

Research and development of solar array membrane

Masanori Matsushita, Yuki Takao, Ahmed Kiyoshi Sugihara, Osamu Mori, Yasutaka Satou,
Yasuyuki Miyazaki, Tetsuya Nakamura (JAXA), Nobukatsu Okuizumi (MIT),
Akihito Watanabe, Hiroaki Ito, Toshiyuki Hori (Sakase Adtech)

Abstract

Solar array membranes are solar array paddles with thin-film solar cells mounted on thin membranes or fabrics, which are deployed with lightweight booms. Because solar array membranes can be lighter than the lightest conventional solar array paddles, we expect them to achieve the world's highest power-to-weight ratio (W/kg). We are developing them for small satellites. In this paper, we present the research and development of a prototype 9-m²-class solar array membrane and a 1-m²-class multifunctional membrane HELIOS, which is equipped with thin-film solar cells and antennas. HELIOS will be launched in FY2022.

太陽電池膜(世界最軽量級展開型太陽電池パドル)の研究開発

○松下将典, 高尾勇輝, 杉原アフマッド清志, 森治, 佐藤泰貴, 宮崎康行, 中村徹哉 (JAXA), 奥泉信克 (室工大), 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行 (サカセ・アドテック)

1. 背景

太陽電池膜とは、軽量なブームで展張される薄い膜や織物に薄膜太陽電池を搭載した展開型太陽電池パドル(SAP)のことである。

新たな価値をもたらすミッションの実現に向けて、高い出力質量比(発生電力/質量, W/kg)の展開型SAPが貢献できる。例として、解決できる課題を以下にあげる。小型SAR衛星は低軌道1周(約100分)で、最大約10分間しかSAR観測できない¹⁾。原因はSAR観測に1kW級の電力が必要なためである。軽量/大電力/高収納なSAPにより、SAR観測の長時間化が期待できる。観測の長時間化の観点からは、SAR衛星1機を追加で打ち上げるよりも、太陽電池膜を搭載して衛星1機あたりの観測時間を伸ばしたほうが、開発費・運用費・打上げ費などを総合的に考慮して低コストになる可能性がある。次に、太陽電池を搭載する小型宇宙機による外惑星領域(木星以遠)探査を考える。我々の概念検討では、イプシロンロケットによる打上げを前提とすると、200W/kg級の展開型SAPが質量制約から要求される。

現行の世界最軽量展開型SAPは150W/kg級である。例えば、ROSA, UltraFlexは実用段階にあり、国内ではTMSAPが技術実証された。

深宇宙探査機では、特に軽量SAPが求められる。2018年~2021年におけるNASAの外惑星探査機には、ROSA, UltraFlexが採用されたものがあり、Insight, Lucy, DARTが実際に打ち上げられている。NASAのレポート²⁾からは、構造物の軽量化ではなく太陽電池の高効率化を期待して、将来的なSAP軽量化の達成を目指すように読める。

日本では、120W/kg級SAPを搭載するDestiny+探査機が2024年度に打上げられる計画であるが、他に軽量SAPを搭載する打上げ決定の探査機は無い。日本に従来型SAP(~50W/kg)しか選択肢がない場合、2030年代以降に世界一級の探査ミッションが実現できなくなり、宇宙新興国にも後塵を拝するかもしれない。しかし、長年に渡る薄膜宇宙構造物に対する日本の技術的蓄積は、ソーラー電力セイル等のように、いまだ世界的に優位だろう。

これまでの知見も活用し、膜構造物をSAPへ応用することで、他国が実現できない技術・ミッションを創出できると考える。SAPへの応用を端緒として、大型膜構造物の技術的発展も期待され、大型ソーラー電力セイルによる探査・スターシェードによる系外惑星観測などにもつながる。

