

1B18 薄膜セル応用軽量太陽電池パドル

○島崎一紀, 中村徹哉, 住田泰史 (宇宙航空研究開発機構 研究開発本部)
嶋田貴信, 川勝康弘 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

Lightweight solar paddle using thin-film solar cells for DESTINY mission
Kazunori Shimazaki, Tetsuya Nakamura, Taishi Sumita (JAXA/ARD)
Takanobu Shimada, Yasuhiro Kawakatsu (ISAS/JAXA)

Key Words: High efficiency thin-film solar cell, Lightweight solar paddle

Abstract

Lightweight solar paddle is being developed for a small scientific satellite aimed at Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage (DESTINY). The paddle employs several important technologies. One of them is a space solar sheet (SSS) that is a unique device for generating electricity. It utilized lightweight and high efficiency thin-film solar cells. A curved solar panel was designed to improve an out-of-plane stiffness of SSS and the panel itself. In addition, retention and lightweight deployment mechanisms were designed. These technologies realize the lightweight solar paddle with high specific power of more than 100 W/kg. This paper presents the latest developmental status of lightweight solar paddle for DESTINY.

1. 背景および目的

JAXA/ISAS では, 小型科学衛星を用いた深宇宙探査技術実験ミッション (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage: DESTINY) が WG にて検討されている。DESTINY は, JAXA が研究開発を進めてきた大型イオンエンジン, 軽量太陽電池パドルなどの最先端技術を結集した電気推進式の小型高性能深宇宙輸送機であり, 高頻度な太陽系探査の実現に道を拓くものである。

イプシロンロケットにて打ち上げられる DESTINY は, 大型イオンエンジン $\mu 20$ により高エネルギー軌道に達する。また, 将来的に最大 200kg のミッションペイロードの搭載が可能である。このように小型でありながら大電力を要し, さらには大きなミッションペイロードを実現するためには軽量・高出力, つまり出力重量比 (W/kg) が大きい太陽電池パドルが必要不可欠な技術となる。アルミハニカムコアを CFRP のフェイスシートでサンドイッチした従来のリジッドパドルでは出力重量比が 50W/kg 程度であるのに対し (図 1 参照), DESTINY では 100W/kg 以上を有する軽量太陽電池パドルを搭載することを目的としている。

現在開発を進めている軽量太陽電池パドルには, 新たに開発中のスペースソーラーシート¹⁻³⁾を搭載す

る^{4,5)}。このシートを用いた軽量パネルは, 曲面フレーム構造⁵⁾を有し, スペースソーラーシートの面外剛性を向上させるとともに支持部材を削減することで軽量化を実現している。さらに本パネルは, モジュール化が可能であり電力要求の増大に対応できる高い拡張性がある。DESTINY においては, 片翼最大 14 枚の曲面パネルを搭載する予定である。

これまでに DESTINY 用の曲面パネルを保持・展開するための機構部品を試作検討した。また, 保持部の振動耐性ならびに保持力確認のための振動試験, および展開動作確認試験を行った。本稿では, それら最新の検討結果について報告する。

