3A10　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軌道上展開実証と展開挙動

○内田英樹，住田泰史，今泉 充，塩見 裕，岡本 篤，筒井雄樹，鷲谷正史（JAXA）
小林拓郎，金子直之（NEC），中尾哲也（AES）

On-orbit Demonstration and Behavior of Deployment of Thin Membrane Solar Array Paddle (TMSAP) on RAPid Innovative payload demonstration Satellite-1(RAPIS-1)

Hideki Uchida, Taishi Sumita, Mitsuru Imaizumi, Hiroshi Shiomi, Atsushi Okamoto, Yuki Tsutsui, Masahito Washiya (JAXA)
Takuro Kobayashi, Naoyuki Kanko (NEC) and Tetsuya Nakao (AES)

Key Words: Spacecraft, Solar Array Paddle, Deployable Structure

Abstract

Thin Membrane Solar Array Paddle (TMSAP) was developed by unique structural and mechanical design as a scale model of a light-weight and high-power paddle with thin-film triple junction solar cells. TMSAP was mounted on RAPid Innovative payload demonstration Satellite-1(RAPIS-1) launched in January, 2019, and on-orbit deployable experiment was demonstrated successfully. This paper describes an overview of the experiment and dynamical behavior on deployment.

１．はじめに

JAXAの革新的衛星技術実証プログラム1号機の実証テーマの一つである軽量太陽電池パドル(Thin Membrane Solar Array Paddle: TMSAP)を搭載した小型実証衛星1号機(RAPid Innovative payload demonstration Satellite-1: RAPIS-1)は, 2019年1月にイプシロンロケット4号機で打ち上げられ, 翌月には軌道上展開実証が成功裏に完了した.

TMSAPは, 従来の太陽電池パドルの開発思想から脱却した新規設計の構造･機構が適用された2次元展開を行う太陽電池パドルである．本稿では，この軌道上展開実証の概要とテレメトリデータから推定した軌道上における固有振動数と減衰比およびカメラの動画像を用いて解析した展開時の機構の運動について報告する.

２．展開実証計画

TMSAPは，出力質量比150W/kgの高出力の性能を有する軽量太陽電池パドルシステムのスケールモデルとして開発され[1]，JAXAとSHARPが共同開発した薄膜3接合太陽電池アレイシートを一部に搭載している.

TMSAPでは, 2次元展開に必要な4種類の新規機構の性能検証を行うために必要最小限の5枚パネル構成とした. また, 新規のディレイ機構を採用することで，メインパネル展開の後にサイドネル展開の動作に移るように展開方向を設計し，地上で検証可能な範囲を明確にしている[2]．また，従来のマイクロスイッチに代わる展開モニタ機能を有する小型の機構を新規に開発した．さらには，衛星を非制御にしてTMSAPを展開することで, 衛星本体のジャイロの変動値から展開時の挙動を評価する計画とし，加速度計は搭載による展開時剛性低下やセンサケーブルのヒンジ部の引き回しによる展開の阻害を懸念して非搭載とした.

また，RAPIS-1本体には部品の実証テーマをJAXAがコーディネートした「展開確認用モニタカメラ」(CaMera for Deployment monitor no.2: CMRD2)[3]が図1のように搭載されており，TMSAPの展開の様子を撮影することもできるので，この動画撮影機能を利用してTMSAPの軌道上での動特性を評価する方法も検討された．その一案として，レンチキュラーレンズを付属する平面型視覚マーカ[4]をTMSAPに取り付けて，モーションキャプチャ技術による展開時の運動や残留振動の計測を試みることとし, 2018年4月から株式会社フォトロンが製品名「6D-MARKER Analyst™」[5]として販売を開始していた民生品マーカと専用解析ソフトウェアを利用する計画とした.

