

モジュール型自己展開膜面トラスを用いたオカルタの概念設計

Concept Design of Occulter Using Modular Self-Deployable Membrane Truss

指導教授 宮崎 康行

M8011 設楽 翔一
Shoichi Shitara

As one of the methods to directly observe exoplanets, starshade system has been proposed that enables the direct observation by blocking the stellar light using a large membrane shield called occulter set between the star and the space telescope. The author has been studying on a Self-Deployable Membrane Truss (SDMT) consisted of a membrane and self-extensible booms that have high spring back effect and can be rolled-up into small volume, and expect that the starshade mission can be more reliably achieved at lower costs by using SDMT as the occulter. However, the occulter of several tens of meters requires a large area and many workers when manufacture and assembly. These problems can be solved by dividing the whole structure into some modules. In this paper, a method to construct occulter using modular SDMT is proposed, i.e. the truss layout that could divide the whole structure into some modules is shown with the stored and deployed configuration of SDMT. In addition, the membrane in a module is designed to avoid the leak of the stellar light when all modules are coupled to configure the occulter, and the folding and storage method of the membrane is shown. Also, it found that the occulter can be in self-equilibrium state by adjusting the membrane shape, length and attachment of the boom.

1. 序論

1.1. スターシェードシステムにおけるオカルタ

太陽系外惑星は1995年に初めて発見されて以来、これまでに数多く発見されてきた^[1]。太陽系外惑星の居住可能性を調べるためには惑星を直接撮像し、表層の情報を得る必要がある^[2]。しかし、恒星は惑星に比べて非常に明るいため、恒星の光によって観測が阻害されてしまう。そこで、Fig.1(a)に示すようなオカルタと呼ばれる直径数十m級の大型遮蔽物を恒星と宇宙望遠鏡の間に配置し、恒星の光を遮ることで、惑星の直接撮像を可能にするスターシェードシステムが提案されている^[3]。現在提案されているスターシェードミッションでは、オカルタによる恒星の回折光を効果的に抑えるために、オカルタをFig.1(b)のような花弁型形状としている^[4]。オカルタは数十m級と大型であるため、花弁型形状は薄膜で実現し、それを展開構造物に取り付けることで展開することが考えられる。しかし、花弁型形状は外形に曲線を有するため、提案されているオカルタの展開構造^{[5]-[8]}は非常に複雑な構造様式かつ高コストなものとなっている。

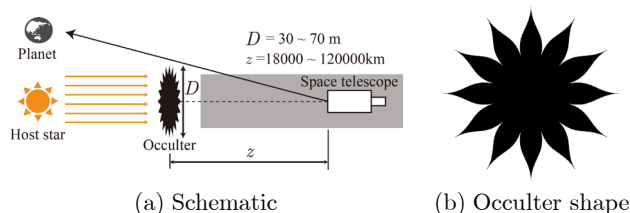


Fig.1 Starshade system

1.2. 自己展開膜面トラス(SDMT)

筆者らは自己伸展性を有するブームを用いた自己展開膜面トラス(SDMT)に関する研究・開発を行っている^{[9][10]}。SDMTは円筒状のハブにテープスプリングを巻き付けてノード内に収納し、保持を解放するとガイドローラーに支持されながら、直線状に伸展する展開構造である(Fig.2)。

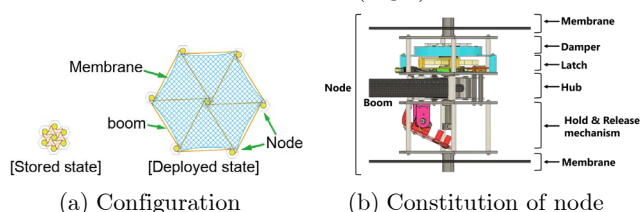


Fig.2 SDMT

SDMTの最大の特徴はアクチュエータを用いらずに自らの伸展力のみによって展開する展開様式の簡素さである。これにより、構造の軽量化が期待できる。また、ブームをハブに巻き付けることから収納効率も非常に高く、ロケットの制約により求められる高収納性にも優れている。ブームの展開後にラッチ機構を用いることや、トラス状に構成することで必要な剛性を確保することも可能であるため、筆者らは様々な大型宇宙構造物への適用を検討している。スターシェードもその一つであり、オカルタにSDMTを用いることができれば、現在提案されている手法と比べて構造の技術的課題は格段に減少すると考えられる。そこで、筆者らは、SDMTの設計理論の構築と実験による検証を通じて、展開信頼性の高い設計法を提案してきている^[11]。

