

深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺用薄膜軽量太陽電池パドルへの デブリ衝突の影響評価（その2）

豊田裕之，中村徹哉，住田泰史，金谷周朔，奥村哲平，西山和孝，高島健（宇宙航空研究開発機構）
奥平修，平井隆之（千葉工業大学）

Evaluation of debris collision impact on lightweight solar paddle using thin-film solar cells for DESTINY⁺ - Part 2 -

Hiroyuki Toyota, Tetsuya Nakamura, Taishi Sumita, Shusaku Kanaya, Teppei Okumura, Kazutaka Nishiyama,
Takeshi Takashima (Japan Aerospace Exploration Agency)
Osamu Okudaira, Takayuki Hirai (Chiba Institute of Technology)

Key Words: Lightweight solar array paddle, DESTINY⁺, Micrometeoroid, Debris

Abstract

New type lightweight solar array paddle using thin-film solar cells is being developed for DESTINY⁺. It is necessary to evaluate the debris collision impact on the new type solar cell paddle for sizing it. In this paper, we report the effect of debris collision impact on thin-film solar cells, especially the range of kinetic energy that causes short circuit failure.

1. 目的および背景

1.1. DESTINY⁺ミッション

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所は、理工一体の深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLYby and dUst Science) を計画しており¹⁾、2020年4月現在は概念設計を行っている。

工学面では、将来の低コスト・高頻度な深宇宙探査を実現するための新しい工学技術の軌道上実証を掲げる。大型ロケットにより惑星間空間に直接送り込まれてきた従来の深宇宙探査機に対し、DESTINY⁺探査機は小型のイプシロンロケットにより地球周回軌道に打ち上げられ、探査機に搭載された電気推進器により加速して軌道高度を上げ、月スイングバイにより自力で惑星間空間に至る。電気推進器は比推力の面で優れる一方、イオン化した推進薬を高電界で加速するための大電力を必要とする。DESTINY⁺探査機は4台の $\mu 10$ イオンエンジンを同時運転するために、ミッション初期で4kW以上の発電能力を持つ太陽電池パドル (Solar Array Paddle; SAP) を搭載する。

1.2. 薄膜軽量太陽電池パドル

太陽電池パドルの出力密度比較を図1に示す。従来型SAPの出力密度は平均して50W/kg程度であり、出力4kWのSAPの質量は80kgに達する。これは探査機総重量480kgの17%程度を占めることになり、成立解を見出すことが難しい。そこでDESTINY⁺は、JAXA 研究開発部門がシャープ株式会社ならびに日本電気株式会社と共に開発してきた薄膜軽量SAP²⁾³⁾を搭載し、フル機能のバス機器として初めて採用する。薄膜軽量SAPはDESTINY⁺搭載形態で約100W/kg、より大型の静止衛星向けパドルでは150W/kg以上の高い出力密度を実現する。これにより、DESTINY⁺では従来型SAPのおおよそ半分にまで軽

量化を実現し、設計の成立解を見出すことができた。

薄膜軽量SAPの構造を図2に示す。図2(a)薄膜3接合太陽電池セル⁴⁾は、厚み20 μ m以下の薄膜構造の中にInGaP, GaAs, InGaAsの3種類の太陽電池を積層し、30%以上の高効率を実現する。これを柔軟な炭素繊維強化プラスチック (CFRP) シート上に接着し、低エネルギー放射線を遮蔽するカバーガラスで覆ったものが図2(b)に示すガラスアレイシート⁵⁾である。ガラスアレイシートを曲面フレーム (図2(c)) に障子のように固定したものが太陽電池パネルとなる。フレームを曲面にすることで、構造重量を低く抑えながら剛性を高めることに成功した。複数のパネルをヒンジで結合して、軽量パドル (図2(d)) を構成する。

