptual models. The investigation suggests that one of the most critical reason of the failure in the deployment is the jamming of the boom in the truss node, and the jamming is caused by the detachment of the boom from the hub around which the boom is wrapped. Furthermore, it is concluded that both the inappropriate shape of the hub and the excess of the angular velocity of the hub induce the detachment. This paper proposes the appropriate shape of the hub, and gives the simplified model of the self-extension dynamics of a boom wrapped around the hub as well as the design condition of the rotary damper to suppress the detachment. The dynamic behavior of the detached/undetached boom and the hub is evaluated by numerical simulation and experiments.

1. 序論

1.1. 背景

近年提案される宇宙ミッションは高度かつ多様化しており、様々なアプリケーションに対応可能な大型宇宙構造物の需要が高まっている^[1, 2]. 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いわれている中で、より剛性の高い構造物として展開トラス構造と膜構造を合わせた膜面トラス構造が提案されてきた^[3]. そのための構造部材の研究も行われており、巻き尺のような凸型断面形状を有するコンベックステープに期待が高まっている^[4-7]. コンベックステープは円筒状に巻き付けて保持することが可能であり、保持を開放することで、巻き付けた際に蓄えられる歪エネルギーを運動エネルギーに変換し、自己展開／伸展をする。打上げロケットの制約により、高収納・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。そこで、これまで著者らも、コンベックステープのような自己伸展性を有するブームを用いた自己展開トラスの研究・開発を進めてきた^[8] (Fig.1(a)).

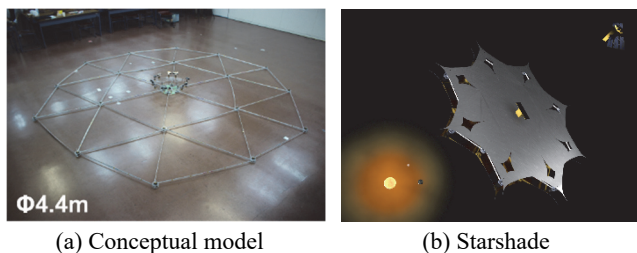


Fig.1 Self-Deployable Truss

様々な展開構造が提案されている中でも、自己展開膜面トラスは収納性・軽量性・展開後の剛性の高さ・構造様式の簡素さ・モジュール化が可能な点等の多くの利点を持ち、スターシェード^[9](Fig.1(b))や SSPS^[10]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。さらに、最大の利点である、伸展／展開にアクチュエータを必要としない構造様式は、構造が大型化した際も展開機構に割くりリソースを抑えることができ、今後一層需要が高まると考える。しかし、現状では自己展開構造の特徴でもある、展開自体が部材自身の変形に依存していることに起因する不具合モードへの対処や耐宇宙環境性に優れた自己伸展部材の設計等、宇宙で実用化するためには、解消すべき課題がいくつか残っている。

1.2. 自己展開構造の設計要点

過去に著者の研究室で設計・提案してきた自己展開構造は、回転自由な円筒状のハブにコンベックステープを巻き付け、ガイドローラーを周囲に配置することで、テープが直線状に伸展する展開様式を採用している (Fig.2). このような展開様式の場合、摩擦等の展開を妨げる作用に打ち勝つだけの十分な自己伸展力があれば展開は可能と考えがちであるが、実際にこの自己展開構造の展開試験を行うと、ブームが展開しきらずに、ノード内でスタックしてしまう場合があった。これまでの研究から、剥離現象が起因となってスタックが発生することが分かった。剥離現象は大きく分けて2つあり、設計次第で以下の1.2.1節および1.2.2に示す現象が発生する。

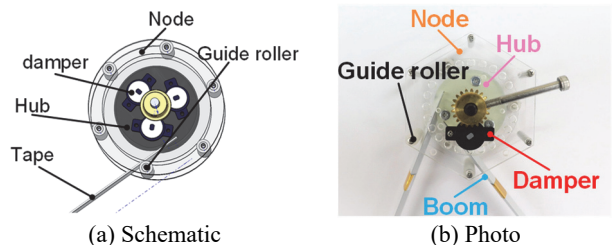


Fig.2 Inside of the Node

1.2.1. ハブの不適切な形状によるブームの剥離

まず、ハブの曲率が適切でないと、剥離が生じる。これには、ブームが巻き付くハブ外径の曲率だけでなく、ブーム取り付け部の曲率も含まれる。ブームの諸元値から求められる適切な曲率にハブが成形されていない場合、ブームがハブから浮いて剥離現象を起こす。また、ブーム取り付け部が条件を満たしていなければ、Fig.3のようにブームは浮き出し、剥離現象を起こす。実際、筆者らはFig.3のハブを有する三角形トラスの展開実験を行い、剥離現象を確認している^[11]。

