

自己展開構造で構成されるオカルタに用いる膜とその収納方法の検討

Study on Membrane and Its Storage Method for Occulter Composed of Self-Deployable Structure

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

川下 彩夏

Ayaka Kawashita

Starshade system has been proposed that enables the direct observation of exoplanets by locating a large membrane shield called occulter between the star and the space telescope to block the stellar light. The author has been studying on a Self-Deployable Membrane Truss (SDMT) consisted of a membrane and self-extensible booms and considering the application of SDMT to the occulter. This paper shows the materials that can be used for the membrane of the occulter and selects the best one among them. The diameter of the occulter is supposed to be about 50m, so it needs to be stored as small as possible. Therefore, the author proposes a folding and storing method of the occulter using SDMT.

1. 序論

1.1. 研究背景

太陽系外惑星は1995年に初めて発見されて以降、数多く発見されている^[1]。それらの多くは、主に間接観測法によって発見されているが、惑星の表層に関する詳細な情報を得ることはできない。惑星の大気組成等を知り、特徴付けを行うためには惑星の直接観測が必要となる^[2]。

太陽系外惑星の直接観測では、恒星が惑星と比較して非常に明るいため、恒星の光によって惑星の観測が阻害されるという問題点がある。この問題を解決するのが、Fig. 1 に示すスターシェードシステムである。これは、occulter と呼ばれる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、惑星からの微弱な光を直接観測するシステムである^[3]。

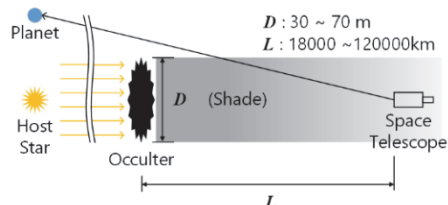


Fig. 1 Starshade system

また、筆者らは、自己展開膜面トラスの研究・開発を行っている^[4]。自己展開膜面トラスとは Fig. 2 に示す通り、自己伸展性を有するブームを用いた展開トラス構造に膜面を取り付けたものである。

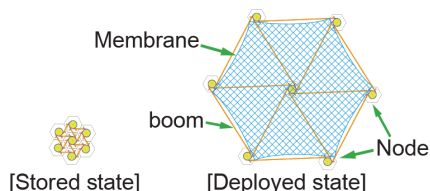


Fig. 2 Configuration of Self-Deployable Membrane Truss

自己展開膜面トラスが有する利点としては、①展開時にアクチュエータ等の動力を必要としない点や、②薄肉部材のコンベックスブームを用いることで高い軽量性が見込める点、③それ

に伴ってコストが抑えられる点が挙げられる。筆者らは自己展開膜面トラスを用いることで、現在提案されている occulter よりも、低コストかつ軽量であり、信頼性の高い展開が可能な構造が構築可能であると考えている。

そこで、筆者らは occulter に自己展開膜面トラスを適用するために、自己展開膜面トラスに適した occulter の形状を提案した^[5]。提案した形状は外形が折れ線状で、透過膜と非透過膜から構成された、Fig. 3 のようなものである。

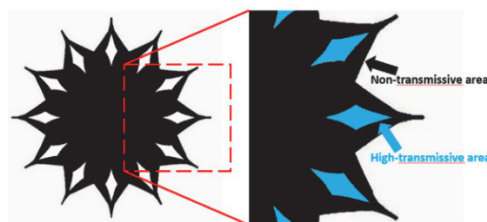


Fig. 3 Configuration of proposed occulter

筆者らは直径数十 m 級にも及ぶ大型な構造である occulter をいくつかのモジュールに分割することを考えている。構造全体をモジュールに分割することで、製造・組立・収納において、各作業が飛躍的に容易になると予想される。そこで occulter をモジュール化して構築する方法を提案した^[6]。Occulter をモジュール化した際の1モジュールの膜面を Fig. 4 の左図、モジュールを構成するトラスを右図に示す。ただし、Fig. 4 の左図において、青く塗りつぶされた領域、白く塗りつぶされた領域、黄色く塗りつぶされた領域はそれぞれ、非透過膜、透過膜、先端プレートを表している。また、Fig. 4 の右図において、青の実線と黒の実線はそれぞれ非透過膜の外形、ブームを表す。また、収納された1モジュールのトラスは Fig. 5 に示す通りである。