1.3. SDMTに適したオカルタ形状

従来のオカルタ形状をSDMTで実現する際、花弁の曲線形状が問題となる。トラスを構成する部材は直線状に伸展するため、曲線形状を実現することが困難である。従って、外形はできるだけ直線状であることが望ましい。そこで筆者らはFig.3に示すようなSDMTに適した形状、すなわち、外形が折れ線状で、非透過な膜と透過性の高い膜を組み合わせた新しいオカルタ形状を提案した^[12]。提案したオカルタ形状は数値計算により従来の花弁型形状と同等の遮蔽性能を有することを確認した。

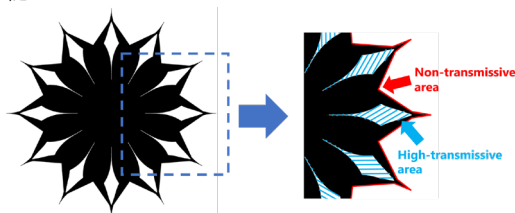
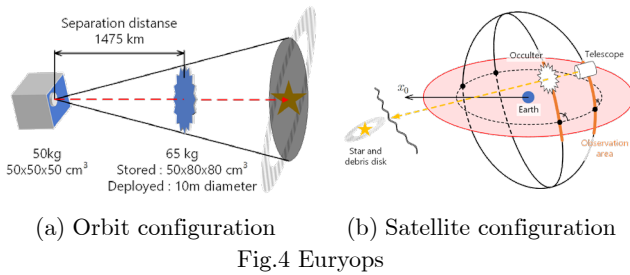


Fig.3 Polygonal shape of occulter

1.4. スターシェード技術実証ミッション「Euryops」

以上の背景から、筆者らは次の段階として、軌道上におけるSDMTを用いたスターシェードの基礎技術実証を検討している。この技術実証ミッションをEuryops(Exozodiacal disc survey using occulter composed of SDMT)と呼ぶ^[13]。EuryopsではFig.4(a)に示すように、SDMTで構成される直径10mのオカルタ衛星と50cm立方の望遠鏡衛星を用いて、デブリ円盤の観測を行う。各衛星は異なる地球周回軌道に投入され、望遠鏡とオカルタとの相対距離が適切となった際にデブリ円

盤の直接観測を行う (Fig.4(b)). Euryops により惑星科学の発展並びに将来のスターシェードによる太陽系外惑星の直接観測への貢献が期待できる。



1.5. モジュール構造の利点

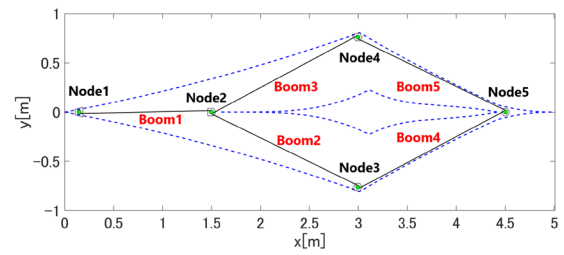
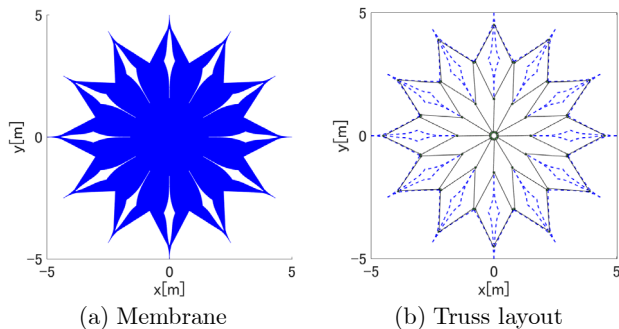
オカルタのような大型の構造物の場合、一度に構造全体を製作することは容易ではない。構造全体を組み立てるための大きな空間と多くの人員を要する。これらの課題に対して、筆者は構造全体をいくつかのモジュールに分割し、各モジュールを結合して構造全体を構築することで解決可能だと考える。モジュール化することができれば、構造全体に比べて 1 つのモジュールは小型となるため、製造や組立に大きな空間を必要とせず、多くの人員も必要としない。また、モジュールごとに独立して製作し、収納することができるため、各作業は飛躍的に容易になると想定される。将来的には直径数十 m 級のオカルタを製作するため、SDMT のモジュール化は必須であり、モジュール型 SDMT を用いたオカルタの構築方法が必要である。