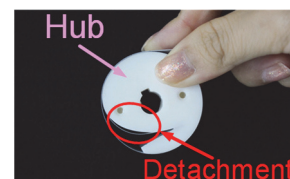


Fig.3 Detachment of boom due to improper shape of hub

1.2.2. 展開時の角速度超過によるブームの剥離

また、展開時にハブの角速度がある値を超えると、Fig.4の

ような剥離が起きる^[12]. そのため, ダンパを用いて角速度を抑えなければならない. そこで, 剥離が起きない条件式を求め, その条件式を満たす適切なダンパ値を決める必要がある.

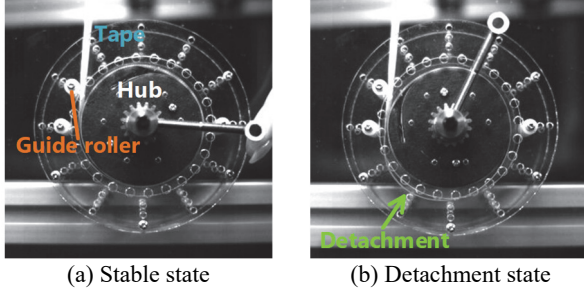


Fig.4 Detachment of boom

1.3. 研究目的

本研究では, 自己展開膜面トラスの実用化に向け, 自己展開膜面トラスの設計において重要なブームの曲げ理論や実際の部材を理論と対応付けるための等価剛性の算出法, 自己展開構造において起こりうる不具合の対処法を提案し, 設計方法を確立する^[12-15]. 特に, 本要旨では, 不具合の中でもクリティカルな問題である「ハブの不適切な形状によるブームの剥離」及び「展開時の角速度超過によるブームの剥離」についてフォーカスを当て, 対処法や設計方法を述べる.

2. 最適なハブの設計方法

一般に, テープの伸展力 P と曲げモーメント M からブーム収納時に剥離が起きない状態は式(1)で表される.

$$P \geq M\kappa \quad (1)$$

また, 最適なハブ径 $1/\kappa$ は式(2)より得られる.

$$P = M\kappa \quad (2)$$

しかし, ハブの設計においてはハブ径だけでなく, テープの取り付け部の形状も考慮すべき重要な点であり, テープを巻き付けた状態で張力をかけずにテープをハブにフィットさせるような形状を考える必要がある. この理想的なハブ形状を考えるため, まず, Fig.5 のように, ブーム固定部の長さ L_{bolt} , ブーム固定部からハブ外径の長さ Δr を与える.

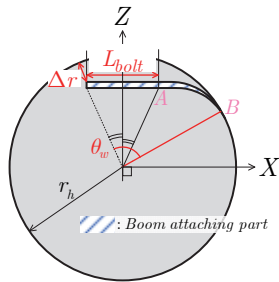


Fig.5 Mathematical model of hub

そして, 本研究では, ハブ取り付け部の形状を, ブームを固定して点Bにて半径 r_h の円筒に接するようにブームを曲げた際の形状と一致させることで, 収納時にブームがハブから剥離しないようにすることを提案する. 取り付け部のブーム変形状は FEM により求める. 今回は, ANCF 矩形シェル要素を用いた. 分割数は軸方向に 50, 幅方向に 8 とした.

Fig.5 において, L_{bolt} の部分はブーム固定部であるので, A 断面ではコンベックスの断面形状を維持している状態であり,

A 断面の各節点の境界条件は以下の通りとなる.

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial y} \cdot \mathbf{i}_x = 0, & \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial x} \cdot \mathbf{i}_y = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial x} \cdot \mathbf{i}_z = 0, \\ \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial x \partial y} \cdot \mathbf{i}_y = \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial x \partial y} \cdot \mathbf{i}_z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

そして, B 断面ではハブ外径の曲率半径と一致することと接線方向張力 T_{end} が 0 となることを境界条件として, ブーム取り付け部の長さ L_o 及びブーム取り付け部の角度 θ_w を求めた.

以上より, Table.1 に示す諸元値のコンベックステープに最適なハブ形状を求めた結果, 図 8 のようになった. また, このとき, 解析から求められたブーム取り付け部の長さ及び角度は, $L_o = 4.91 \times 10^{-2}$ m 及び $\theta_w = 239.40$ deg. となった.