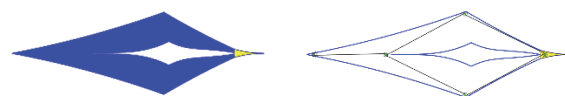


Fig. 4 Modular membrane(left) and modular truss(right)

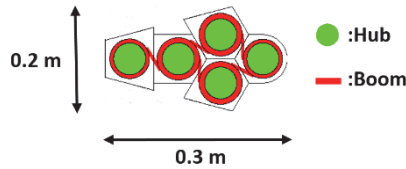


Fig. 5 Stored module

モジュール同士の結合部には光漏れ防止のため、つばを取りつける。また、先端には圧縮部材として、薄いプレートを取り付ける。

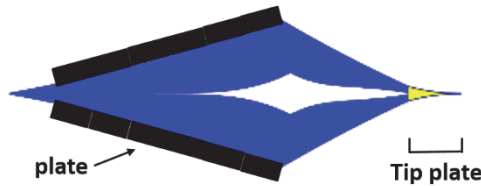


Fig. 6 Modular membrane with plate

1.2. 本研究の目的

本稿では、自己展開膜面トラスを用いた occulter の実現に向けて、耐宇宙環境性を有する非透過膜、透過膜の2種類の膜を選定する。膜の選定については、ミッションに要求される透過率や耐宇宙環境性だけでなく、コストや取扱やすさ等も考慮する。また、膜の収納方法について示す。収納方法については、小さく収納することができるだけでなく、容易に干渉なく展開ができることも求められる。以上から膜の選定と要求を満たす収納方法を示すことが本研究の目的である。

2. Occulter用膜の選定

2.1. 膜への要求

Occulter に用いる膜には、次の3点が要求される。(1) 耐宇宙環境性：宇宙環境で長期間使用するため、温度、放射線、原子状酸素などに耐え得る膜である必要がある。(2) 透過率：非透過膜・透過膜はそれぞれ極めて非透過・透過であることが求められる。(3) 長期収納性：膜面を収納してから宇宙空間での展開までに長い時間を有する可能性があるため、展開までの間に宇宙環境下で膜同士が固着しない必要がある。以上の要求を満たす膜を選定する。

2.2. 非透過膜

Occulter の膜面を構成する非透過膜を選定する。宇宙環境下での使用実績と透過率から2.1節に示した要求に当てはまるものをTable 1に洗い出した。また、その中から(a) コストや(b) 膜厚/重量、(c) 均一性、(d) 有害性がなく取り扱いやすいなどの観点から判定したものをTable 2に示す。ただし、(a)に関しては、1 m²当たりの価格で検討を行った。単位面積当たり 5000 円以下のものを◎、10000 円以下のものを○、10000 円を超えるものを×としている。膜厚に関しては、収納を考慮し～50μm/～500μm/500μm～で判定した。また、均一性と有害性に関しては、有無の2段階で判定している。

Table 1 Non-transmissive membrane evaluation

膜の種類	(a)	(b)	(c)	(d)
ゴアテックス	○	×	○	○
MLI(多層断熱材)	○	×	○	○
ベクトラン	◎	×	○	○
黒色塗料塗布ポリイミド	○	×	×	×
アルミ蒸着ポリイミド	◎	○	×	○
スパッタリングポリイミド	◎	○	×	○
ブラックポリイミド PMB type	◎	◎	○	○
ブラックカプトン	×	◎	○	○

Table 1 より、すべての項目において○以上の評価のブラックポリイミドを非透過膜として選定する。選定したブラックポリイミドを Fig. 7、諸元を Table 2 に示す。