研究目的は、世界最軽量となる出力質量比200W/kg級(ジンバルは含まない)を目標とした太陽電池膜を開発することである。

本稿では、太陽電池膜の研究開発として、発電・アンテナ機能を有する軽量膜展開構造物HELIOSの開発^{3,4)}、9m²級太陽電池膜の試作を紹介する。

2. 発電・アンテナ機能を有する軽量膜展開構造物 HELIOS

HELIOS(Harvesting Energy with Lightweight Integrated Origami Structure)は、革新的衛星技術実証3号機の搭載機器である。PFM開発を完了して、衛星システムに納品済みであり、2022年度イプシロンロケット打上げを予定する。高収納で大面積な膜に発電・アンテナ等の機能性デバイスを付与する技術は、衛星の基盤技術の革新的な高度化をもたらす。コンステレーションを構築する小型通信衛星の大電力化/大容量化ができれば、例えば、ビッグデータ・AIを活用する社会の実現に宇宙から貢献し得る。

2.1. HELIOSのミッション概要

HELIOSには技術実証ミッションが主に3つあり、a) 太陽電池膜(薄膜太陽電池を貼付した膜展開構造物)、b) 第5世代通信ミリ波アンテナによるビームフォーミング、c) 薄膜アンテナ素子による干渉計実証である。図1にミッションシーケンスを示す。初期運用において、収納状態の膜構造物を展開し、その展開技術を実証する。その後の定常運用では、上述の3ミッションに対応して、a) 膜に貼付した薄膜太陽電池アレイの電流電圧(IV)特性評価、b) ビームフォーミング実証、c) 干渉計によるアンテナ素子の相対位置測定の実験を実施する。a)は、軽量展開型太陽電池パドルとして、世界最高級の出力質量比(W/kg)となる技術の実証を目標としている。HELIOSでは、膜が約1m²であり、一部

にのみ薄膜太陽電池を貼付する。b), c)は膜上アンテナと衛星構体露出面に搭載されたアンテナの間で無線通信を行い、実証する。

表 1 にサクセスクライテリアを示す。膜構造の展開と発電の確認がミニマムサクセスとなっている。残りのミッションは、フルサクセスである。なお、フルサクセスとして、HELIOS 搭載カメラの撮影動画での展開挙動の評価も行う。

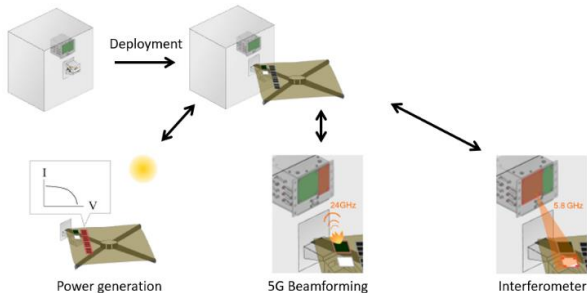


図 1 ミッションシーケンス

表 1 サクセスクライテリア

実証ミッション	ミニマムサクセス	フルサクセス
太陽電池膜	<ul style="list-style-type: none"> 膜構造の展開と発電の確認 <p>【確認方法】出力電圧/電流, IV特性, 温度, 展開確認スイッチ, 静止画取得</p>	<ul style="list-style-type: none"> 展開挙動の評価 <p>【確認方法】展開中にカメラで動画撮影</p> <ul style="list-style-type: none"> 短期間(軌道1周回)でのIV特性の評価 長期間(1年間)でのIV特性の評価 軌道上で長期間(1年間)、太陽電池が動作すること(信頼性の評価) <p>【確認方法】IV特性, 温度, 照度(バスの姿勢データ)を定期的に取得</p>
第5世代通信ミリ波アンテナ		<ul style="list-style-type: none"> 第5世代通信ミリ波アンテナの通信パワー計測 <p>【確認方法】通信パワーの計測</p> <ul style="list-style-type: none"> 第5世代通信ミリ波アンテナのビームフォーミングによるアンテナ非平面度補償 <p>【確認方法】通信パワーの計測</p>
薄膜アンテナ素子による干渉計		<ul style="list-style-type: none"> 5.8GHz膜アンテナによる干渉計の動作実証 <p>【確認方法】コリメーション信号の位相差の計測</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.8GHz干渉計による膜形状の計測 <p>【確認方法】コリメーション信号の位相差の計測</p>

2.2. HELIOS の膜構造部

膜構造部は、ポリイミド膜 (APICAL NPI, t0.01mm, 片面 Al 蒸着 t12nm)、ブーム、中心ハブ、それらを格納する展開カバーを含むローンチロック、衛星構体取付面となる IF プレートから成る。表 2 に膜構造部の仕様を示す。

