

自己展開膜面トラスを用いたスターシェードの性能評価

Performance Evaluation of Starshade Using Self-Deployable Membrane Truss

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

中村壮児

Takeru Nakamura

The Starshade system is a system that directly observes exoplanets by putting large stellar light shield called occulter between the space telescope and the star proposed by NASA/JPL. The shape of the currently proposed occulter is a petal shape which suppresses the diffraction of the stellar light as much as possible. Since this shape has a curved outline unsuitable for the deployment structure, the occulter is a very complex deployment style and its cost is expensive. In order to solve this problem, we are working on applying Self-Deployable Membrane Truss (SDMT) to the occulter structure. The author proposes a new shape for applying SDMT to the occulter. We evaluate the performance of the proposed shape by comparing the contrast distribution of the conventional shape and new shape when the observation wavelength is changed, or the shape is deformed, or the attitude changes.

1. 序論

1.1. 系外惑星の観測とスターシェード

太陽系外惑星は 1995 年に初めて発見されて以降、現在に至るまで数多くが発見されている^[1]。しかし、それらの多くは視線速度法やトランジット法といった間接観測法によって発見されており^[2]、惑星の姿を直接的に見たものはその難しさゆえにほとんどなく、惑星の表層に関する詳細な情報は得られていないというのが現状である。

直接観測における一番の問題は、恒星が惑星と比較した際に非常に明るいため、恒星の光によって惑星の観測が阻害されてしまうことであり、これを解決するシステムが Fig. 1 に示すスターシェードシステムである。

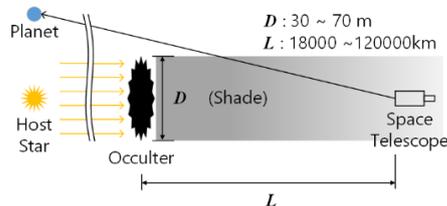


Fig. 1 Starsahde system

スターシェードシステムとはオカルタ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。実現には、望遠鏡の検出性能の向上の他に、高い形状精度を有する数十 m 級のおカルタの展開や、望遠鏡とオカルタとの高精度なフォーメーションフライトなどの課題があり、これらの研究が NASA/JPL 等で進められている。特に、オカルタについては恒星光の回折を極力抑える花弁型のもが、構造の収納・展開方法まで含めて提案されている^[3]。オカルタは大型であるため、花弁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構成することが考えられるが、花弁形状は展開構造に不向きな曲線外形を有するため、提案されているオカルタは非常に複雑な構造様式でかつ高コストとなるのが課題となっている。

1.2. 自己展開膜面トラス

筆者らは、オカルタ構造に自己展開膜面トラスを適用することで、上記の課題を解決しようと考えている。筆者らの研究室

では 2 つのコンベックステープをエッジで向かい合わせに接触させた、バイコンベックスブームと呼ばれる部材を伸展部材とする自己展開トラスの研究を行っている。自己展開膜面トラスとは自己展開トラスに膜面を取り付けたものである(Fig.2)。

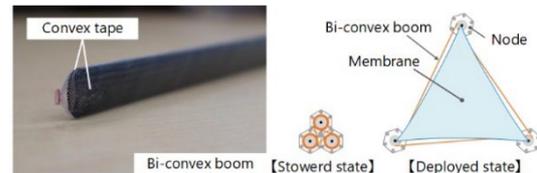


Fig.2 Convex tape and Self-Deployable Membrane Truss

自己展開トラスの利点としては、アクチュエータ等の動力を必要とせず展開することが可能という点に加え、薄肉部材であるコンベックスブームを使用することによる高い軽量性、メジャーのようにコンベックスブームを巻き取って収納することによる高い収納性、コンベックスブームの弾性に起因する自己伸展力による高い展開性などが挙げられ、大型宇宙構造物への応用が期待されている。スターシェードもその一つであり、オカルタ構造に自己展開膜面トラス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し、コストも含めた実現性は一段と高くなると考えられる。

