自己展開膜面トラス構造の大型アプリケーションへの適用に関する研究

Research on Application of Self-Deployable Membrane Truss Structure to Large Space Structure

指導教授 宮崎 康行

M7010 高坂 大樹 Daiki Kousaka

Starshade system has been proposed as an observation method of exoplanets. In this research, the self-deployable membrane truss structure is applied to the occulter of the starshade system, and a conceptual design of the scale model of the occulter is conducted. The self-deployment mechanism for the ground-based experiment has been already developed in the previous research. On the other hand, this paper proposes a scale model for space demonstration. The model is applied to the design of the 10m class occulter that is applicable to the space demonstration using HTV-X vehicle. The structural analysis of the designed model shows that the out-of-plane oscillation of the membrane is dominant in the lower mode vibration, that gives little influence on the performance of the occulter.

1. 序論

1.1. 大型宇宙構造物ミッションと自己展開膜面トラス

近年提案されている宇宙ミッションは高度化かつ多様化していることから, Table.1 や Fig.1 に示すような,様々なアプリケーションに対応可能な大型宇宙構造物への需要が高まっている.

Table.1 Large space structure missions

Sort	Case		
Ultra Large Structure	SSPS		
Large and High Accuracy Structure	Starshade		
Large Structure	De-orbit Devices		
Large Diameter and	T A I		
Ultra High Accuracy Structure	Large Antenna		



(a) Starshade(Exo-S^[1]) (b) Large antenna Fig.1 Large space structure

大型宇宙構造物の実現のためには、輸送時のペイロードの制 約から、軽量であることに加え、優れた収納・展開性を有し ていなければならず、従来、軽量かつ比剛性の高いゴッサマ ー構造の研究が行われてきた.そんな中、より剛性が高い構 造物として、展開トラス構造と膜構造を組み合わせた膜面ト ラス構造が提案されてきた.特に、トラス構造の部材として、 断面が凸型形状であるコンベックステープを用いた構造が注 目されている.コンベックステープは、曲げた状態から解放 すると、蓄えられた歪エネルギを運動エネルギに変換し、直 線形状に復元する性質を有している.そのため、コンベック ステープは、円筒状に巻き付けて収納し、保持を解放するこ とで、自己伸展する自己伸展部材となる.大型宇宙構造物に とって、高い収納性、そしてシンプルな展開様式を持ち合わ せたコンベックステープは非常に魅力的な存在である.

コンベックステープを用いた研究開発は従来行われてきて おり,著者らの研究室ではコンベックステープを2枚,閉断 面形状に組み合わせたバイコンベックスブームのような自己 伸展ブームを用いて, Fig.2 に示すような自己展開膜面トラス 構造の研究開発を進めてきた^[2].



(a) ϕ 4.4m (b) ϕ 5m Fig.2 Self-deployable membrane truss structure

様々な展開構造が提案されている中,この展開構造は収納性・ シンプルな展開様式・軽量性・展開後の剛性の高さ・モジュ ール化が可能等の多くの利点を持ち合わせており,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.しかし, 自己展開膜面トラス構造は,未だ宇宙実証をした例がない. そこで,現在提案されているアプリケーションの小型モデル を自己展開膜面トラス構造で実証することで,宇宙空間にお ける自己展開膜面トラス構造の有用性を示すと同時に,大型 宇宙構造物への適応性があることを示したいと考えている.

1.2. 自己展開膜面トラス構造の宇宙実証

太陽系外惑星の観測手法のうち、直接観測法に分類される スターシェードシステムという手法が提案されており³³,こ れまで、NASAのExo-Sプロジェクトで検討がされてきてい る (Fig.1)^[1]. Exo-S では, Vanderbei らによって提案されて いる花弁形状を有したオカルタを採用している[4].オカルタ は、数十mと非常に大きい構造物であるため、花弁形状の部 分は薄膜を支持材で構成し、それらを展開トラス等の展開構 造物に取り付け、展開することが考えられる.しかし、曲線 を有した構造のため、提案されているオカルタ構造は非常に 複雑な構造様式かつ高コストなものとなっている. そこで, オカルタに自己展開膜面トラス構造を適用することで、比較 的シンプルな展開様式であるオカルタを提案したいと考えた. まず、設楽らによって自己展開膜面トラス構造を適用し易い 折れ線形状のオカルタ形状が提案された (Fig.3)^[5]. そこで, 1.1節で述べたアプリケーションの1つとして、このオカルタ を採用し、小型モデルで宇宙実証を行い、実スケールモデル へとステップアップしていきたいと考えている.また、宇宙 実証の機会としては、現時点では JAXA が現在検討中の HTV-X が最も有力であると考えている.