Fig. 7 Black polyimide

Table 2 Specification of black polyimide

Product	PMB025
Thickness	25 μm
Heat Shrinkage	±0.2 %
Tensile Strength	88.3 MPa
Elongation	≥20 %
Transmittance	0 %

2.3. 透過膜

本節では occulter の膜面を構成する透過膜の選定結果を示す。2.1 節に示した要求を満たすものとして、透明ポリイミドとメッシュが挙げられる。今回は、張力をかけることが目的のため、透明ポリイミドを用いる。また、非透過膜にブラックポリイミドを用いるため、物理特性、特に、剛性および熱特性が近い点でも有利である。選定した透明ポリイミドを Fig. 8、諸元を Table 3 に示す。



Fig. 8 Transparent polyimide

Table 3 Specification of transparent polyimide

Product	TORMED Type X
Thickness	25 μm
Heat Shrinkage	-0.14 %
Tensile Strength	160 MPa
Elongation	25 %
Transmittance	88%
Refractive Index	1.68 %

3. 膜の収納

3.1. 収納への要求

膜の収納には、次のことが要求される。(1)収納サイズ: 収納した際にロケットフェアリング内に収納できることが求められる。今回は、モジュール化し、収納したトラスの大きさである $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 以内に収納することが条件となる。(2) ノード位置: 折りたたまれた膜面の取り付け位置がノード収納時に同じ位置にくる必要がある。(3) 干渉なく展開する: 膜を取り付けるノード 4 点が引っ張ることで膜が互いに干渉なく展開することが求められる。また、展開時にねじれが生じないことも重要である。

3.2. 提案する折り方

膜を収納するための折り方について検討を行う。3.1 節に示した(3)の要求を満たすような折りたたみ方に関しては、過去にいくつか提案されている。代表的なものに、2006 年に JAXA により打ち上げられた ETS-VIII のアンテナに採用された折り方が挙げられる¹⁴。これは、大型のメッシュを小さく折り畳んで収納する方法である。提案された収納方法を Fig. 9 に示す。

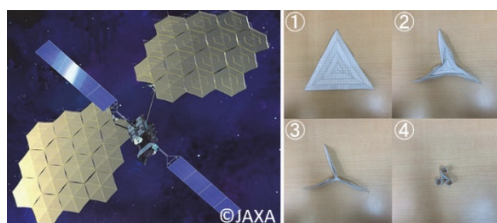


Fig. 9 ETS-VIII (left) and storage flow (right)

Fig. 9 の右図に示す折り方を参考に、モジュール化した occulter の収納方法を検討した。

(a) 折り方 1

Fig. 9 の右図に示す折り方を参考に、以下に示す流れで折り線を描く。①ノードを頂点とする三角形を描く。②それぞれの三角形の重心を求める。③重心に向かって一定の幅で山折り線と谷折り線を描く。④重心に向かう線も山折り谷折りを交互に繰り返す。この折り方を以降「折り方 1」と呼ぶ。折り方 1 の折り線の描き方を Fig. 11 に示す。また、折り線を Fig. 11 に示す。

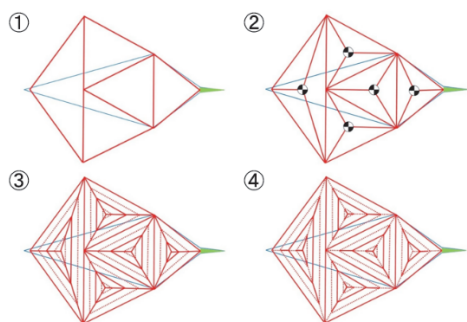


Fig. 10 Flow of drawing a folding pattern

収納する際には、まず、折り線に沿って十字架上に折りたたむ。そして、十字架上に折りたたんだ 4 本の束をそれぞれ蛇腹に折りたたんで収納する。このようにして折り畳んだ膜の展開の様子を Fig. 12 に示す。