Table.1 Properties of convex tape

ρ	線密度	14.34 g/m
E	ヤング率	2.06×10^{11} GPa
ν	ポアソン比	0.3
h	厚さ	1.02×10^{-4} m
b	幅	8.00×10^{-3} m
R	曲率半径	1.66×10^{-2} m

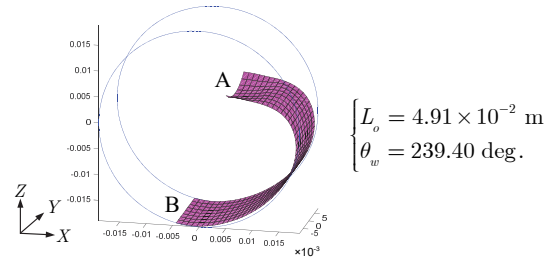


Fig.6 Optimized hub

しかし, 例えば, 一つのハブに複数のブームを配置するような場合など, ブーム取り付け部の角度 θ_w の範囲に制限がかかることがある. この場合には, Fig.6 の最適なハブ形状を用いるのではなく, 既知の値として θ_w を与え, B 断面とハブ外径が接することを条件に形状を求めることとした. Fig.7 に $\theta_w = \pi/3$ を与えた場合のハブ形状を示す.

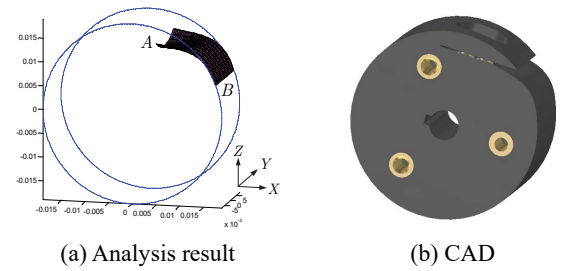


Fig.7 Quasi-optimized hub

3. ブームの伸展運動と非剥離条件

3.1. 変形状の仮定

Fig.8(a)は非剥離時のブームの伸展状態, (b)は剥離時のブームの伸展状態である. ブームは, Fig.8(b)のようにハブ上部が楕円形に剥離すると仮定すると, α を $0 \leq \alpha \leq \pi$ を満たすパラメータとして, 剥離部の任意点 P は式(4)のように書ける.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\alpha, u) = \begin{bmatrix} r \cos \alpha \\ (r + u) \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

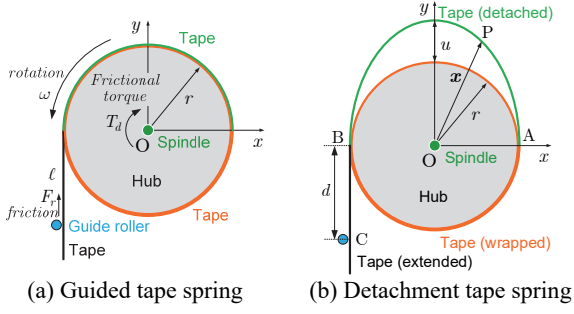


Fig.8 Mathematical model

3.2. 運動方程式および非剥離条件式の導出

剥離の始点 A から剥離部の任意の点 P までの弧長を $s(\alpha, u)$ とすると、式(5)となる。

$$s(\alpha, u) = \int_0^\alpha \sqrt{r^2 + u^2 \cos^2 \beta + 2ru \cos^2 \beta} d\beta \equiv \int_0^\alpha g(\beta, u) d\beta \quad (5)$$

$$g(\beta, u) = \sqrt{r^2 + u^2 \cos^2 \beta + 2ru \cos^2 \beta} \quad (6)$$

このとき、系全体の運動エネルギー T は次式で表される。

$$T = \frac{1}{2} [I_o + \rho(L - \ell - \pi r - r\theta)r^2] \dot{\theta}^2 + \int_0^\pi \frac{1}{2} \rho |\dot{\mathbf{x}}|^2 ds + \frac{1}{2} \rho (\ell + \pi r + r\theta - s_e) |\dot{\mathbf{x}}_e|^2 \quad (7)$$

ただし、

$$s(\pi, u) = \int_0^\pi g(\beta, u) d\beta, \quad \mathbf{x}_e = \mathbf{x}(\pi, u) \quad (8)$$