1.3. 研究目的

筆者らの最終的な目標は、オカルタ構造に自己展開膜面トラスを用いたスターシェードシステムを設計、開発し、系外惑星の直接観測を行うことである。それには、オカルタの形状精度や姿勢制御への要求を明らかにする必要がある。そのために本論文では、自己展開膜面トラスをオカルタに適用するための新しい形状を提案し、観測波長・オカルタ形状・姿勢を変化させたときの、オカルタ性能評価関数であるコントラストを従来の花弁型形状と新形状とで比較する。これらのパラメータ（観測波長、形状変形、姿勢変化）は軌道上で複合的に変化することが想定され、オカルタの形状精度への要求や姿勢制御への要求を明らかにするには、様々なパラメータ設定が必要となる。本研究は要求出しの前段階として、従来形状と新形状とで単一のパラメータを変化させた時のコントラストを計算し、結果を比較することで新形状の性能を評価することを目的とする。

2. 新しいオカルタ形状の導出

2.1. オカルタ形状の性能評価法

本研究ではオカルタ形状の性能評価関数としてコントラストを用いる。コントラストとは望遠鏡の位置における恒星光と回折光の強度比であり、この値が 10^{-10} 以下であれば、現在の検出器の性能で直接観測が可能とされている^[4]。光の強度は電場の2乗で表され、光源と観測者の間に遮蔽物がないときの光（恒星光）の電場 E_{null} と、遮蔽物があるときの光（回折光）の電場 E_{occ} からコントラストは式のように表せる。ただし、幾何学的関係は図3に示す通りであり、 λ は観測波長、 E_0 はオカルタへの入射波を平面波としたときの振幅である。

$$\text{Contrast}[-] = \frac{|E_{occ}|^2}{|E_{null}|^2} = \left| \frac{E_{occ}}{E_0 e^{2\pi iz/\lambda}} \right|^2 \quad (1)$$

$$= \left| 1 - \frac{1}{i\lambda z} \iint_S e^{\frac{i\pi}{\lambda z}(r^2+\rho^2)} e^{-\frac{2\pi i}{\lambda z} r \rho \cos(\theta-\phi)} r dr d\theta \right|^2$$

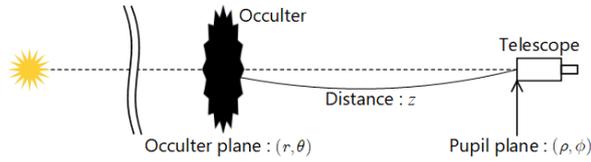


Fig. 3 Schematic of starshade

2.2. アポダイゼーション関数の導出

オカルタ形状が円である場合、光の回折により、望遠鏡の位置で十分なコントラストは得られない。そこで、オカルタ膜の光の透過率を円の縁にかけて減少させるという、アポダイズドマスク (Fig. 4-a) が提案されている^[5]。アポダイズドマスクによる回折光の電場 $E_{o,apod}$ は次式で表される。

$$E_{o,apod}(\rho) = E_0 e^{\frac{2\pi i}{\lambda} z} \left[1 - \frac{2\pi}{i\lambda z} \int_0^R e^{\frac{\pi i}{\lambda z}(r^2+\rho^2)} J_0 \left(\frac{2\pi r \rho}{\lambda z} \right) A(r) r dr \right] \quad (2)$$

ただし、 R はオカルタの最大半径、 J_0 は0次のベッセル関数である。式(2)において $A(r)$ はアポダイゼーション関数 (Fig. 4-b) と呼ばれ、オカルタ膜の光の透過率を表し、 $A(r) = 0$ の時は完全透過、 $A(r) = 1$ の時は完全非透過を意味する。望遠鏡の位置で十分なコントラストを得るために以下の最適化問題^[6]を解くことで、最適な $A(r)$ を求める。

$$\begin{aligned} \min: & \gamma \\ \text{sub. to:} & \begin{cases} -\gamma \leq \text{Re} \left[E_{o,apod}(\rho) / E_0 e^{2\pi iz/\lambda} \right] \leq \gamma \\ -\gamma \leq \text{Im} \left[E_{o,apod}(\rho) / E_0 e^{2\pi iz/\lambda} \right] \leq \gamma \\ \text{for } \rho \in [0, \rho_{\text{dark}}], \lambda \in [\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}] \\ A(r) = 1 & \text{for } r \in [0, r_{os}] \\ A(r) \leq 0 & \text{for } r \in [0, R] \\ -d \leq A''(r) \leq d & \text{for } r \in [0, R] \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