1.6. 研究目的

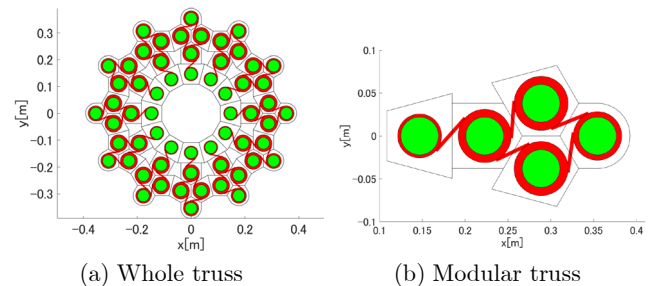
本研究は、スターシェード技術実証ミッション「Euryops」に用いるオカルタをモジュール型 SDMT によって構築する方法を明らかにすることを目的とする。本稿では、モジュール化のためのトラス配置やモジュール化した膜面を適切に展開するための手法や収納方法、オカルタを自己平衡状態とするための理論について述べる。

2. モジュール化のためのトラス配置

Euryops に用いるオカルタの形状を Fig.5(a)に示す。ただし、青く塗り潰された領域が非透過膜を表している。ノードやブームが非透過領域から出てしまうと、オカルタの遮蔽性能は著しく低下してしまうため、トラス配置は全てのノード・ブームが非透過領域内に収まるように決定される。Fig.5(b)のようにトラスを配置することでこれらの要求は満たされる。ただし、青の破線、黒の実線はそれぞれ、非透過膜の外形状状、ブームを表している。このトラス配置により、構造全体を Fig.6 に示す 5 つのノードと 5 本のブームで構成される 12 個のモジュールに分割することができる。つまり、12 個のモジュールを独立に製造・組立・収納し、それらを結合することでオカルタ全体を構築することが可能となる。

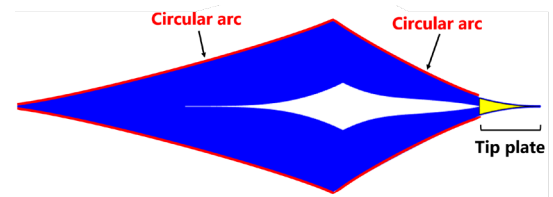


12 個のモジュールを結合したトラスは Fig.7(a)に示すように、0.8m x 0.8m 以内に収納することができる。また、1 モジュールを収納すると、Fig.7(b)から 0.3m x 0.2m 以内に収納されている。ただし、緑円、赤線、黒線はそれぞれハブ、ブーム、ノード形状を表している。



3. モジュール化した膜面

構造全体をモジュールに分割すると、Fig.8 に示すように膜面も 12 個に分割される。オカルタには高い形状精度が求められるため、膜面の外形や透過領域の形状は設計通りとなっていることが重要である。膜面はノードに取り付けられ、膜の形状はノードの引張によって管理される。よって外形が直線の場合、膜面に引張を加えると、外形に沿ってしわが生じてしまう。そこで、Fig.8 のように外形を円弧にすることで、膜面に一様な引張を与えることができる。ただし、膜面のエッジはテープやケーブル等で補強する。また、折れ線形状の形状設計において、膜面の先端部分は Fig.1(b)に示した花卉型形状と等しい形状となるため、薄いプレートで製造し、膜面と接着させることで実現する。



膜に一様な引張を与えるために外形を円弧とすると、Fig.9 に示すようにモジュールを結合した際に、互いの膜の間に隙間が生じる。この隙間から光が漏れ、オカルタの遮蔽性能が大きく劣化してしまう。そこで、Fig.9 のように外形に圧縮に耐えることができる薄いプレートを取り付ける。モジュールを結合した際にこれらのプレートが重なり合うことで、光が漏れ出すことを防ぐ。収納の際に膜面は折りたたむため、膜面に取り付けられたプレートは折り曲げることができるように、プレート間をテープで結合する。これにより、膜面をプレートと共に収納することが可能となる。

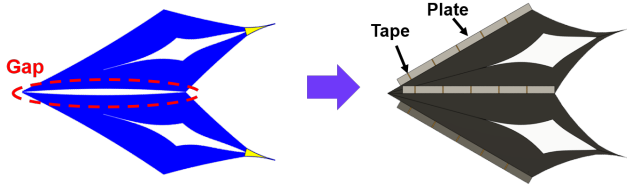


Fig.9 Membrane with edge plates

膜面は、ノードの上面と下面の両面に取り付ける。これは、軌道上で微細なダスト等の衝突により膜面に穴があいて光が漏れた場合の冗長性の確保と、両面に張ることで、膜による張力が構造全体に曲げ変形を起こさないようにするためである (Fig.10)。