展開はカバー展開、膜展開 2 段階で実施される。図 2 にカバー展開前・後の状態を示す。カバーはボルト 1 本で固定されており、フランジボルトアクチュエータ(FC2, EBAD)を駆動することでボルト

を破断し、バネヒンジの力でカバー展開する。展開前はカバー内に膜・中心ハブ・ブームが格納されている。

中心ハブに搭載されたモータにより、中心ハブに巻きつけて収納された 4 本の CFRP 製円筒ブーム $\phi 20\text{mm}$ を繰り出す。ブーム先端と膜がヒモで結ばれており、ブーム伸展により膜が展開する。膜展開の様子は図 3 の通りであり、定速でブーム伸展し、120 秒ほどで伸展および展開が完了する。

表 2 膜構造部の仕様

質量	1.62 kg
包絡域	膜収納状態：15 x 17 x 15 cm 膜展開状態：100 x 100 x 23 cm
薄膜太陽電池	太陽電池シート：Film-type Space Solar Sheet (SHARP) アレイ構成：12 直列 1 並列 Voc=37 V, Isc=0.43 A @ BOL, 効率 31 % @ BOL 最大発電量：13.7W @ BOL
その他	5G アンテナ x 1 干渉計アンテナ x 1

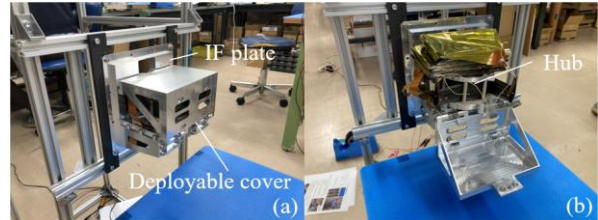


図 2 膜構造部(EM1)カバー展開

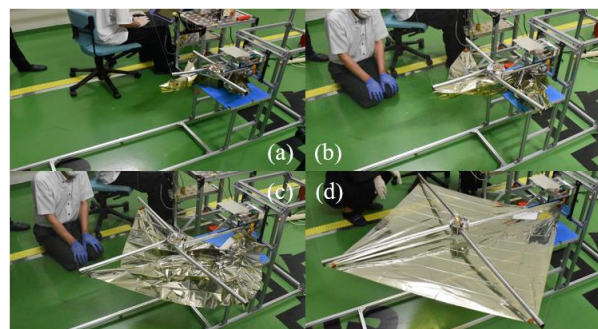


図 3 膜構造部(EM2)膜展開

膜には薄膜太陽電池シート・5G アンテナ・干渉計アンテナが貼付され、単眼カメラ画像から膜形状を推定するためのマーカも膜に貼付される(図 4, 図 5)。

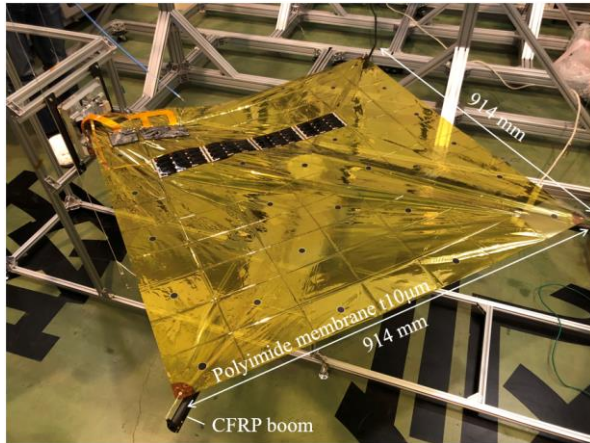


図4 膜構造部(PFM)外観



図5 膜構造部(PFM)膜面デバイス付近

膜上デバイスへの配線は、フレキシブルプリント基板(FPC)を採用し、配線の厚さを抑えた。FPCは直線状ではなく曲線状とし、FPCの折り返数を削減している。FPCの膜側ではない先端にはmicroDsubが実装されており、ローンチロックのIFプレートに固定される。ブーム内部にもFPCを通し、中心ハブのモータ等に配線する。デバイスやFPCの膜に対する取付方法には、カシメを採用した。