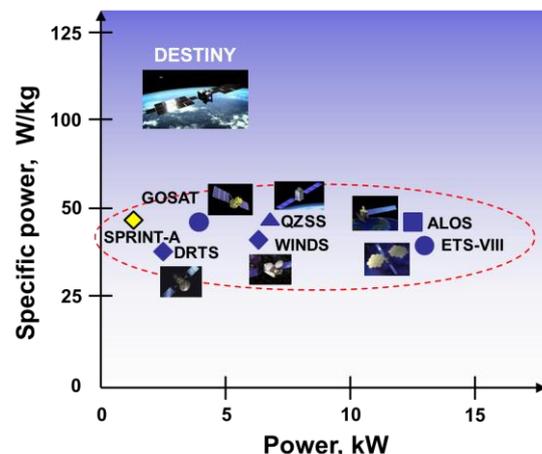


図 1 衛星電力とパドル出力重量比

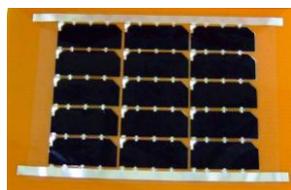
2. 軽量パドル要素技術

2.1 スペースソーラーシート

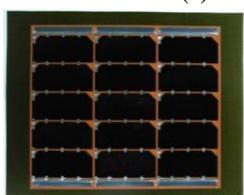
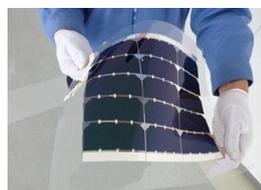
スペースソーラーシート (Space Solar Sheet: SSS) は、III-V 族化合物系の高効率薄膜太陽電池セル (表 1 参照) を用いることで、高出力、軽量、フレキシブルといった特長を実現している。図 2 に典型的な SSS の写真を示す。基本的には 15 セル (5 直 3 並列) から構成され、おおよそ A4 サイズ、厚さは 0.5mm 以下である。SSS には、薄膜セルが透明フィルムでラミネートされたフィルムタイプと、ガラスおよびバックシートにて挟まれたガラスタイプの 2 種類がある。DESTINY では、耐宇宙環境性に優れるガラスタイプの使用を想定している。質量は A4 シート 1 枚あたり約 30g である。従来のアルミハニカムの CFRP パネル上にリジッドな太陽電池セルを搭載する方法と比べると、同じ面積であれば約 1/3 程度の重量となる。

表 1 高効率薄膜セル諸元

	薄膜 2 接合 (開発完了)	薄膜 3 接合 (開発中)
セル構造	InGaP/GaAs	InGaP/GaAs/InGaAs
BOL 効率	24.9% (最高)	≥30%
厚さ	10μm 以下	15μm 以下



(a) フィルムタイプ



(b) ガラスタイプ



図 2 スペースソーラーシート

2.2 曲面パネル

太陽電池パネルは、打ち上げ時に非常に厳しい振動環境に曝される。SSS は、その軽量化を利用するため、従来の太陽電池パネルに貼り付けるのではなく、軽量フレームにて支持する方法を採用している。しかしながら、SSS は軽量かつ薄いため、その機械強度や振動挙動は平板のパネルよりも膜面のそれらに近い。そこで我々は、SSS に曲率を与えることで

構造上の機能を付与し、支持部材などの非構造質量の割合を減らすとともに、剛性の向上ならびに軽量化に取り組んだ。図 3 に試作した曲面パネルの一例を示す。曲率は、太陽電池セルの性能を損なうことなく、膜面剛性を効果的に向上できるように設定している。なお、写真のパネルは、将来の大型パネルも視野に入れた試作品であるため、DESTINY を想定したパネルよりも一回り大きい。写真からも分かる通り、通常の平板型のパネルとは異なり、パネル全体が緩やかな曲面となっている。また、この試作品には太陽電池セルを一部搭載し、その他は重量・機械特性を合わせたダミー SSS を用いている。本パネルに対して 10G の正弦波振動試験 (ノッチなし) 及び音響試験 (146.5dB, 180sec.) を実施した結果、SSS およびフレームには何の損傷も無く、十分な機械環境耐性を有することが確認された。



(a) セル面



(b) 反セル面

図 3 試作曲面パネル

3. 最新検討結果

3.1 ヒンジ設計・試作

ヒンジは展開時のパドル剛性を担うため、現状の太陽電池パドルシステムでは構造上、その軽量化が難しい。しかしながら、小型科学衛星においてヒンジ重量はパドル全体の約 15% 前後を占めている。そのため、ヒンジの軽量化が実現できればパドル全体の出力重量比を向上することができる。

本軽量パドルは、それぞれのパネルが従来のパネルに比べて非常に軽量である。そのため、パドル剛性を維持しつつ、ヒンジの軽量化が可能となった。新たなヒンジを設計・試作した結果、従来の科学衛

星のヒンジと比較して約 1/3 の重量とすることができた。

3.2 保持解放部設計

DESTINY では、片翼 14 枚のパネルを搭載することを前提としている。そこで、収納時のパネルがフェアリング包絡域と干渉するのを避けるため、保持機構には従来の低衝撃解放装置 (NEA: Non-explosive actuator) の使用を前提としたオフセット方式を検討している (図 4 参照)。オフセット方式とは、通常の保持方法とは異なり、収納されたパネルの外側に固定用の保持タワーを設置する方式である。

保持部の強度および保持部単体の剛性確認の結果、保持部は 100Hz 以上 (184Hz) の十分な剛性を有しており、パネル収納時の振動環境に影響を与えないことを確認した。また、強度上の問題がないことを確認している。