式(4)を用いて式(7)を書き換えると、式(9)ようになる。

$$T = \frac{1}{2} (I_o + \rho L r^2) \dot{\theta}^2 - \rho r \dot{\theta} \dot{u} \left[(\ell + \pi r + r\theta - s_e) k(\pi, u) + \int_0^\pi k(\alpha, u) g(\alpha, u) d\alpha \right] + \frac{1}{2} \rho \dot{u}^2 \left[(\ell + \pi r + r\theta - s_e) k(\pi, u)^2 + \int_0^\pi k(\alpha, u)^2 g(\alpha, u) d\alpha - 2(r + u) \int_0^\pi k(\alpha, u) \sin \alpha \cos \alpha d\alpha + \int_0^\pi \sin^2 \alpha g(\alpha, u) d\alpha \right] \quad (9)$$

$$k(\alpha, u) \equiv \frac{\partial s}{\partial u} = \int_0^\alpha \frac{\partial g(\beta, u)}{\partial u} d\beta = (r + u) \int_0^\alpha \frac{\cos^2 \beta}{g(\beta, u)} d\beta \quad (10)$$

また、曲率 κ で曲げられたブームに蓄えられる単位長さあたりの歪エネルギーを $p(\kappa)$ とすると、 $p(\kappa)$ は次式となる^[16]。

$$p(\kappa) = b \tilde{D}_x (1 - \nu_x \nu_y) \kappa^2 + b \tilde{D}_y (\kappa_o + \nu_x \kappa)^2 (1 - A_1) \quad (11)$$

ただし、

$$\begin{cases} \tilde{D}_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \left(1 - \frac{h^2 \kappa_o^2}{12} \right), & \tilde{D}_y = \frac{E_y}{E_x} \tilde{D}_x \\ \eta = \sqrt[4]{\frac{E_x b^4 h \kappa^2}{4 \tilde{D}_y}}, & A_1 = \frac{\cosh 2\eta - \cos 2\eta}{\eta (\sinh 2\eta + \sin 2\eta)} \end{cases} \quad (12)$$

である。ここで、剥離部の曲率は次式で求められる。

$$\kappa = |\mathbf{x}' \times \mathbf{x}''| / |\mathbf{x}'|^3 \quad (13)$$

従って、ブーム全体の歪エネルギー V は、

$$V = P(L - \ell - \pi r - r\theta) + \int_0^\pi p(\kappa) g(\alpha, u) d\alpha \quad (14)$$

さらに、ロータリーダンパによる摩擦トルクとガイドロー

ラーでの摩擦力による仮想仕事の和は次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \delta W &= -F_r(r\delta\theta - \delta s_e) - T_d\delta\theta \\ &= -(rF_r + T_d)\delta\theta + k(\pi, u)F_r\delta u \end{aligned} \quad (15)$$

以上より、ハブと軸との摩擦トルクを T_d 、ガイドローラーとブームとの間の摩擦を F_r とすれば、式(9)、(14)および(15)から運動方程式が導かれる^[13]。そして、これを非剥離運動周りに線形化することで、式(16)の非剥離条件式が導出される。

$$P - F_r - M\kappa_h \geq \rho r^2 \ddot{\theta} \left(\tilde{\theta} + \frac{\ell}{r} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (16)$$

ただし、 $\kappa_h = 1/r$ はハブの曲率である。また、 $\tilde{\theta}$ は剥離を起こさずにブームが伸展しているときのハブの回転角であり、次式から求められる。

$$\ddot{\theta} = [r(P - F_r) - T_d] / (I_o + \rho L r^2) \quad (17)$$

式(16)、(17)より、ブームとハブの諸元値から剥離を起こさないための必要条件を以下のように求めることができる。

$$P \geq \frac{1 + c_1}{1 - c_2} M\kappa_h, \quad c_1 = \frac{\rho L r^2}{I_o}, \quad c_2 = \frac{\pi \rho r^3}{2 I_o} \quad (18)$$

4. 適切なハブを用いたブームの伸展実験

3.2 節で導出した非剥離条件式の妥当性を評価するため、2章で設計した適切なハブを用いて、ブームの伸展実験を行い、ブームの伸展挙動と展開時のハブ角速度の評価を行った。実験で用いたハブは Fig.9(a)、実験装置は Fig.9(b)である。装置に付けられたサーボモーターが動くことで、ハブが回転を始め、ブームの伸展運動が始まる。ハブにはハブと共に回転するマーカーが付いたピンが取り付けられており、8000fps に設定されたハイスピードカメラで剥離挙動とマーカーを撮影した。実験に用いたハブとブームの諸元を Table.2 に示す。