$E_{o,apod}(\rho) / E_0 e^{2\pi iz/\lambda}$ の絶対値の2乗がコントラストであり、このコントラストを最小にするため、 $E_{o,apod}(\rho) / E_0 e^{2\pi iz/\lambda}$ の実部と虚部について、抑制レベル γ による制約を設ける。つまり、 γ を上記の制約の下で最小化した際の、 $A(r)$ を求める。 λ_{min} 、 λ_{max} はそれぞれ最適化の対象とする観測波長の下

限、上限であり、 ρ_{dark} は暗領域の半径である。暗領域とは十分なコントラストを達成したい領域であり、暗領域で 10^{-10} 以下のコントラストを得ることを目標とする場合、 $2\gamma^2 \leq 10^{-10}$ であることが望ましい。また、 r_{os} はオカルタ中央の非透過部の遮蔽円の半径、 d は平滑条件の閾値である。

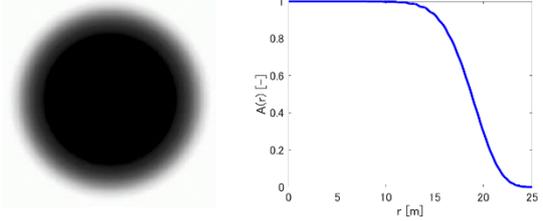


Fig. 4 Apodization

2.3. 従来のオカルタ形状導出

膜材料の光の透過率を徐々に変えることは材料・技術的に難しい。そこで、膜材料自体の透過率は一律“1”であるとし、アポダイズドマスクと同等の性能をもつオカルタ形状として提案されたのが、ペタライズドマスクである^[7]。 N 枚のペタルでオカルタを構成する場合、ペタライズドマスクの形状は、次式のように非透過の点集合 S で表される。

$$S = \{(r, \theta), 0 \leq r \leq R, \theta \in \Theta(r)\} \quad (4)$$

$$\Theta(r) = \bigcup_{n=0}^{N-1} \left[\frac{2\pi n}{N} - \frac{\pi}{N} A(r), \frac{2\pi n}{N} + \frac{\pi}{N} A(r) \right]$$

つまり、アポダイゼーション関数 $A(r)$ が得られたら、それをもとにオカルタの形状を決めようというものであり、その形状は、Fig. 5に示す通り、花卉状になる。この形状を以降、曲線形状と呼ぶ。

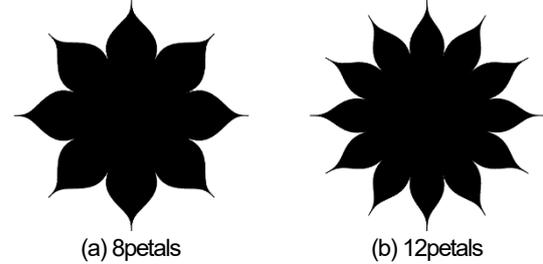


Fig. 5 Curved shape

2.4. 自己展開膜面トラスを適用するためのオカルタ形状導出

自己展開膜面トラスの部材は直線状に伸展するため、2.3節の花弁型オカルタのような曲線形状は実現困難である。そこで、外形はできるだけ直線的な形状にしつつ、式(4)と同等の遮蔽性能を実現することを考える。

式(4)は半径方向において空間に対する遮蔽物の割合がアポダイゼーション関数と等しくなることを表している。そこで、例えば $n = 0$ のペタルにおいて、Fig. 6のように外縁を折れ線のような形状とした場合、ペタル内部に $bc = ad - BC$ を満たす穴をあける。この時、式(5)が成り立ち、穴をあけた形状でも、ペタライズドマスクと同様、空間に対する遮蔽物の割合がアポダイゼーション関数と等しくなる。

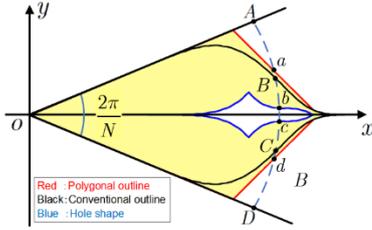


Fig. 6 Shape of a petal of occulter with hole

$$A(r) = \frac{\widehat{BC}}{\widehat{AD}} = \frac{\widehat{ad} - \widehat{bc}}{\widehat{AD}} \quad (5)$$