3.3 保持解放部振動試験

新規開発要素である保持部の振動耐性及び保持力を確認するため、保持解放部の BBM (NEA はダミーを使用) およびダミーパネルを用いて正弦波振動試験を実施した。図 4 に振動試験用供試体の外観を示す。試験は面内 2 軸と面外 1 軸の計 3 軸に対して 10G まで加振した。また、プリロードボルト (保持タワー先端部にあり、パネル保持部と NEA を結合している) には歪ゲージを貼付け、加振中に歪応答をモニターした。その結果、加振中の保持部からプリロードボルトが抜けることはなく、かつ、プリロードボルトに十分な強度余裕が確保されていた。このことから、本保持解放部の設計で振動試験耐性に問題が無いことを確認した。ただし、本保持部は約 1kg/1 個と非常に重いため、今後軽量化を試みる予定である。

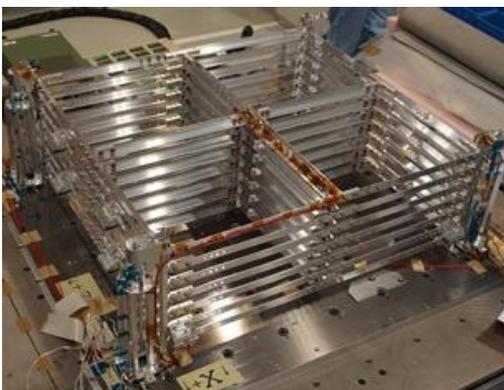


図 4 振動耐性確認用供試体外観
(パネル 4 コーナーに保持タワーが設置されている)

3.4 展開機構機能確認試験

DESTINY の太陽電池パドルは、長手方向にのみ展開する通常のパドルと異なり、直交方向にも展開するサイドパネルを多数採用している。そこで、展開動作確認用の供試体を製作し、展開動作の確認を行った。本試験の目的は、一連の展開動作を連続して観察することで、展開を制御するディレイの動作が妥当であること、展開動作を行う中で想定外の展開阻害 (機械的干渉) が発生しないことである。

供試体は、図 5 に示すようにパドル全体の一部を模擬したものであるが、展開検証に必要な要素を含めて製作した。今回の試験目的では、パネルを曲面とする必要がないため、ダミーパネルは通常の平板タイプの形状とした。衛星本体から見て一番外側となる 3 枚のパネルを第 1 ユニット、その隣の 3 枚を第 2 ユニットとし、最も内側のパネルをインパネルとした。その他に展開ヒンジダミー (メインヒンジダミー・サイドヒンジダミー)・ディレイから構成されている。ただし、本展開確認においては、供試体を吊り下げた状態で一連の展開動作を連続して実施するため、上に開くサイドパネルにかかる重力の影響をキャンセルする必要がある。そのため、サイドヒンジダミーについては、重力の影響分に相当する展開トルクを増強し、パネルダミーも軽量化したものを使用している。本展開シーケンス (図 6) は、実際の展開プロファイルを模擬したものであり、パネル枚数が増えた場合は、3 枚 1 組のユニットの展開が繰り返される。

試験の結果、展開制御ディレイの配置・機能に問題は無く、想定通りの展開動作を行うことが確認できた。また、全展開に至るまでの展開動作がスムーズに行われることを目視で確認し、図 6 に示したシーケンスで展開することを確認した。