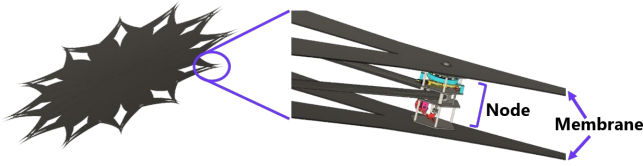


Fig.10 Membrane attachment

膜面全体を 12 モジュールに分割したが、それでもなお、1 モジュールの大きさは 5m に及ぶ。よって分割した膜面もトラスと同様に小さく収納する必要がある。そこで、Fig.11 に示す折り線に沿って、モジュール膜を折りたたんでいく。Fig.12 に収納の流れを示す。まず、折り線に沿って十字架上に折りたたむ。次に折りたたまれた十字架状の膜を膜に取り付けられたプレートに幅に合わせて、蛇腹に折りたたんでいく。このように折りたたむことで、膜面の外形に取り付けられたプレートと共に、小さく収納することができる。

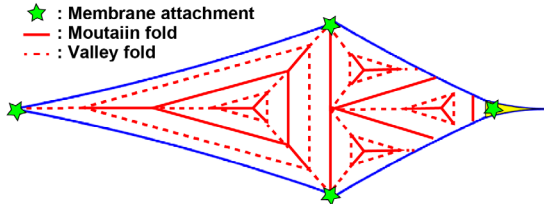


Fig.11 Folding pattern for modular membrane



Fig.12 Storage flow of modular membrane

4. 自己平衡状態

本節ではモジュールに分割した SDMT の自己平衡状態について考察する。モジュールには Fig.13 に示すように膜の張力、膜のエッジの張力、ブームの軸力の 3 種類の力が働いている。これらの力を用いて、各ノードの力とモーメントが釣り合っていればよい。そこで、ノード 5、ノード 3-4、ノード 1-2 の順に力とモーメントを釣り合わせていく。ただし、オカルタに用いる SDMT にはラッチ機構を搭載しており、展開後にラッチを作動させるため、ハブとノードは一体となり、それらの相対回転は拘束されているものとする。

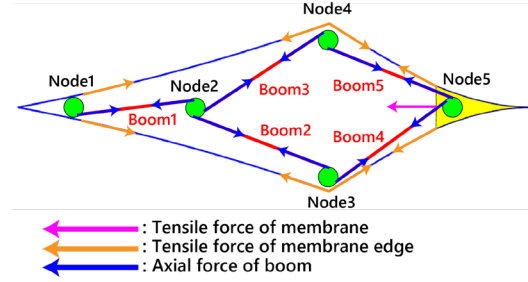
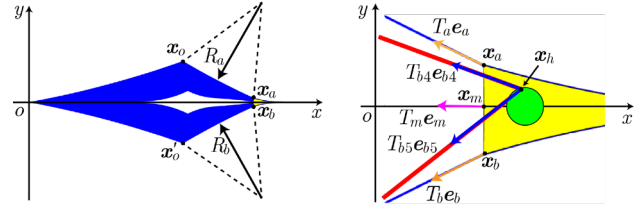


Fig.13 Forces in a module

まず、ノード 5 に着目する。Fig.14(a)に示すように膜外形の円弧の曲率半径を R_a, R_b とする。Fig.14(b)に示す通り、ノード 5 には膜の張力 T_m 、エッジの張力 T_a, T_b 、ブームの軸力 T_{b4}, T_{b5} の 3 種類の力が働いている。ただし、 x_a, e_a はそれぞれ位置ベクトルと力の方向ベクトルを表す。



(a) Circular arc

(b) Forces applied to node5

Fig.14 Equilibrium at Node5

膜応力を σ 、膜厚を t とすると、 T_a, T_b, T_m は次式のように表される。

$$T_a = \sigma t R_a, T_b = \sigma t R_b, T_m = \sigma t |x_a - x_b| \quad (1)$$

ノード 5 において、ブーム 4 とブーム 5 の交点 x_h 回りのモーメントを考える。ただし、膜面はノードの上下両面に取り付けられているため、膜の張力は 2 倍となる。ノード 5 における x_h 回りのモーメントの釣り合い式は次式となる。