Fig.3 Polygonal shape of occulter

1.3. 研究目的

前節までを踏まえ、本研究では、スターシェードシステム 実現と自己展開膜面トラス構造の宇宙実証のため、HTV-X に よる軌道上技術実証を利用することを想定^[6]し、10m 級オカ ルタへ自己展開膜面トラス構造が適用可能であることを示す ことを目的とする.

2. 宇宙実証用自己展開機構の提案

これまで著者らの研究室では, Fig.4 に示すような地上実験 モデルで概念検討を進めてきたが,これをそのまま宇宙で使 用するにはいくつか課題がある.





そこで今回、この展開様式を踏襲した、新たな宇宙実証用 自己展開機構を提案する. 自己展開機構は, ブームとハブ, ガイドローラー,ダンパー,軸等で構成されており,特に重 要なのが、展開速度を制御するダンパーである. ダンパーの トルク値は、ハブ形状の設計に基づく要求によって決められ ており,要求値から逸脱すると,ハブからブームが剥離し, 展開に影響を及ぼす可能性があるため,宇宙環境下でも適切 に動作するダンパー機構が必要である^[7].また,従来の自己展 開機構は、ノードとハブの関係が回転フリー状態となってい る. 今回, 適用を検討するオカルタ構造は, 展開後, 姿勢制御 を行うため、支持部材の節点にあたるノードとハブの軸との 間のガタにより非線形でかつ予測が困難な振動が起きること は望ましくない.加えて、当然ながら、回転フリーの状態よ り、ラッチ状態の方が、剛性が高い^[8].以上により、新たにラ ッチ機構を追加することとし、オカルタ構造のみならず、様々 なアプリケーションに適用可能な自己展開機構を検討する.

2.1. ダンパー機構

これまで検討してきたダンパー機構は、回転軸にダンパー のトルクを加える方式であったが、構成部品の多さにより故 障確率が高くなる可能性が大きいことや、十分なトルクを得 るために油やゴム等を用いており、収納・打上げから展開ま でミッションが長期間に及ぶことを想定すると、材料の環境 劣化等によりダンパーのトルク値が要求値を外れる恐れがあ る.そこで本研究では Fig.5 に示すように①軸、②ハブ上下 面、③フランジ部側面のいずれかに対し摩擦を加える方式を 検討する.



Fig.5 Candidate of friction applying part

これにより,前述のような材料劣化の可能性のある部品を使 用しなくても済み,トルクが要求値を外れる可能性を低くす ることができる.また,一般的に行われている摩擦摩耗試験 の方法を用いることで,動摩擦係数や摩耗量を見積もること ができ,トルク値を正確に見積もることが可能となる.

次に摩擦の印加箇所について検討する.

①軸

軸に対し摩擦を与える場合,軸を包み込むカバーまたは線 対称の分断されたカバーによって摩擦を与えることが考 えられる.しかし,大型化に伴い,ハブの回転回数が増加 することを考慮すると,カバーまたは軸の摩耗により距離 が生まれ,適切なトルクを与えられない可能性がある.

ハブ上下面

ハブ上下面どちらかに摩擦を与える場合, ピン・オン・デ ィスク方式またはボール・オン・ディスク方式の適用が考 えられる.回転に伴い摩耗することを考慮すると, 先端が 一定長さ以上同一径のピンを用いた方式が望ましい.また, 回転軸を中心に, 点対称にピンを配置することで, 軸のブ レを防ぐことができる.

③ フランジ部側面 軸の場合と同様であり、さら に領域が狭いことを考慮する

に点対称にピンを押し付ける方

式を提案する.その概念図を Fig.6

に領域が狭いことを考慮する と不適切である. 以上より、ハブ上下面のどちらか Load direction

Fig.6 Conceptual design of damper mechanism

2.2. ラッチ機構

に示す.

ラッチ機構には、展開完了時にのみラッチが動作し、収納 時および展開時にはハブをノードに対して回転フリーに保つ ことが要求される.これを満たすためには、収納時と展開時 で状態が異なる要素の利用が考えられ、自己展開機構におい ては、ブームがその要素に該当する.ブームは収納時および 展開時、ハブの側面に巻き付けられており、展開完了時にの みハブの側面が暴露する.そこで、Fig.7のように、収納時お よび展開時にはブーム表面を這わせ、展開完了時に暴露した ハブの側面にピン状の物体を差し込む方式を提案する.



Fig.7の方式の具体案として、ピンを差し込むサイドピン方式 と、先端がピン状に加工されたバーを差し込むサイドバー方 式の2案を検討し、省スペース化やラッチ後の剛性の高さの 点からサイドバー方式を採用することとした.ラッチ機構は 性質上、展開直後のハブに差し込まれる際、瞬間的に最大荷 重が加わる.この荷重を静荷重として扱い、有限要素解析ソ フト「ANSYS」を用いて静的構造解析を行った.解析条件は Table.2 および Fig.8 の通りである.

