3A09　革新的衛星技術実証プログラム小型実証衛星1号機搭載 軽量太陽電池パドルの構造・機構系設計と開発

○小林拓郎，金子直之，廣瀬大市（日本電気），住田泰史，内田英樹，塩見裕，今泉充（宇宙航空研究開発機構）

Structural and Mechanical Design and Development of Thin Membrane Solar Array Paddle (TMSAP) on Rapid Innovative payload demonstration Satellite-1(RAPIS-1)

Takuro Kobayashi, Naoyuki Kaneko, Taichi Hirose(NEC),
Taishi Sumita, Hideki Uchida, Hiroshi Shiomi and Mitsuru Imaizumi(JAXA)

Key Words: Satellites, Structures Design, Structures Analysis

Abstract

JAXA and NEC have developed Thin Membrane Solar Array Paddle (TMSAP) by unique structural design for weight saving. TMSAP was demonstrated on orbit and deployed successfully in February, 2019. The light weight substrate of TMSAP is a thin frame structure with curvature designed to ensure the stiffness, and the solar cells are put along the curvature with using the characteristics of flexibility. In addition, weight-optimized mechanisms are designed using the 3D printing technology partially. This paper shows the unique structural and mechanical design of TMSAP.

１．はじめに

軽量太陽電池パドル（以下、TMSAPと呼ぶ）は、JAXAとNECで開発した、12kW級衛星において通常のパドルの2倍以上の出力重量比（150W/kg以上）を実現する軽量かつ高出力な薄膜太陽電池パドルのスケールモデルである。本パドルは革新的衛星技術実証プログラム小型実証衛星1号機に搭載され、2019年1月にイプシロンロケット4号機により打上げられた。翌2月には軌道上で展開実証を実施し、成功裏に完了した。本稿では、TMSAPのユニークな構造・機構系の設計について報告する。

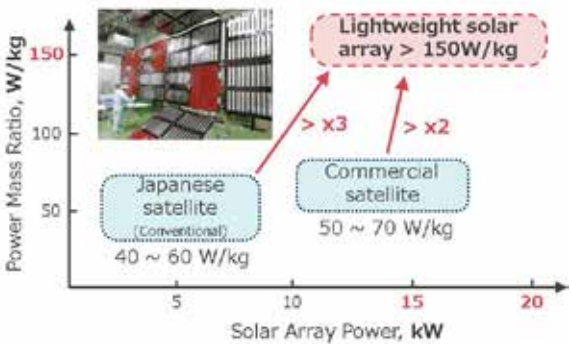


図1　一般的な太陽電池パドルの出力重量比

２．薄膜太陽電池パドルの設計コンセプトと開発経緯

薄膜太陽電池パドルは、軽量で柔軟に曲げられる特徴を有する新型の薄膜太陽電池アレイシート[1]（以下、薄膜アレイシートと呼ぶ）を用いて150W/kg以上を目標として開発を開始した。従来の太陽電池パドル構造の「ハニカムパネル等の剛な構造部材にアレイシートを貼り付ける」という発想から脱し、軌道上で発生電力性能に寄与しない構造部材をできる限り廃し、アレイシートのみに近い状態で太陽電池パドルの機能性能を満足する構造とすることをコンセプトとして設計・開発を行ってきた。

開発は2009年度から概念設計として薄膜アレイシートの搭載検討、展開方式検討を実施し、2013年度には現在の軽量パネル設計方式を確立した。2015年度には図1に示すような12kW級のEM品製造および一連の地上認定試験評価（TRL5）が完了した。その成果として薄膜アレイシートをフル実装した場合には世界最高性能の出力重量比159W/kgを達成する見込みを得た。図1に一般的な太陽電池パドルとの出力重量比に関する比較を示す。次のステップとして軌道上実証評価（TRL7）を目的に2016年度からTMSAPの開発を始めた。[2]

３．TMSAPの構造概要

TMSAPの外観を図2に示す。TMSAPはパネル面積を12kW級（図1）の1/4としたスケールモデルである。全体の構成は、新規設計の2次元展開機構の全要素が軌道上実証できるために必要な最小の構成であるパネル5枚とした。