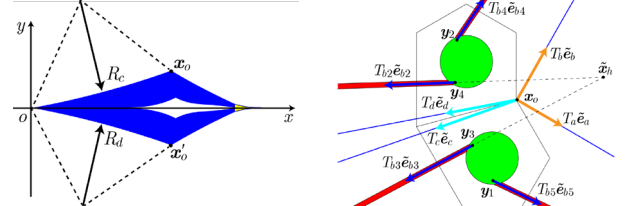
$$(x_a - x_h) \times 2T_a e_a + (x_b - x_h) \times 2T_b e_b + (x_m - x_h) \times 2T_m e_m = 0 \quad (2)$$

曲率半径 R_a を与え、(1)式を用いて(2)式を解くことで、 R_b を求めることができる。次にノード 5 における力の釣り合い式は次式で表される。

$$2(T_a e_a + T_b e_b + T_m e_m + T_{b4} e_{b4} + T_{b5} e_{b5}) = 0 \quad (3)$$

T_a, T_b, T_m が分かっているため、(3)式から T_{b4}, T_{b5} を求めることができる。このように、 σ, t が既知であるとき、 R_a を与えて、(2)-(3)式を解くことで、ノード 5 において力とモーメントが釣り合う際の R_b, T_{b4}, T_{b5} を求めることができる。

次にノード 3-4 に着目する。Fig.15(a)に示すように膜外形の円弧の曲率半径を R_c, R_d とする。Fig.15 (b)に示す通り、ノード 3-4 にはエッジの張力 T_c, T_d 、ブームの軸力 $T_{b2} - T_{b5}$ の 2 種類の力が働いている。ただし、 $y_a, \tilde{e}_a$ はそれぞれブーム取り付け位置の位置ベクトルと力の方向ベクトルを表す。



(a) Circular arc

(b) Forces applied to node3-4

Fig.15 Equilibrium at Node3 and 4

T_c, T_d は次式のように表される.

$$T_c = \sigma t R_c, T_d = \sigma t R_d \quad (4)$$

ノード3と4は隣り合うノードと結合されているため、結合された2つのノードは一体とみなすことができる. よって結合されたノードにおいて、力とモーメントが釣り合っていればよい. まず、ノード5と同様にモーメントの釣り合いを考える. ブーム2とブーム3の交点 $\mathbf{x}_h$ 周りのモーメントの釣り合い式は次式となる.

$$\begin{aligned} & 2(T_a \mathbf{e}_a + T_b \mathbf{e}_b + T_c \mathbf{e}_c + T_d \mathbf{e}_d) \times (\mathbf{x}_o - \mathbf{x}_h) \\ & + (T_{b2} \mathbf{e}_{b2}) \times (\mathbf{y}_2 - \mathbf{x}_h) + (T_{b5} \mathbf{e}_{b5}) \times (\mathbf{y}_1 - \mathbf{x}_h) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

曲率半径 R_c を与え、(4)式を用いて(5)式を解くことで、 R_d が求められる. 次にノード3,4において、力の釣り合い式は次式で表される.

$$\begin{aligned} & 2(T_a \mathbf{e}_a + T_b \mathbf{e}_b + T_c \mathbf{e}_c + T_d \mathbf{e}_d) \\ & + T_{b2} \mathbf{e}_{b2} + T_{b3} \mathbf{e}_{b3} + T_{b4} \mathbf{e}_{b4} + T_{b5} \mathbf{e}_{b5} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (6)$$

$T_a, T_b, T_c, T_d, T_{b5}$ が分かっているため、(6)式から T_{b2}, T_{b3} を求めることができる. ノード5と同様に R_c を与えて、(5)-(6)式を解くことで、ノード3-4において力とモーメントが釣り合う際の R_d, T_{b2}, T_{b3} を求めることができる.

最後にノード1-2に着目する. ノード2は膜面に取り付けられていないため、Fig.16(a)に示す通り、ブームの軸力のみが働く. よって、ノード2はブームの軸力のみで力とモーメントを釣り合わせる必要がある. しかし、ブームの軸力のみで力を釣り合わせると、モーメントの釣り合いをとることはできない. そこで、曲げモーメントを利用する. Fig.16(b)に示すように、ハブ2におけるブーム1の取り付け位置を $\mathbf{y}_5$ から $\Delta\theta$ だけ変化した $\mathbf{y}'_5$ とする. これにより、ブームには曲げモーメント M が加わり、ハブにはその反モーメントが加わる.