2.3. HELIOSのPFM試験

PFMでは、要求された環境試験(振動試験・衝撃試験・熱サイクル試験)を経て、展開試験を実施後、HELIOS単体の統合状態でIV特性測定試験を実施した。宇宙研のロングパルスソーラーシミュレータを使用した。IV特性測定試験の結果を図6に示す。IV特性は、出荷前の性能と比較して、劣化は確認されなかった。また、軌道上制御・評価装置であるEBOXでも、試験設備での測定同様に、IV特性が測定できた。

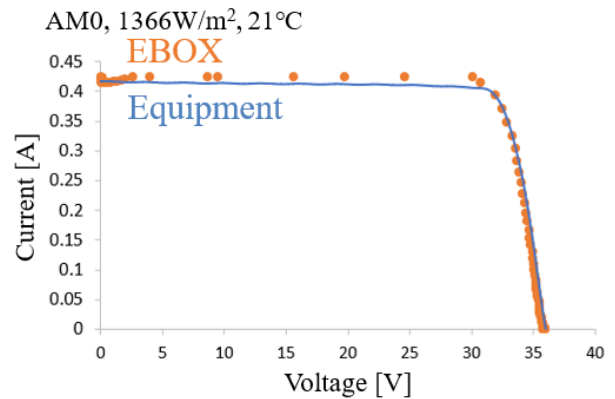


図6 IV特性測定結果(PFM環境試験後)

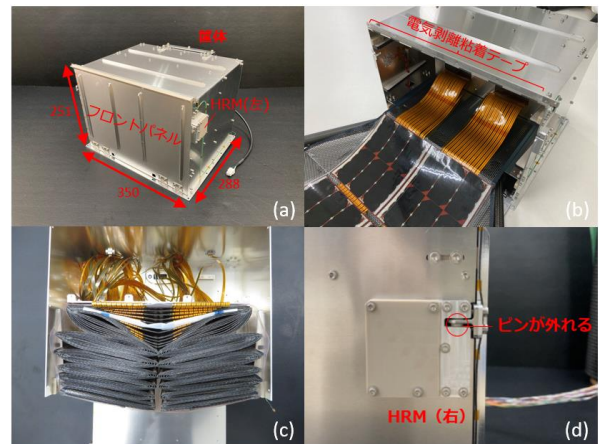


図7 9 m²級太陽電池膜の試作品(収納状態)

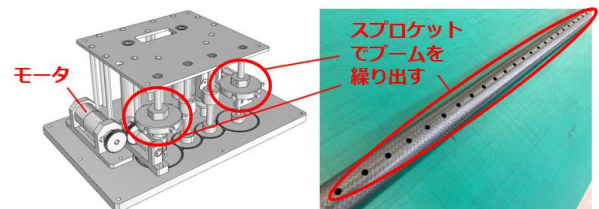


図8 ブーム伸展機構とブーム

3. 9 m²級太陽電池膜の試作

要求として小型宇宙機による外惑星領域(木星以遠)探査のSAPを想定した。2021年度はBBM相当を試作した。要求には未確定な点も多く、BBM相当なので、耐環境性などは今後も検討が要るが、試作に基づく2.4kW, 12kg, 200W/kg程度(ジンバル無し)の性能になる可能性がある。

9 m²級太陽電池膜の収納状態を図7に示す。筐体(350 x 288 x 251 mm)に太陽電池膜が蛇腹状に折り畳まれている。

展開は下記の手順を踏む。最初にフロントパネルを開けるため、保持開放機構(HRM)が筐体の左/右側面に各1個あり、ピンを外す。その後、フロントパネル前縁部が電気剥離粘着テープで固定さ

れているので、そのテープに電圧を印加して粘着力を低下させることで、フロントパネルが開く。フロントパネル展開後、ブーム伸展機構(図8)を用いて、モータ1個でCFRPブーム2本を同期伸展し、左右対称に膜を展開する。