筆者らはこの処理を $0 \leq n \leq N$ のすべてで施すことにより、ベタライズドマスクと同等の性能が得られるのではないかと予想した。この形状を、以降折れ線形状と呼ぶ。折れ線形状オカルタの全体形状を Fig. 7 に示す。

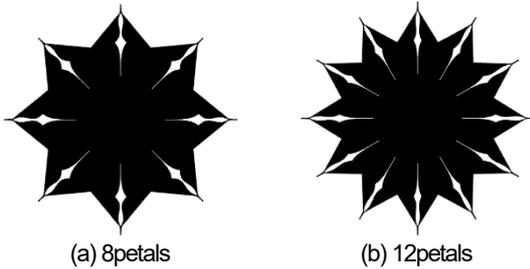


Fig. 7 Polygonal shape

3. オカルタの性能評価

3.1. 解析パラメータの設定

オカルタの性能を評価するにあたって、解析パラメータを Table 1 のように設定する。以降に示す解析結果は、すべてこのパラメータの下で解析を行ったものである。

Parameter	Value
Separation distance, Z	72000 km
Occulter maximum radius, R	25 m
Optical shield radius, r_{os}	8.0 m
Lower wavelength, λ_{\min}	300 nm
Upper wavelength, λ_{\max}	1100 nm
Dark region radius, ρ_{dark}	1 m
Smoothness, d	0.1

3.2. 観測波長に対する性能評価

観測波長に対する性能評価のために、曲線形状と折れ線形状について、望遠鏡の瞳面における周方向のコントラスト平均を、 $\lambda = 450 \sim 1050$ [nm] まで 100 [nm] 刻みで算出する。ペタル数 8, 10, 12 枚のときについて、平均コントラストをプロットしたグラフを Fig. 8 から Fig. 10 に示す。グラフ中の赤の領域は、 $A(r)$ 最適化の際の暗領域で、かつコントラストが 10^{-10} 以下の領域であり、この領域を必要領域と呼ぶ。

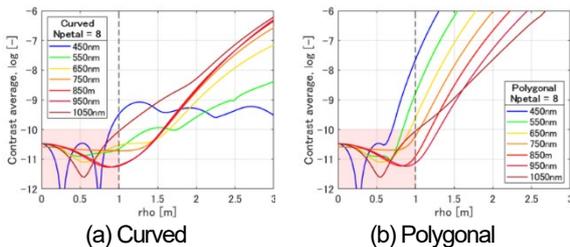


Fig. 8 Contrast average for each wavelength, 8petals

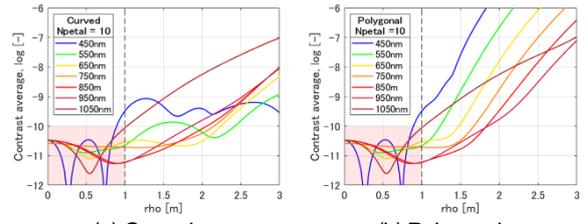


Fig. 9 Contrast average for each wavelength, 10petals

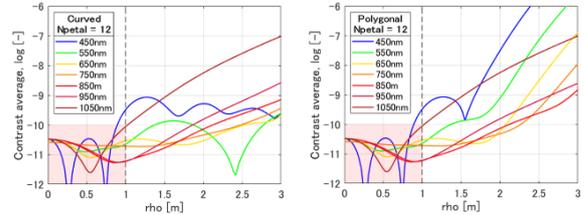


Fig. 10 Contrast average for each wavelength, 12petals

また、ペタル数 8, 12, 16 枚のとき、各波長においてコントラスト平均が 10^{-10} 以下となる領域、つまり実質的な暗領域の大きさを Table 2 に示す。

Petal	Type	450 [nm]	550 [nm]	650 [nm]	750 [nm]
8	Curved [m]	0.892	1.390	1.674	1.584
	Polygonal [m]	0.685	0.835	0.932	1.052
12	Curved [m]	0.892	1.373	2.499	2.480
	Polygonal [m]	0.892	1.373	2.076	2.268
16	Curved [m]	0.892	1.373	2.499	2.491
	Polygonal [m]	0.892	1.373	2.499	2.491