TMSAPは以下に述べる従来と異なる設計コンセプトを適用したことで、従来同サイズの太陽電池パドルに対し約40%の軽量化を実現した。

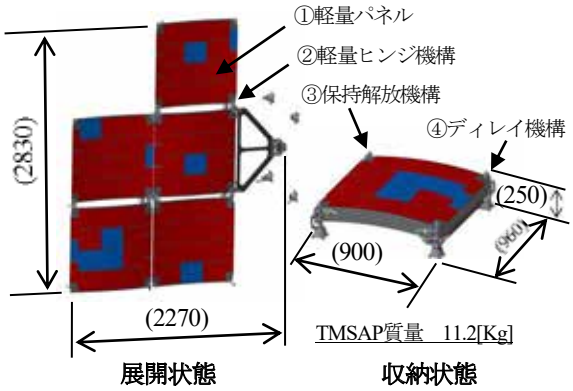


図2　TMSAP外観

ⓒ日本航空宇宙学会

① 軽量パネル

TMSAPの最も大きな特徴は、曲率を持たせたフレーム状のサブストレートに薄膜アレイシートを実装した軽量パネルである。

JAXA、SHARPが開発した軽量で高効率な薄膜アレイシート（図3）は、単純な外周支持では膜面の固有振動数が18Hzと低いが、曲率を与えることで幾何剛性により45Hzを超えることを解析により確認した。この特性を最大限に生かすため、サブストレートはCFRP表面板ALハニカムコアの薄板に曲率をもたせ、薄膜アレイシートの支持に必要な外周部分のみを残したフレーム形状とした。本形状で打上げ環境および展開時の発生荷重に耐えるため、高強度のCFRP材を適用し、積層構成を最適化することで強度・剛性を確保した。また、薄膜アレイシートは、1枚A4サイズを12枚連結したサイズを1ユニットとしてサブストレートに搭載することで、製造性を向上させた。

TMSAPの軽量パネルでは、フレーム状のサブストレートに薄膜アレイシートを適用することで、従来パネルの約1/3となる軽量化を達成した。

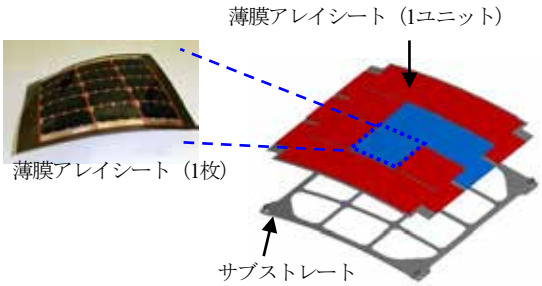
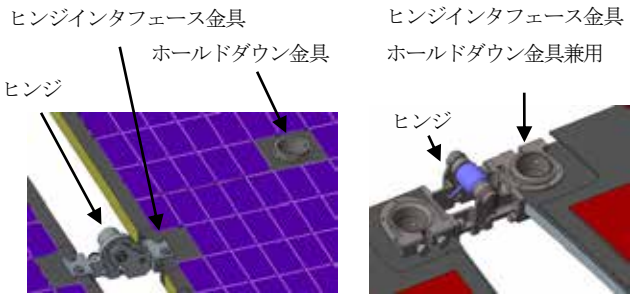


図3 軽量パネル

② 軽量ヒンジ機構

ヒンジ機構は搭載されたバネのトルクによりパドルを展開させる機能を有する。従来図4(a)のような別々の部品であったホールドダウン金具とヒンジインタフェース金具をTMSAPでは図4(b)のような兼用構造とした。さらにヒンジの設計を根本から見直し小型化を図った結果、従来ヒンジの約1/4にまで軽量化を実現した。



(a)従来品 (b)薄膜太陽電池パドル搭載品

図4 ヒンジ機構

また、次の取り組みにより製造コスト削減を行った。

3Dプリンタによる製造

図5に示すヒンジ機構の一部を3Dプリンタで製造することで、複雑な形状の部品については機械加工の70%程度のコストで製造することができた。人工衛星のフライトモデルに3Dプリンタ製の部品を搭載したことは日本初の実績である。

(a)ヒンジ金具 (b)ホールダウン金具 (c)ヨークI/F金具

図5 3Dプリンタによる製造部品

展開モニタの開発

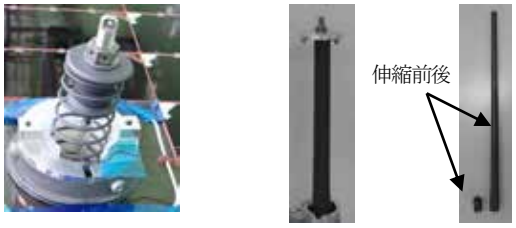
展開モニタはパドルの展開を確認するために、ヒンジ１ラインにつき１個必要とする。従来パドルでは、軌道上で実績のある図6(a)のマイクロスイッチを使用してきたが、低コスト化のためにマイクロスイッチに代わる図6(b)の展開モニタを開発した。その結果、従来の約1/10で製造可能となり、大幅なコスト削減を実現した。

(a)マイクロスイッチ (b)開発した展開モニタ

図6 展開モニタ

③保持解放機構

保持解放機構は、打上げ時に収納状態の太陽電池パドルを衛星構体に保持ボルトで保持し、軌道上で保持ボルトの解放および引き抜きを行う機能を有する。解放の分離デバイスには火薬を使用しないNEAを適用することで低衝撃を図っている。薄膜太陽電池パドルは、最大12枚のパネル保持を想定しているため、必然的に保持ボルトが長くなり引き抜くストロークも大きくなる。図7(a)に示す従来のコイルばねを適用すると、伸展率が2倍程度のため収納時・展開時ともにパネルから大きく突出してしまう。そのため、軽量で伸展率が10倍以上の図7(b)の竹の子バネを採用することで、収納状態を嵩低くコンパクトにし、かつコイルバネ方式に比べ約1/2となる軽量化を図った。