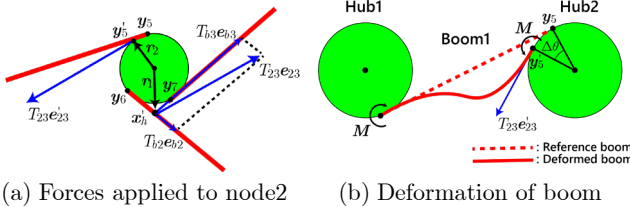


Fig.16 Equilibrium at Node1 and 2

ゆえに、ノード2におけるモーメントの釣り合い式は次式で表される.

$$\mathbf{r}_1 \times T_{23} \mathbf{e}_{23} + \mathbf{r}_2 \times T_{23}' \mathbf{e}_{23} - M = 0 \quad (7)$$

ノード1には膜が取り付けられているため、エッジの張力とブームの軸力が加わる. ノード1は隣り合うノードと結合されており、その配置は原点に対して対称となっている. ゆえに、結合されたノード1に加わる力は互いに打ち消しあい、合力は0となる. よって、ノード1において力の釣り合いはとれており、モーメントのみ釣り合わせることができればよい. 以上からノード1におけるモーメントの釣り合い式、ノード2における x, y 方向の力の釣り合い式とモーメントの釣り合い式の計4式が存在する. これに対して変数を変形後のブーム長さ ℓ' 、ブームの取り付け位置の変化量 $\Delta\theta$ 、円弧の曲率半径 R_a, R_c の4つとする. 以上の4式を解くことで求めた4つの変数を用いて、再びノード5の釣り合い式に戻り、同様の流れで計算を行う. 系全体が釣り合いをとれるまで収束計算を行うことで、オカルタ全体が自己平衡状態となるようなパラメータを求めることができる. これらのパラメータを用いてオカルタを設計することで、オカルタは自己平衡状態となりうる. つまり、膜外形の円弧の曲率半径やブーム1の長さ、取り付け

位置を調整することで、自己平衡となるようなオカルタを設計することが可能となる.

5. 結論

本稿ではスターシェードの技術実証ミッション「Euryops」を想定し、直径10mのオカルタを、モジュール型SDMTを用いて構築する方法を示した. 筆者は構造全体をモジュールに分割できるようなトラス配置、モジュール化した膜面を適切に展張するための手法や収納方法を提案した. また、膜の外形やブームの長さ、取り付け位置を調整することで、オカルタが自己平衡状態となることが分かった. 今後は微小重力下でオカルタの小型スケールモデルの展開実験並びに形状計測を行い、本稿で提案した設計法の妥当性を評価する.

謝辞

本研究は、文科省・科研費 17H01349 及び 18H03817 の補助を受けました.

参考文献

- [1] S. Seager: The Search for Extrasolar Earth-like Planets. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 208, 2003, pp.113-124.
- [2] C.M.A. Deccia, et.al: Surfing the L2 Gradient with The Starshade in Search of Extraterrestrial Life. Proc. AIAA SPACE Forum, AIAA-2016-5666, 2016, pp.1-9.
- [3] W. Cash: Detection of Earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter. Nature, Vol. 442, 2006, pp.51-53.
- [4] R. J. Vanderbei, et.al.: Optimal Occulter Design for Finding Extrasolar Planets. The Astrophysical Journal, Vol. 665, No.1, 2007, pp.794-798.
- [5] 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.
- [6] NASA/JPL: HabEx Final Report. 2019.
- [7] W. Cash, et.al.: The New Worlds Observer: The Astrophysics Strategic Mission Concept Study. Proc. the SPIE, Vol. 7436, 2009, pp. 743606-743606-14.
- [8] J. Kolmas, et.al.: System design of a miniaturized distributed occulter/telescope for direct imaging of star vicinity. IEEE Aerospace Conference, 2016, pp.1-11.
- [9] Y. Miyazaki, et.al.: Space Verification of Advanced Deployable Structure by Using Nano-Satellite. 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2015, pp.1-4.
- [10] Y. Miyazaki, et.al.: Membrane Structure Supported by Self-Deployable Truss for Space Applications. AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-0451, 2018, pp.1-13.
- [11] M. Fukunaga, et. al.: Design Method of Self-deployable Truss to Prevent Jamming of Stored Booms. AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA 2019-1525, 2019.
- [12] M. Fukunaga, et. al.: Application of Self-Deployable Truss to Starshade, 69th International Astronautical Congress, IAC-18-C2.2.2, 2018.
- [13] 中村壮児ほか: スターシェード技術実証衛星「Euryops」のミッション検討, 第20回宇宙科学シンポジウム, P1.70, 2020.