Petal	Type	850 [nm]	950 [nm]	1050 [nm]
8	Curved [m]	1.566	1.585	1.027
	Polygonal [m]	1.192	1.302	1.027
12	Curved [m]	2.118	1.860	1.027
	Polygonal [m]	2.118	1.860	1.027
16	Curved [m]	2.118	1.860	1.027
	Polygonal [m]	2.118	1.860	1.027

Fig. 8 から、曲線形状でペタル 8 枚のとき、必要領域で 450 [nm] だけしかコントラストが 10^{-10} に達していないのに対して、折れ線形状でペタル 8 枚のときは、450 [nm] に加えて、550, 650 [nm] においても 10^{-10} に達していないことがわかる。しかし、Fig. 9-b から折れ線形状でペタル 10 枚のときは、8 枚の時に比べて必要領域でのコントラストが改善し、550, 650 [nm] で 10^{-10} に達していることがわかる。また、実質的な暗領域の大きさは、曲線形状、折れ線形状ともにペタル数が多くなるにつれ大きくなる傾向にあり、全体的に折れ線形状よりも曲線形状のほうが大きい。しかし、ペタル数が多くなるにつれ、曲線形状と折れ線形状とで実質的な暗領域の大きさに差がなくなり、Table 2 からペタル数 16 枚のときは差がほとんどないことがわかる。

3.3. 形状変形に対する性能評価

オカルタの形状は極座標 (r, θ) で表される。任意の位置 r における角度座標 θ に対して、変形 $\Delta = +0.001$ [rad] を与えた際の瞳面 ($\rho = -1 \sim 1$ [m]) におけるコントラストの平均を、オカ

ルタ形状に合わせてプロットしたグラフを Fig. 11 に示す.

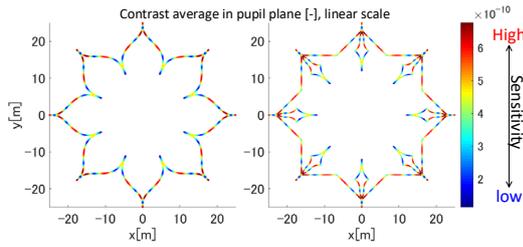


Fig. 11 Sensitivity of occulter's deformation point

Fig. 11 より, 変形によるコントラストの変化の大きい箇所と小さい箇所が周期的にあらわれ, 曲線形状と折れ線形状とで変化の大きさ, 周期ともほぼ同じとなるのがわかる.

3.4. 姿勢変化に対する性能評価

姿勢変化に対する性能評価のために, 曲線形状と折れ線形状について, オカルタの中心を通る縦軸を回転軸とし, 5, 10 [deg.] だけ回転させたときの, 瞳面 ($\rho = -1 \sim 1$ [m]) におけるコントラストを Fig. 12 から Fig. 15 に示す. 以降に示す結果は, $\lambda = 450$ [nm] における結果である.