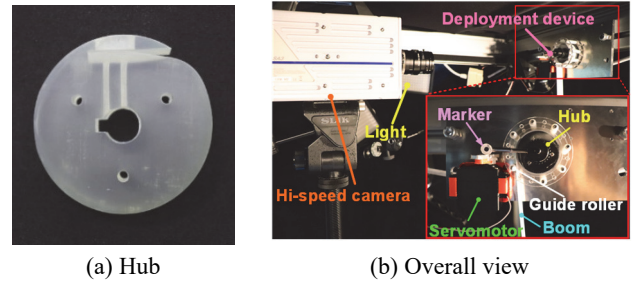


Fig.9 Experimental device

Table.2 Properties of boom and hub

ρ	14.34 g/m	L	1.0 m
r	20.00×10^{-3} m	ℓ	100×10^{-2} m
d	10.00×10^{-3} m	I_o	9.904×10^{-6} kg $\times$ m

本実験は重力下で行っており、3章の理論は重力が考慮されていないため、実験環境に合わせて重力を考慮した理論と実験結果を比較した。4.1、4.2 節にそれぞれの結果を示す。

4.1. 剥離変位の挙動

ブーム伸展開始後、剥離が起こり始めた瞬間から理論で仮定している剥離形状から崩れるまでの剥離位置を撮影した画像から取得した。Fig.10 に計測した剥離変位と理論値を示す。

この結果より、前節までに示した理論は実験を定性的には模擬できていることが分かる。ただし、剥離開始時の結果の

一致性は著しく悪いが、これは座標を読み取る際の人為的誤差が大きく表れたと考えている。

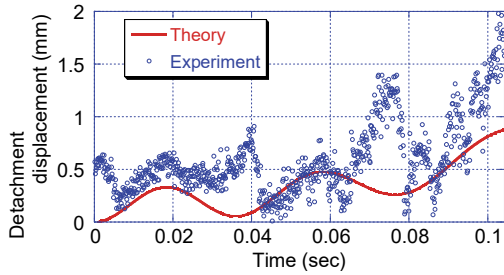


Fig.10 Detachment displacement

4.2. 伸展時のハブ角速度の挙動

4.1 節の実験で仮定した摩擦係数を用いて計算した伸展時のハブ角速度と 3 回の伸展実験から得られたハブ角速度の比較を Fig.11 に示す。ただし、Fig.11 は伸展開始時から伸展終了時までの結果であり、図内の矢印はブームが剥離し、サポートローラー等と接触し始めた時刻である。

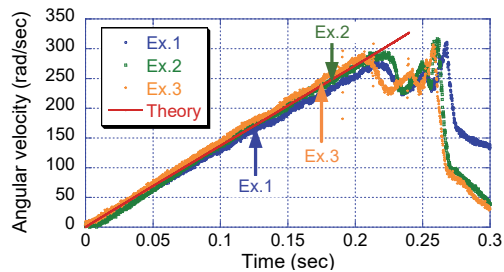


Fig.11 Behavior of the angular velocity

Fig.11 より、矢印以降のすべての実験結果が理論と非常によく一致していることが分かる。後半部はブームが剥離した後の挙動であり、理論の条件とは一致しないため、3 章で示した理論は妥当であり、自己伸展運動を理論的に解釈することができたと考える。

5. ダンパ値の設計

理論の妥当性が評価されたため、理論から剥離を起こさないために必要な摩擦トルクの計算を式(19)より行い、計算結果の範囲に収まるダンパを取り付けた 3N3B (3Nodes 3Booms) モデルの展開実験を行った。

$$\frac{1 + \frac{I_o}{\rho L r^2} + \frac{\mu_o r}{d} \left(\frac{I_o}{\rho L r^2} - \frac{\pi r}{2L} \right)}{1 + \frac{\pi r}{2L}} M - \frac{\frac{I_o}{\rho L r^2} - \frac{\pi r}{2L}}{1 + \frac{\pi r}{2L}} r P \leq T_{do} < r P - \frac{\mu_o r}{d} M \quad (19)$$