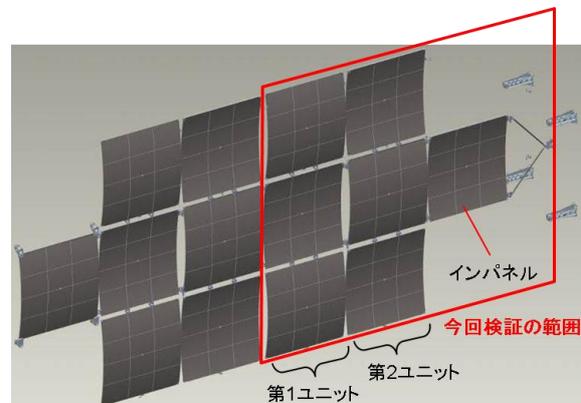


図 5 DESTINY 用軽量太陽電池パドル外観

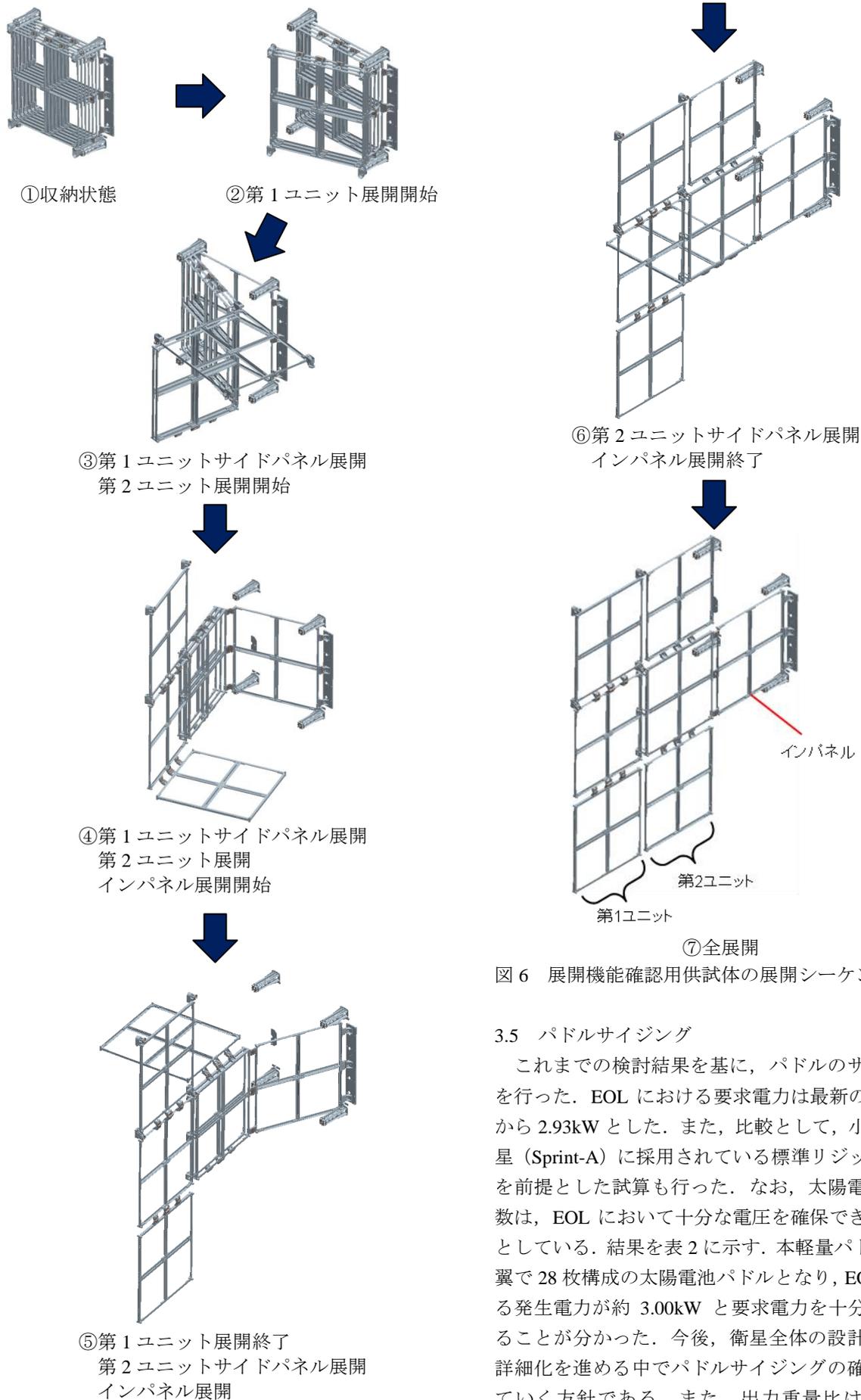


図6 展開機能確認用供試体の展開シーケンス概要

3.5 パドルサイジング

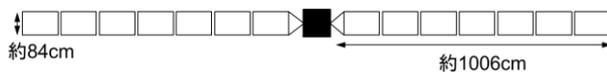
これまでの検討結果を基に、パドルのサイジングを行った。EOLにおける要求電力は最新の検討結果から2.93kWとした。また、比較として、小型科学衛星(Sprint-A)に採用されている標準リジッドパネルを前提とした試算も行った。なお、太陽電池の直列数は、EOLにおいて十分な電圧を確保できる直列数としている。結果を表2に示す。本軽量パドルでは2翼で28枚構成の太陽電池パドルとなり、EOLにおける発生電力が約3.00kWと要求電力を十分に満足することが分かった。今後、衛星全体の設計や運用の詳細化を進める中でパドルサイジングの確度を上げていく方針である。また、出力重量比は現時点で