Table.2 Analysis conditions

Material	A5052	F[N]	
Young's modulus[GPa]	68.3	Hub	
Poisson's ratio[-]	0.34		
$\operatorname{Force}[\mathbf{N}]^{[7]}$	0.065285	Maximum load	
Shear strength[MPa]	125	Fig & Load dimension	
Safety ratio[-]	1.5	Fig.o Load direction	

解析を行った結果, Fig.9の通りとなり,最大主応力が2219 7Paとなった.最大主応力が許容せん断応力より十分小さく なり,安全余裕が1を超え,ラッチ機構として十分に耐え得 ると言える.



Fig.9 Principal stress distribution

2.3. 宇宙実証用自己展開機構のコンセプト案

2.1 節および2.2 節の検討に基づいた宇宙実証用自己展開機 構のコンセプト案を Fig.10 に示す.本機構では,部品点数削 減のため,支柱を壁面に変更し,一体成型のケーシングとし た.ただし,ブームとケーシング開口部の間に発生する摩擦 を低減するため,ガイドローラーをブームが存在する開口部 にのみ設置する.





(a) Side-pin method (b) Side-bar method Fig.10 Self-deployable mechanism for space demonstration

10m 級オカルタ構造の検討 1. 膜構造

Fig.3のオカルタの形状における外形,特に,ペタル先端の 先細形状の部分の変形は光学的性能に影響するので,この部 分は膜面とは別の素材による強度補完やアクチュエータの使 用によって,剛性や形状精度の向上を図ることとする.また, 穴形状の箇所については,特異な形状をしているため,穴と して扱う場合,高度な形状維持が要求される.そこで,今回 は透過率が 90%以上の準透明膜を張ることで,穴形状ではな く異なる材料を組み合わせた一枚の膜として取り扱うことと した.

次に膜面の展張方法について述べる.オカルタは形状精度 の要求が非常に高い構造物である.そのため,膜面を展張す る支持構造の片側のみに膜面を取り付けると,膜の張力によ

って膜側にたわむことが予 想され,形状精度を満たさな くなる.そこで今回提案する オカルタでは,Fig.11のよう に支持構造の両側に同一形 状の膜構造を取り付け,膜の 張力によるたわみを打ち消 す構造とした.



Fig.11 Membrane mounting method

3.2. トラス形状 3.2.1. 形状設計

自己展開膜面トラス構造は、展開時に必要な形状をしてい るだけでなく、ハブに巻き付けて収納した際に、ブームがハ ブに収納しきれずに余ることがないようにしなくてはならず、 そのためにはブームの長さおよびハブへの取り付け角度等を 適切に設計しなければならない^[2].本研究における折れ線形 状のオカルタの設計条件は以下の通りである.

①展開時、非透過部領域内にすべての構造を収めること

 ② 収納時, HTV-X で想定されている曝露カーゴの容量 1000mm×1000mm×1500mmに収めること

③ 展開時,10m 級であること

④ペタル数は8枚を想定すること

今回は、オカルタ中心のハブに8本のブームが取り付けられ ることとなる.そのため、ハブ1つに対しブームを全て取り 付けた場合、ブーム間の角度が狭くなり、ブームの取り付け が困難となるので、中心ノードのみハブの個数を4つとし、 それぞれ2本のブームが取り付けられる形状とした.

計算対象は,中心 ノードのハブが4 つであることから, 全体の4分の1形 状分とする.Fig.12 に4分の1形状の 番号付けを示す.ブ ームについては,同 同様の色で分類し ている.またハブに ついては,ハブ2, 3および4,5,6,



Fig.12 Numbering of truss

そして7,8の組み合わせが周方向に45度対称な要素である.

まず膜形状より,ハブ3,4の展開状態の座標は決定し,ハブ1は中心ノードのため収納・展開両状態で座標位置は変わらず,既知として座標を与えている.以上のことから,定数は Table.3 の通りである.

Table.3 Constant value				
Hub 1 [mm]	(x, y) = (100.0, 41.4)			
Hub 4 [mm]	(x, y) = (3091.0, -1619.6)			
Hub 7 $[mm]$	(x,y) = (5415,0)			
Boom length L3 [mm]	2210.6			

つまりハブ 2,3 および対応するブームのパラメータが求める べき変数となる. この 2 つのハブ要素は対称なので,ハブ 2 について記述する.ハブ 2 は,オカルタの透過部より左側に 位置するため, x 座標の最大値が存在することから,初期値 を最大値である $(x_2, y_2) = (2220, 0)$ とした.