(a)コイルばね (b)竹の子ばね

図7 保持解放機構

④ディレイ機構

展開シーケンス制御には、通常図8(a)のようなワイヤリンク方式を採用し、各ヒンジの展開と同期させることが多い。しかし、ワイヤリンク方式は部品点数が多く質量増加となる。そこでTMSAPでは図8(b)に示す機械的な引っ掛けを設け、ヒンジの展開角度により段階的に他のヒンジが解放されていくディレイ機構を採用し、軽量化を図った。また、TMSAPはサイドパネルを有した二次元展開となるため、本機構により「メインパネル展開」の後に「サイドパネル展開」が開始するように展開シーケンスを制御することで、地上での試験検証を切り分け評価を容易とした。

(a)ワイヤリンク方式　(b)ディレイ方式

図8　ワイヤリンク方式とディレイ方式

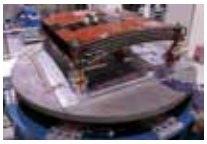
４．プロトフライト試験

製造したTMSAPに対し、プロトフライト試験を実施し、機能・性能の確認及び設計の妥当性を検証した。試験外観を図9に示す。

(a) 展開/保持解放試験

(b)音響試験

実績：O.A.
142.7dB
31秒



(c) 正弦波振動試験

実績（垂直軸）：
重心相当161.1m/s^2
パネル上ノッチング595.7m/s^2

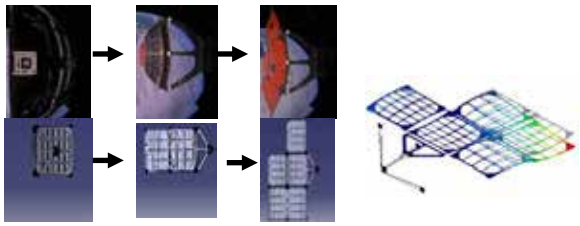
図9　プロトフライト試験外観

５．軌道上実証

TMSAPは軌道上で展開実証を行い、先述の展開モニタおよび衛星による撮像動画から全てのパネルが設計通りの挙動で正常に展開完了したことを確認した。また、測定したデータからパドル展開時間と展開剛性が得られた。展開時間と展開剛性について解析モデルのコリレーションを実施した結果、表1に示すように軌道上評価結果と解析結果が精度良く一致した。展開解析結果および展開時剛性解析モード形状を図10に示す。

表1　軌道上評価結果および解析結果

評価項目	軌道上評価結果	解析結果
展開時間	22s±1s	21.9s
展開剛性	1.04Hz	1.04Hz



(a)展開時画像と展開解析結果　(b)展開時1次モード形状
（LMS Virtual.Lab Mortion使用）　（ NX NASTRAN使用）

図10　軌道上実証評価

６．今後の展望

薄膜太陽電池パドルの機能・性能について、スケールモデルのTMSAPにより軌道上実証ができたことから、今後は様々な衛星への搭載を計画している。特に、深宇宙探査では太陽から離れることで発生電力が低下することや、衛星ペイロード比率向上が求められるため、軽量で大電力の薄膜太陽電池パドルはとても有効である。[4]

様々な衛星に対応するため薄膜太陽電池パドルは図11のような高い拡張性を有している。パネルサイズとパネル枚数の構成を変えることで、10kW/1翼まで対応可能である。

(a)0.2kW級/1翼　(b)2kW級/1翼　(c)10kW級/1翼

図11　薄膜太陽電池パドルの拡張性

７．まとめ

従来の太陽電池パドル構造設計の発想から脱し、大幅な軽量化を実現した薄膜太陽電池パドルの軌道上実証機であるTMSAPの設計について報告をした。TMSAPは2019年2月軌道上で展開実証を成功裏に完了することができた。TMSAPにより軌道上実績を得られたことで、今後、薄膜太陽電池パドルの深宇宙探査機など様々な衛星への適用を計画している。

参考文献

[1] T.Sumita, et al., “Development of Inverted Metamorphic Triple Junction Solar Cell at JAXA for Space Use”, Proc. The 6th World Conference on Photovoltaic Energy conversion(WCPEC-6), 5TuO9.1, 2014

[2] 住田泰史，柴田優一，中村徹哉，今泉充, “150W/kg 軽量太陽電池パドル機構の軌道上展開実証“, 第60回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4612, (2016)

[3] 中村 徹哉, 柴田 優一, 住田 泰史, 今泉 充, 豊田 裕之, 川勝 康弘, “高効率薄膜太陽電池アレイシートを用いた軽量パドル”, 第60回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4220, (2016)

[4] 高島健，西山和孝，豊田裕之，山本高行，佐藤峻介，川勝康弘，荒井朋子，DESTINY+所内準備チーム, “深宇宙探査技術実証機DESTINY+”, 第62回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4030, (2018)