117W/kg となっており、目標である 100W/kg を大きく上回っている。また、従来のリジッドパドルでは 2 翼で 14 枚となり、軽量パドルよりもパネル枚数が少ない。これは、単位パネルの大きさが異なることと、パネル裏面の放射線遮蔽能力が異なるためである。しかしながら、リジッドパドルの重量が 77.7kg であるのに対して、軽量パドルは 44.1kg であり、30kg 以上の軽量化が可能であることが分かった。

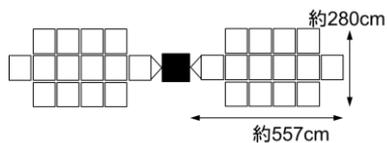
最後に展開時のパネル形状の概念図とおおよその大きさを図 6 に示す。軽量パドルはパネル枚数が多いものの十分に実現可能な形状であると考えられる。DESTINY で採用しているサイドパネルは、メインパネルを単純に長く伸ばすよりも衛星本体からの距離が短くなるため、電力を輸送するハーネスの長さも短くなり、結果的に軽量化へとつながる。

表 2 DESTINY を想定したパドルの構成・性能

	従来リジッド	軽量パドル
太陽電池セル	TJ (28.7% @BOL)	薄膜 3 接合 (30.0% @BOL)
直並列数	34 直 120 並列	Bus 部： 35 直 64 並列 Mission 部： 45 直 58 並列
カバーガラス 厚み	100 μm	100 μm
パネルサイズ (1 枚あたり)	約 129cm×84cm 厚さ：1.5cm	約 90cm×80cm 厚さ：1cm
必要パネル数	14 枚	28 枚
最大発生電力 (25℃, BOL)	4275 W	5193 W
最大発生電力 (60℃, EOL)	2951 W	2995 W
質量 (SADA 含まず)	77.7 kg	44.1 kg
出力重量比 (BOL)	55.0 W/kg	117 W/kg



(a) 従来リジッドパドル



(b) 軽量パドル

図 6 パドル形状比較

4. まとめ

DESTINY 用軽量薄膜太陽電池パドルの最新の検討結果について紹介した。スペースソーラーシートを用いた曲面パネルは、従来にない太陽電池パネル技術である。これまでに実機搭載に向けて、スペースソーラーシート、曲面パネル、軽量ヒンジ、保持解放機構等の開発を行い、曲面パネル、保持解放部の振動耐性の確認そして展開動作確認試験を完了した。そのため、本軽量パドルの技術は EM への移行レベルまで達していると考えている。今後は、衛星設計の詳細化とともにパドルの詳細な設計を進めていく予定である。

また、現段階での出力重量比は、スケールメリットの小さい小型衛星サイズであっても 117W/kg となっており、従来のリジッドパドルを大きく上回る性能を実現している。今後の詳細な検討により更なる高性能化が期待できる。

謝辞

本検討を行うにあたり、ご協力頂いたシャープ株式会社ならびに NEC 東芝スペースシステム株式会社の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Kodama, et al., “Development of Space Solar Sheet”, Technical Digest of the International PVSEC-17, 6O-B11-03, (2007).
- 2) T. Takamoto et al., “Application of InGaP/GaAs/InGaAs Triple Junction Solar cells to Space Use and Concentrator Photovoltaic”, Proc. IEEE 40th PVSC, Denver, U. S. A., (2014).
- 3) K. Shimazaki et al., “First Flight Demonstration of Glass-Type Space Solar Sheet”, Proc. IEEE 40th PVSC, Denver, U. S. A., (2014).
- 4) K. Shimazaki et al., “Progress in Development of Ultra-Lightweight Solar Panel Using Space Solar Sheet”, Proc. 35th IEEE PVSC, Honolulu, U.S.A., (2010) 725-730.
- 5) K. Shimazaki et al., “Lightweight Solar Paddle with High Specific Power of 150 W/kg” Proc. 10th European Space Power Conference, (2014).