9 m²級太陽電池膜の展開状態を図9に示す。約4mの正三角形膜である。膜には、全体的に薄膜太陽電池シートのダミー、膜中央の一部に本物の薄膜太陽電池シートが搭載されている。膜は、CFRP三軸織物製であり、波型成形で曲率半径200mmの凹凸をつけ、面外剛性を向上させた。三軸織物をTPUヒンジで結合後、薄膜太陽電池/ダミー・FPCハーネスを貼付している。短冊折りにより、太陽電池の平面充填率を高めた。今回の試作では、FPC配線設計は簡素化しているが、主要なFPCを縦横に配置した。

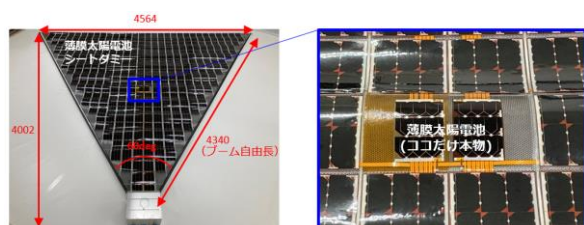


図9 9 m²級太陽電池膜の試作品(展開状態)

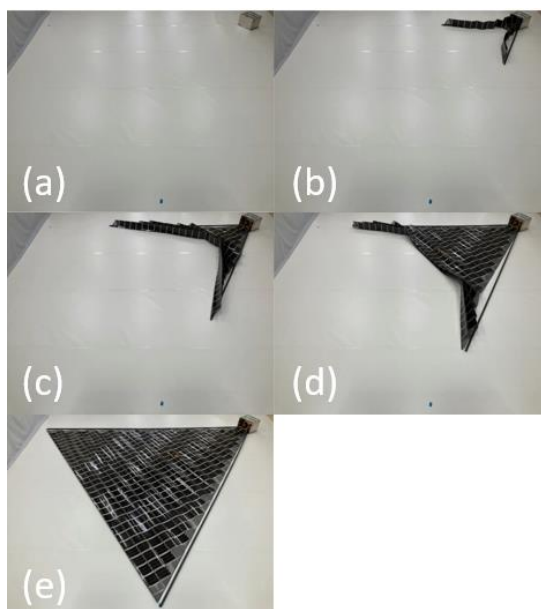


図10 展開試験(人のサポート有)

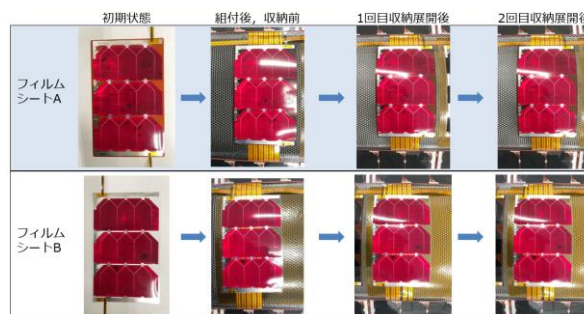


図11 展開試験後のEL検査結果

人手によるサポートがある状態での展開試験により、展開動作を確認した(図10)。展開・収納を2回繰り返し、薄膜太陽電池シートにクラックが生じないかEL検査で評価した。結果として、EL検査で異常は確認されなかった(図11)。

2021年度の試作では、環境試験を実施していない。2022年度は、環境試験を含むEM相当の開発を目標とする。

4. まとめ

本稿では、発電・アンテナ機能を有する軽量膜展開構造物 HELIOS の開発、9 m²級太陽電池膜の試作を紹介した。

参考文献

- 1) 斎藤宏文, 田中孝治, 三田信: 小型衛星搭載用合成開口レーダの開発, 第17回宇宙科学シンポジウム, 相模原, 2017年1月5-6日.
- 2) NASA/Jet Propulsion Laboratory-Caltech: Solar Power Technologies for Future Planetary Science Missions, JPL D-10136, 2017.
- 3) 松下将典, ほか: 発電・アンテナ機能を有する軽量膜展開構造物 HELIOS の技術詳細, 第65回宇宙科学技術連合講演会, 2J02, オンライン, 2021年11月9-12日.
- 4) M. Matsushita, et al.: Proto-flight Model Development of a Lightweight Membrane Deployment Structure with Power Generation and Antenna Functions, HELIOS, 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 2022-c-18, online, Feb.26-March 4, 2022.