折り方 1 の問題点は、膜の外形に折り線との交点が多く生じるため、Fig. 6 に示した膜の縁に取り付けるつばと共に収納す

ることが難しい点である。

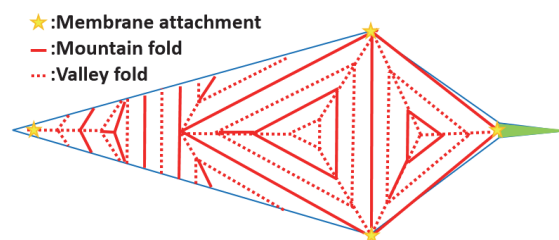


Fig. 11 Folding pattern of fold1

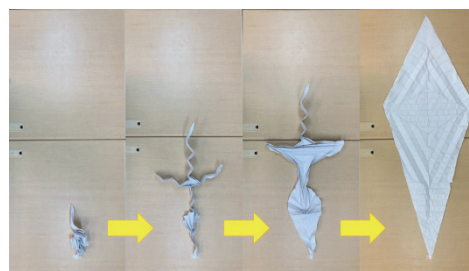


Fig. 12 Deployment flow of stored membrane by fold1



Fig. 13 Folded membrane by bellow folding

(b) 折り方 2

(a)で示した問題点を解決するため、Fig. 14 のように外形と変わらないように折り線を描いた。この折り方を「折り方 2」とする。折り方 2 の折り線を Fig. 14 に示す。折り線を描く流れは折り方 1 と同様であるが、折り方 2 は構成する三角形が 2 つとなる。折り方 2 を用いて収納した膜面を展開する様子を Fig. 15 に示す。Fig. 15 から、膜外形に取り付けられたつばも膜面とともに問題なく収納・展開が可能であることが確認できた。

折り方 2 を用いて膜面を収納する際、つばは問題なく収納することができるが、Fig. 16 に示すように先端プレートは折り曲げて収納する必要がある。先端プレートは薄く固い素材を用いることを想定しているため、折り曲げることは難しい。

この解決策として、膜と先端プレートの間にメッシュを入れることや先端プレートにヒンジを取り付け、折り曲げを可能にすることが挙げられる。しかし、ヒンジを取り付けた場合は、ヒンジ部分から光が漏れ出す可能性がある。また、可動部は極力少なくしたいため、先端プレートを折らないで折りたたむ方法が必要である。

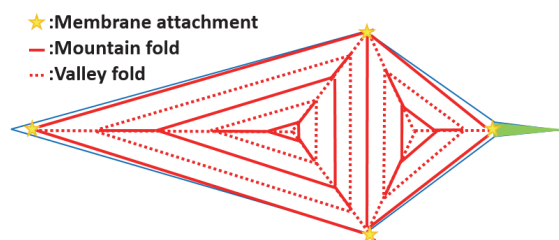


Fig. 14 Folding pattern of fold2

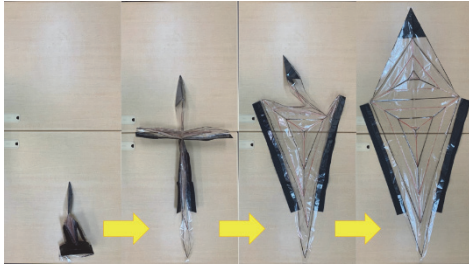


Fig. 15 Deployment flow of stored membrane by fold2



Fig. 16 Bent tip plate by fold2

(c) 折り方3

先端プレートを折らずに収納するため、先端プレートと膜の境界を平行に折ることができるように折り線の三角形を構成する。4つの三角形を Fig. 17 のように組み合わせることで、これを可能にする。この折り方を「折り方3」とする。また、折り方3を用いて収納した膜面を展開する様子を Fig. 18 に示す。Fig. 18 から、ノード位置4点を引っ張ることで、干渉なく展開することが確認できた。

Fig. 19 に示す通り、折り方3を用いることで、膜面はつばと共に収納することが可能であると確認できた。また、Fig. 20 に示す通り、先端プレートも折り曲げることなく、収納することが可能となった。