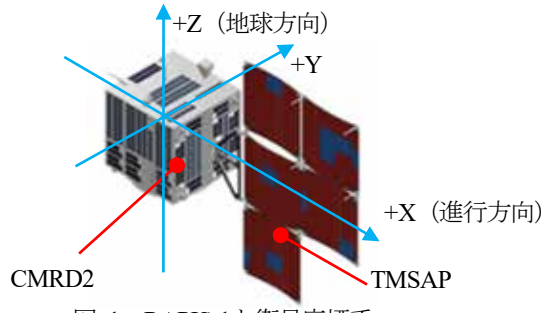

図 1　RAPIS-1と衛星座標系

３．地上試験

３－１　地上展開試験・撮影実験

軌道上での展開実証に当たり，地上試験としてサイドパネル展開方向とメインパネル方向の展開試験を行った.

サイドパネル展開方向の試験では，パネル底面を空気浮上式パッドで支持し，パッドを定盤上で浮かせて運動方向に滑らせることで重力補償をした展開試験を行った(図

ⓒ日本航空宇宙学会

2(a)). メインパネル展開方向の試験では，摩擦の小さいガイドレールからパネルを吊ることで重力補償をした展開試験を行った(図2(b)).

マーカの撮影に関し，予めTMSAP原寸大図面とCMRD2地上予備品(FM品同等)を用いてマーカの認識範囲の目途を得ておき，メインパネル展開試験時にマーカを仮留めして実際の展開時の見え方を確認した上で，計測可能なTMSAP上のマーカの設置場所をヨーク部に特定した.

(a) サイドパネル展開　(b) メインパネル展開

図 2 地上展開試験

３－２ マーカ単体の環境試験

JAXAでは平面型視覚マーカをランデブードッキング用およびロボット作業用のターゲットマーカとして利用する研究を実施しており，国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」で2015年から1年間の暴露実験を行っている[6]. この実験の成果によると，TMSAPが打ち上げから展開までに宇宙空間で暴露される数週間ではAOやUVによるマーカの輝度や材料の劣化の影響は小さいことが分かった. 次に，マーカ単体のアウトガス試験と，TMSAP搭載状態を模擬したサンプルで熱サイクル試験を実施し，搭載にあたり問題が無いことが確認できたので，図3にようにヨーク部にマーカを3個設置した.

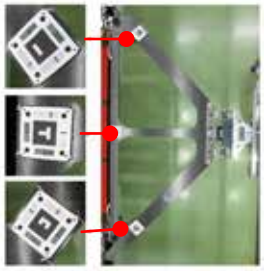

図 3 ヨーク部に設置したマーカ

４．軌道上実証

４－１ 展開時姿勢角変動と展開画像

軌道上のTMSAP展開開始前に衛星を非制御とし，展開開始から制御再開までのジャイロのテレメトリデータを取得した. 展開は開始から22秒で完了し，図1の衛星座標系の地球方向Z軸回りの運動が支配的であった. 展開開始(t=0sec)からt=40secまでの角速度3成分の時間履歴を図4に示す.

４－２ 固有振動数と減衰比の推移

展開完了直前のt=20secから制御再開直前のt=120secまでのZ軸回り成分を図5に示す. 同図からは一見して振動が減衰して静定しているように見えるが，ピーク値の対数表示した図6から，①t=20～30sec，②t=30～80sec，③t=80～120secでそれぞれ異なる現象であることがうかがえる. また，隣り合うピーク値での時間差から算出した振動数の履歴を図7に示す. すると，①では展開が完了してから固有振動数が上昇しつつ，その間は減衰係数に相当する曲線の傾きが大きいため，機構部分が動摩擦で摺動している状態と推測できる. ②では固有振動数が多少はばらついているが，減衰係数は比較的一定値であるので，静摩擦の領域に推移したと考えられる. そして，②までの過渡応答が③では収まり残留した定常応答の成分が持続振動として見え，図7からは2Hz程の2次の振動モードの励起もうかがえる.