次に計算の順序については、外側のハブの座標が決まって いるので、ハブ 7→4→2 の順序で巻き取り量を計算すること で、ハブ 2 関連のパラメータを求めることができる. そして、 求められた巻き取り量より、各ハブ間での巻き取られていな いブーム長さが求まり、収納時の各ハブ間の距離も求まる. このハブ間の距離が計算において扱う変数となる. 今回は、 ハブ 2 に関するパラメータを変数で扱うこととしたので、 Table.4 のように変数を設定した. これらの変数の値が、初期 値から±20[mm]の範囲に収まるよう収束計算を行う.

T-1-1-	4 37-		
Laple.	4 va	riable	vame

Distance between hubs	Initial value
d_{12}	$250 \ [\mathrm{mm}]$
d_{24}	$250 \ [mm]$
d_{27}	$350 \ [mm]$

[★]Subscript is hub number.

以上の設定で幾何学的手法に 基づき^[2]計算を行った結果,展 開時約 ϕ 10.8m, 収納時約 ϕ 0.8m となり, Fig.13 に示す ϕ 12m オカルタに収まる. 今 回,対象のペタル数は 8 枚だ が,10 枚,12 枚と増加し,隣 接するブーム間の角度が狭く なった場合でも、1 つのノード 内で複数のハブを有すること



で、同様の形状計算が適用できると考えている.

3.2.2. 構造解析

2.3 節および 3.2.1 節の結果を元に, ANSYS を用いて簡易 モデルの構造解析を行った. 解析条件を Table.5 に示す.

Table.5 Analysis conditions					
Model	Hub	Boom	Casing	Membrane	
Material	Ti-6Al-4V	SUS	A5052	Polyimide	
Number	28	40	25	2	
Young's	106.0	206.0	60.9	2.0	
modulus[GPa]	106.0	206.0	68.3	3.2	
Poisson's ratio[-]	0.33	0.30	0.34	0.30	

解析モデルは、ラッチされた状態であり、またペタル外縁部 の周方向ブームの交点16箇所と、中心ノード1箇所の計17 箇所を,支持部材と膜の結合点とした.これら解析モデルを 用いた構造解析の結果を Fig.14 に示す.



Fig.14 Mode shape at 1st order

解析結果より,面外方向への変形を有する構造であり,特に 低次では膜構造が支配的になることが分かった.この解析モ デルでは,膜要素を全て同一の素材としており,想定してい る素材が異なる一様な膜要素とは異なるが,トラス構造が膜 構造より剛性が高いので,薄膜の要素ならば同様のモード形 状となることが考えられる.透過部である穴周辺の変形が顕 著であるが,主な変形が面外方向のため,遮蔽性能にはほと んど影響を及ぼさないと考えられる.

4. 結論

従来の自己展開機構を、宇宙実証用モデルへと変更した案 を示した.そして、現在検討されている10m級オカルタへの 自己展開膜面トラス構造の適用案を示し、その形状特性を構 造解析により明らかにした.

謝辞

本研究は、文科省・科研費 18H03817 の補助を受けて行われ ました.

参考文献

- The Probe Scale Science and Technology Definition Teams of NASA's Astrophysis Division, Exo-S:Starshade Probe-Class Exoplanet Direct Imaging Mission Concept, Final Report(2015)pp.2, pp6-2.
- [2] 高坂,宮崎:バイコンベックスブームを用いた自己展開トラス 構造の試作検討,第59回構造強度に関する講演会,1A15, pp.43-45,2017年.
- [3] Wabster Cash: Detection of Earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter, Nature, Vol.442, pp.51-53, 2006.
- [4] R.J.Vanderbei, E.Cady, and N.J.Kasdin: Optimal Occulter Design for Finding Extrasolar Planets, The Astrophysical Journal, 665:794-798, 2007.
- [5] 設樂,宮崎,中村,高坂,福永: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, pp1-6, 2018年.
- [6] 伊藤:新型宇宙ステーション補給機(HTV-X(仮称))プロジェクト移行審査の結果について、科学技術・学術審議会・研究 計画・評価分科会・宇宙開発利用部会(第39回),2017年.
- [7] M.Fukunaga, Y.Miyazaki, S.Shitara, D.Kousaka, and D.Kawarabayashi: Design Method of Self-deployable Truss to Prevent Jamming of Stored Booms, AIAA 2019-1525, 2019 AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA Scitech Forum, San Diego, California, USA, 2019, 7-11 January.
- [8] M.Fukunaga, and Y.Miyazaki, Structural Characteristics of BCON Truss, International Symposium Technology and Science, 2017-c-23, Matsuyama, Japan, 2017, pp.1-8.