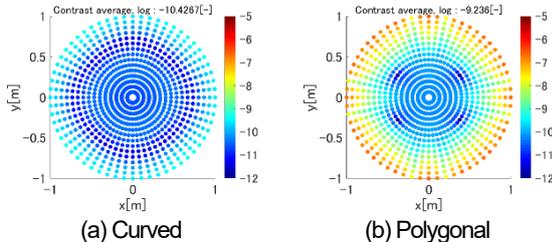


Fig. 12 Contrast when occulter is rotated 5 deg., 8petals

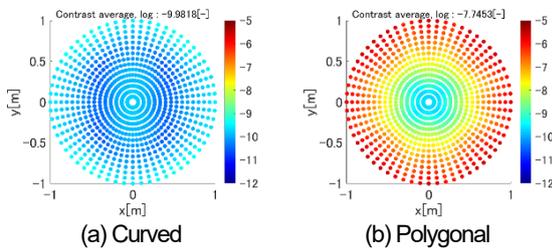


Fig. 13 Contrast when occulter is rotated 10 deg., 8petals

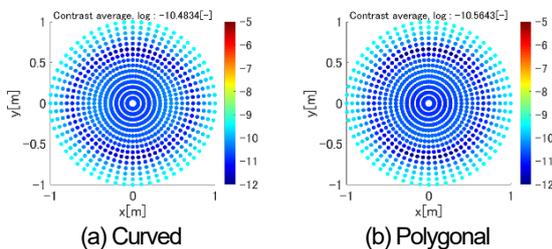


Fig. 14 Contrast when occulter is rotated 5 deg., 16petals

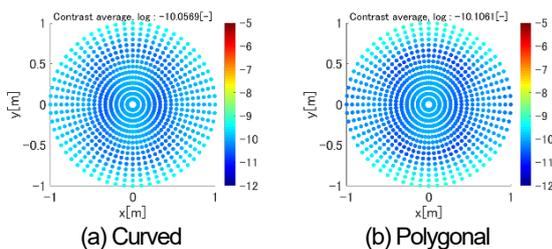


Fig. 15 Contrast when occulter is rotated 10 deg., 16petals

Fig. 12, Fig. 13 から, ペタル数 8 枚のときは曲線形状よりも折れ線形状において, 姿勢の変化に対するコントラストの変化が大きいたことが分かる. しかし, Fig. 14, Fig. 15 のようにペタル数が 16 枚と多くなると, 姿勢の変化に対するコントラストの変化は曲線形状と折れ線形状とでほぼ変わらない.

0 ~ 10 [deg.] まで 1 [deg.] 刻みで回転させたときの瞳面 ($\rho = -1 \sim 1$ [m]) におけるコントラスト平均を Fig. 16 に示す.

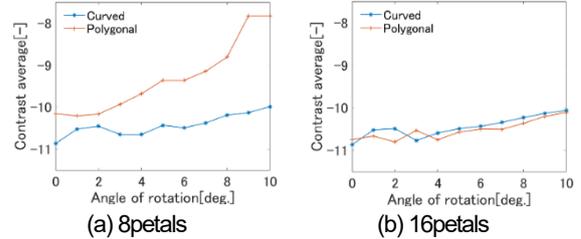


Fig. 16 Contrast average in pupil plane when occulter's attitude has changed

Fig. 16 から, 姿勢変化によるコントラストの変化は, ペタル 8 枚のときは, 曲線形状より折れ線形状の方が大きい, ペタル 16 枚ではほぼ同じになることが分かる.

4. 結論

本研究では以下の結論を得た.

- 観測波長に対する直線形状の性能は, ペタルの数が多くなるにつれてその性能が曲線形状に近づき, ペタル 16 枚ではほぼ同じ性能となる.
- 形状変形に対する直線形状の性能は, 今回の解析方法であれば曲線形状とほぼ変わらない性能となった. しかし, オカルタの変形はこの解析のような単純な変形ではないため, 今後, 製造誤差や振動モード形状を解析にて見積もり, それをコントラストの計算に反映させる必要がある.
- 姿勢変化に対する直線形状の性能は, ペタル数が多ければ, 曲線形状と同等である.

謝辞

本研究は 17H01349 の補助を受けて行われました.

参考文献

- 井田茂, 系外惑星, 東京出版会 (2007), p1
- 浦川聖太郎, トランジット法による系外惑星探索, 日本惑星科学会誌 Vol.16.No.1(2007), pp58-60.
- Robert J. Vanderbei : Eliminating Poisson's Spot with Linear Programming, Operations Research and Cyber- Infrastructure. Springer, Vol. 47, pp.455-468, 2009.
- David J. Des Marais, et.al. Remote Sensing of Planetary Properties and Biosignatures on Extrasolar Terrestrial Planets, Astrobiology, Vol.2, No.2 (2002), pp.153-181.
- Robert J. Vanderbei : Eliminating Poisson's Spot with Linear Programming, Operations Research and Cyber- Infrastructure. Springer, Vol. 47, pp.455-468, 2009.
- Robert J. Vanderbei, Eliminating Poisson's Spot with Linear Programming, Operations Research and Cyber-Infrastructure. Springer (2009), pp.8-11.
- Robert J. Vanderbei, Eric Cady, and N. Jeremy Kasdin, Optimal Occulter Design for Finding Extrasolar Planets, The Astrophysical Journal, Vol. 665, No.1 (2007), pp.794-798.