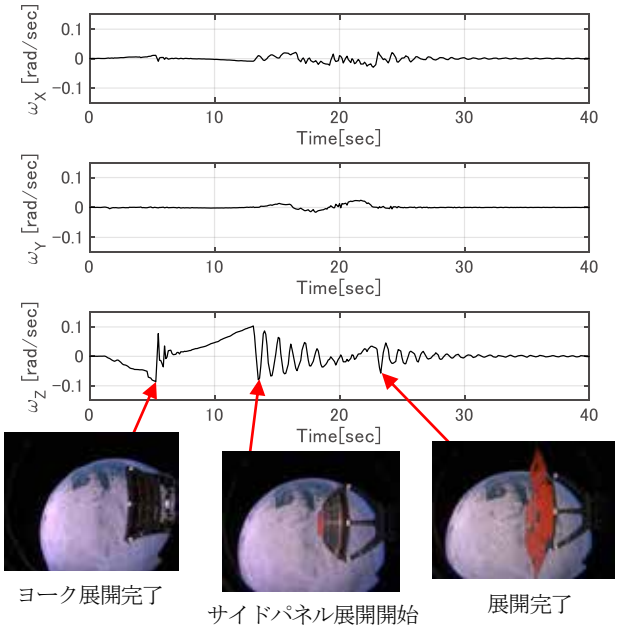

図 4 展開開始からの衛星角速度の時刻歴と画像

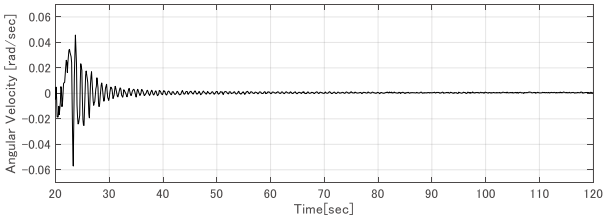

図 5 展開完了直前から制御再開直前までの時刻歴

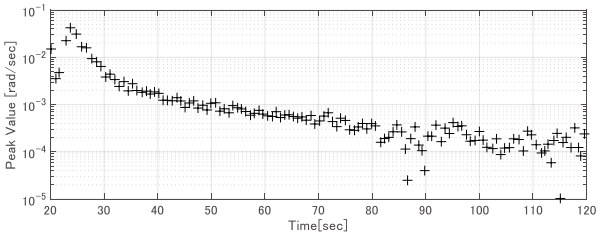

図 6 自由減衰波形のエンベロープの対数値

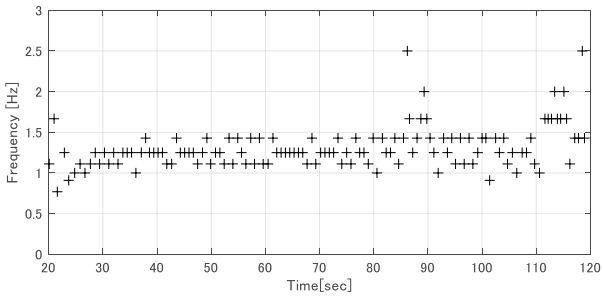

図 7 固有振動数の推移

そこで，②では自由減衰波形から対数減衰率法を用い，③では常時微振動解析で使用されているRandom Decrement (RD)法[7]を用いてそれぞれモード減衰比を算出した．表1に取得した減衰比のサマリと，過去の軌道上実験で推定された減衰比を合わせて示す．すると，概してRAPIS-1/TMSAPでは減衰比が大きい結果が得られていることが分かる．なお，表1の過去の衛星はRAPIS-1に比べて大型でかつパドルにはワイヤリンク型の従来型の同期機構[2]とダンパーが付けられており，加振方法は同じインパルス加振法である．

表1 軌道上同定した衛星のモード減衰比[8,9,10]

衛星	数値[%]	振動モードと固有振動数
RAPIS-1	4.7	①面外曲げ1次モード(0.9～1.2Hz)
/TMSAP	0.81	②面外曲げ1次モード(1～1.5Hz)
	0.95	③面外曲げ1次モード(1.2Hz)
	/ 2.0	/ 面外曲げ2次モード(2.2Hz)
きく6号	0.73	面外曲げ1次モード(0.0921Hz)
きく8号	0.511	面外曲げ1次モード(0.0789Hz)
いぶき1号	2.1	面外曲げ1次モード(0.215Hz)