3N3B モデルに用いた部材およびハブの諸元値は Table.1, Table.2 である。これより、必要な摩擦トルクは式(20)であり、本実験では 22.0×10^{-3} Nm のダンパを取り付けた。

$$21.7 \times 10^{-3} \leq T_{do} \leq 23.3 \times 10^{-3} \quad (20)$$

提案する設計手法に基づき製作した 3N3B モデルとダンパを取り付けていないモデルの収納時から展開後までの挙動を Fig.12 に示す。Fig.12 より、ダンパを取り付けたモデルでは剥離が起きず、ダンパを取り付けていないモデルでは想定通り展開途中で剥離が起きた。従って、提案するダンパ値の設計方法は妥当であることが確認できた。

6. 結論

自己展開構造において起こりうる不具合を提示した。その中でもハブの不適切な形状によるブームの剥離、展開時の角速度超過によるブームの剥離について対処法を提案し、妥当性の評価を行った。これらの問題を適切に対処して設計法として確立することで、展開はほとんど保証され则认为る。

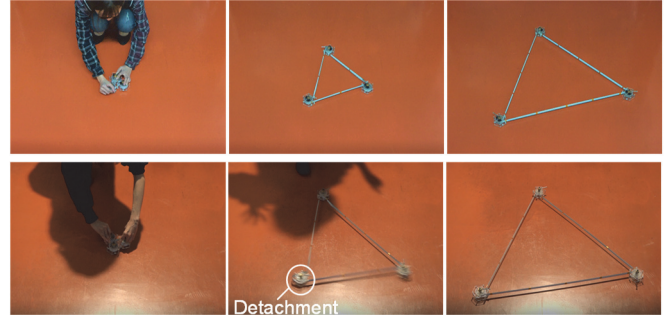


Fig.12 Deployment behavior of 3N3B truss
(top: with damper, down: without damper)

謝辞

本研究は、文科省・科研費 18H03817 の補助を受けました。

参考文献

- [1] Wendal, C.B., et.al., "In-Space Structural Assembly: Applications and Technology," IEEE Aerospace Conference, Mar. 2017.
- [2] B.Janett, and C., Gregg, "Design of Multifunctional Hierarchical Space Structures," IEEE Aerospace Conference, Mar. 2017.
- [3] Miyazaki, Y., et.al., "Membrane Structure Supported by Self-Deployable Truss for Space Applications," AIAA SciTech Forum, AIAA 2018-0451, pp.1-13, 2018.
- [4] J.Block, M. Straubel, and M.Wiedemann, "Ultralight Deployable Booms for Solar Sail and Other Large Gossamer Structures in Space," Acta Astronautica, Vo. 68, pp.984-992, 2011.
- [5] T.W. Muphey, et.al., "TRAC™ Boom Structural Mechanics," AIAA SciTech Forum, AIAA-2017-0171, Jan. 2017.
- [6] Umali, J., et.al., "Vibration Response Ultralight Coilable Spacecraft Structures," AIAA SciTech Forum, AIAA-2017-1115, Jan. 2017.
- [7] Furuya, H., et.al., "Micro-gravity Testing of Boom-Membrane Integrated Deployable Structures for Micro-satellites," AIAA SciTech Forum, AIAA-2017-1115, Jan. 2017.
- [8] Inoue, S., et.al., "Dynamic Characteristics of Self-Deployable Structure Consisting of Tape Springs," 30th Int. Symp. Space Technology and Science, 2015-c-21, Jul. 2015.
- [9] The Probe Scale Science and Technology Definition Teams of NASA's Astrophysics Division, "Exo-S: Starshade Probe-Class Exoplanet Direct Imaging Mission Concept, Final Report," 2015.
- [10] 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.
- [11] Tamura, A., et.al., "Deployment Dynamics of Self-deployable Truss Structure Consisting of Bi-convex Booms," AIAA SciTech Forum, AIAA-2017-0175, Jan. 2017.
- [12] 福永桃子, 宮崎康行, 「自己展開トラスの展開性向上」, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2017-4701, pp.1-8, 2017.
- [13] Fukunaga, M., et.al., "Design Method of Self-deployable Truss to Jamming of Stored Booms," AIAA SciTech Forum, AIAA-2019-1525, Jan. 2019.
- [14] Fukunaga, M., and Miyazaki, Y., "Structural Characteristics of Self-Extensible Boom," AIAA SciTech Forum, AIAA-2018-0451, Jan. 2018.
- [15] Fukunaga, M., and Miyazaki, Y., "Structural Characteristics of BCON Truss," 31st Int. Symp. Space Technology and Science, 2017-c23, June 2017.
- [16] Miyazaki, Y., et.al., "Analytical solution of the bending of bi-convex boom," Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6, 2015, pp.3-9.