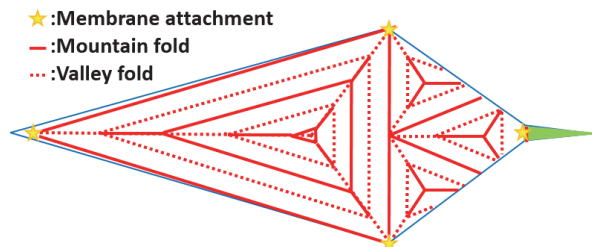


Fig. 17 Folding pattern of fold3

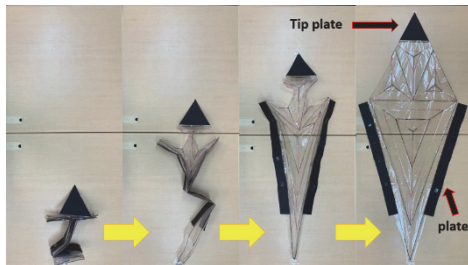


Fig. 18 Deployment flow of stored membrane by fold3



Fig. 19 Stored membrane by fold3 with plate

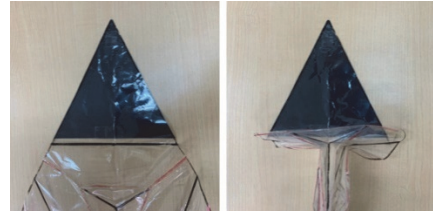


Fig. 20 Tip plate when deployed (left) and stored (right)

折り方3の収納後の大きさを Fig. 21 に示す。要求の1つであるノード位置の0.3m x 0.2m以内に収納が満たされている。

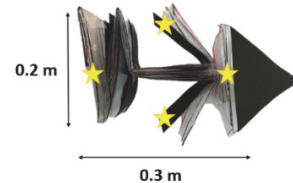


Fig. 21 Size of stored modular membrane

4. 結論

本稿ではスターシェードシステムにおける occulter に用いる膜素材と収納方法を示した。透過率、耐宇宙環境性、宇宙実績等の要求から、occulter を構成する非透過膜にはブラックポリイミド、透過膜には透明ポリイミドを選定した。また、収納方法に関しては、膜面に取り付けるつばや先端プレートと共に収納することができ、かつ干渉なく展開させることができる折り方を提案した。提案する折り方を用いて、簡易的な実験モデルの収納・展開実験を行い、問題なく収納・展開が可能であることを確認した。Occulter は非常に高い形状精度が求められるため、今後は膜面にマイクロデバイス等を搭載し、軌道上で形状を微調整する手法を検討する。

謝辞

本研究は科研費 18H03817 の補助を受けて行われました。

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, E. Villalba, J.S. Parker, G.H. Born, 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] Y. Miyazaki, M. Fukunaga, D. Kousaka, Membrane Structure Supported by Self-Deployable Truss for Space Applications. AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2018-0451, 2018, pp.1-13.
- [5] 設楽翔一, 宮崎康行, 中村壮児, 高坂大樹, 福永桃子, 自己展開膜面トラスを用いたスターシェードの形状, 第62回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4962, pp.1-6, 2018.
- [6] S. Shitara, S. Kataoka, A. Kawashita, Y. Miyazaki, Concept Design of Occulter Using Modular Self-Deployable Membrane Truss, AIAA Scitech 2020 Forum, AIAA 2020-1182, 2019, pp.1-12.
- [7] 目黒在, 高度な移動体通信衛星のための世界最大級展開アンテナの開発: 技術試験衛星 VIII 型大型展開アンテナの軌道上展開成功, 日本機械学会誌, 110 巻 (2007) 1063 号, 2007.
- [8] 野島武敏, 容易な展開を考慮した薄い円形膜の折りたたみ法の折紙によるモデル化, 日本機械学会論文集(C編)67 巻 653 号, pp.270-275, 2001.