４－３ マーカを用いた運動解析

CMRD2を用いて取得した展開時動画像の解析にあたり，チェッカーボードを用いて図8のようにCMRD2地上予備品のキャリブレーションを行い，ソフトウェア6D-MARKER Analyst™により展開の運動の軌跡を求めた．

マーカを用いて取得したヨーク部の回転角の時間履歴と設計で使用した機構解析ソフトウェアLMS Virtual.Lab Motionによる解析の結果を図9にそれぞれ示す．なお，6D-MARKER Analyst™による画像解析に要する解像度等の制約により，時間履歴はヨークの展開完了までとなっている．

TMSAPの設計ではヨークの展開終了の直前で速度が減速し，大きな衝撃を与えることなく展開が完了するように設計しているが，図9からt=4secから減速していることが分かるので，展開トルクの設計の妥当性が確認できた．

５．まとめ

TMSAPの軌道上展開実証において取得した非制御時の衛星本体の姿勢角変動値を用いて，軌道上展開時の固有振動数と減衰比について考察した．その結果，TMSAPは従来衛星相当よりも大きな減衰比を有することが分かった．また，展開時に撮影した動画像を用いて，平面視覚マーカによるヨーク部の運動を解析したところ，展開トルクが設計通りであったことが確認できた．

謝辞

平面視覚マーカを用いた画像計測について貴重な助言を頂いた国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人間拡張研究センター田中秀幸氏，株式会社フォトロン桑原譲二氏に感謝いたします．

図 8 CMRD2地上予備品を用いたキャリブレーション

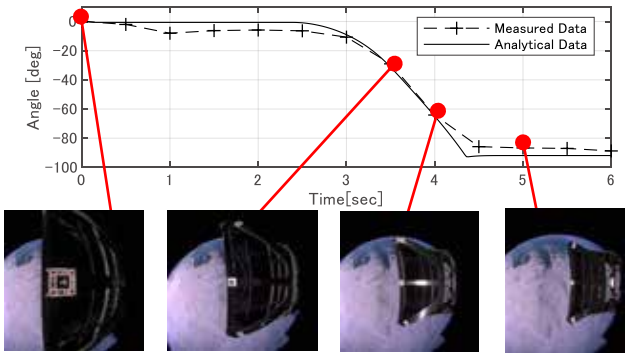

図 9 ヨーク部の展開角度の時間履歴

参考文献

[1] 住田他，“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.

[2] 小林他 “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”，第61回構造強度に関する講演会講演集，長野，2019.

[3] 鷲谷他，“JAXAコーディネート~革新的FPGA軌道上実証機器開発~”，第61回宇宙科学技術連合講演会講演集，JSASS-2017-4499, 2017.

[4] 田中他,”正面からの観測でも高精度な姿勢推定が可能なARマーカ”，情報処理学会研究報告, Vol.2012-CG-147, No.3, 2012.

[5] 簡易モーションキャプチャシステム6D-MARKER Analyst™ 販売プレスリリース：https://www.photron.co.jp/news/lekbq90000002ngi-att/p180419_1.pdf (2019年5月アクセス).

[6] 上田他，“高精度平面ターゲットマーカArrayMarkの軌道上実験結果”，第61回宇宙科学技術連合講演会講演集，JSASS-2017-4399, 2017.

[7] Ibrahim, S. R., “Random Decrement Technique for Modal Identification of Structures”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 14, pp. 696-700, 1977.

[8] 山口他,“ETS－VIによる軌道上同定実験（第１報：インパルス加振）”,日本機械学会論文集（C編）, Vol.62, 1996.

[9] ETS-VIII軌道上実験チーム,”柔構造特性の同定方法及び制御に関する研究”，宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-007, 1-76, 2004-12.

[10] Baddour, N., “Recent Advances in Vibrations Analysis”, Chapter 7, “Measurement of Satellite Solar Array Panel Vibrations Caused by Thermal Snap and Gas Jet Thruster Firing”, InTech, 2011.