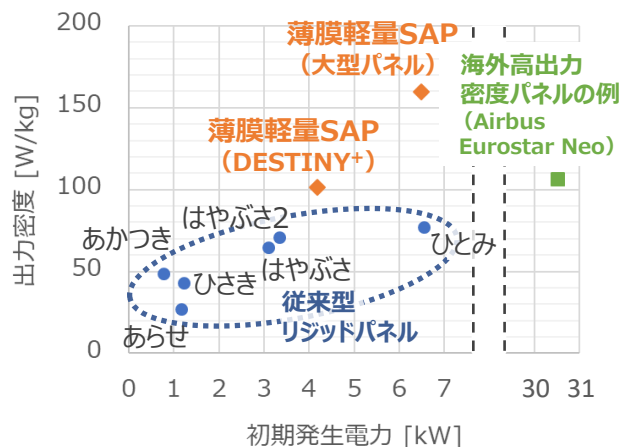


図1 太陽電池パドルの出力密度比較

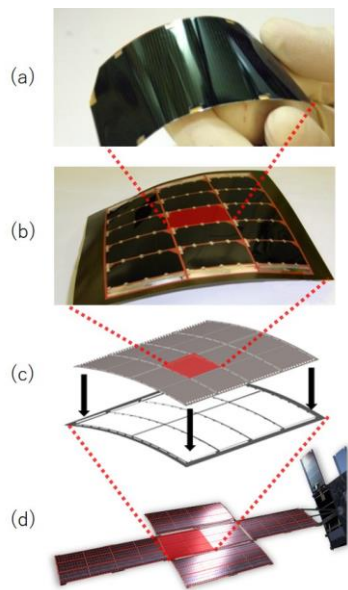


図 3 薄膜軽量太陽電池パドルの構造 (a) 薄膜 3 接合太陽電池セル, (b) ガラスアレイシート, (c) 曲面フレーム, (d) 軽量パドル

1.3. 実験的評価の必要性

宇宙機の太陽電池パドル (SAP) は太陽光エネルギーを効率的に吸収する必要がある。したがってマイクロメテオロイド・軌道上デブリ (Micrometeoroid, Orbital Debris, MMOD) 対策としてアルミニウム等の太陽光を透過しない防護材を備えることはできず、積極的な MMOD 対策は取らずに、想定される電力喪失を考慮して SAP のサイジングを行うことが一般的である。従来型 SAP に関する MMOD 衝突の影響と設計指針は、JAXA の設計・運用マニュアル⁶⁾にまとめられ、概ね次のように記されている。

- 衝突によって太陽電池セルの発電能力が局所的に低下することがある。
- バイパスダイオード、冗長配線、ブリーダ抵抗を使用すれば、大規模な被害は発生しない。

しかし薄膜軽量 SAP の構造は従来型 SAP とは大きく異なり、中でも薄膜 3 接合太陽電池セルは、従来の宇宙用太陽電池と比較して厚みが 7 分の 1 以下の $20\ \mu\text{m}$ 以下と極めて薄く、MMOD 衝突時に受光面の楕形電極と裏面電極が物理的に接触し短絡が発生することが懸念される。したがって、超高速衝突実験によってガラスアレイシートに対する MMOD 衝突の影響を実験的に評価することは、探査機設計のために極めて重要である。

1.4. 2018 年度の超高速衝突実験の成果と 2019 年度の狙い

上述の背景から、筆者らは 2018 年度よりガラスアレイシートに対する超高速衝突実験を開始し、MMOD 衝突の影響評価を行ってきた。主だった成果は以下の通りである。⁷⁾

- MMOD 衝突がガラスアレイシートに及ぼす影響は多くの場合において軽微であり、発電性能の低下は従来型 SAP と同様に整理できる。
- ただし、次の二つのケースにおいて、短絡故障モードが識別された。

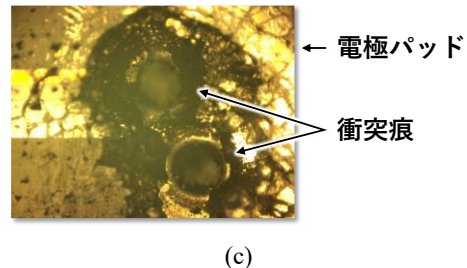
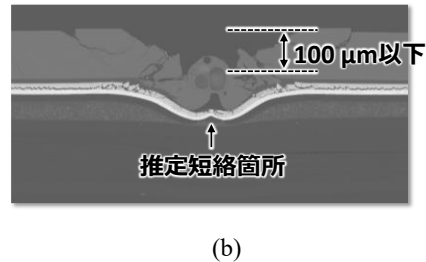
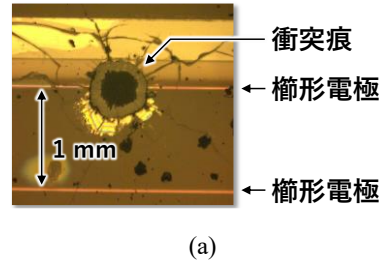


図 2 2018 年度の超高速衝突実験でガラスアレイシートに発生した短絡故障箇所 (a) 短絡モード 1 の衝突痕の顕微鏡写真 (b) 短絡モード 1 の衝突痕の断面 SEM 画像 (c) 短絡モード 2 の衝突痕の顕微鏡写真

短絡モード 1: 受光面の楕形電極に衝突した衝突体が、太陽電池セル内部に留まるケース (図 3 (a), (b)). 粒径 $80\ \mu\text{m}$ のソーダ石灰ガラスが速度 $6\ \text{km/s}$ で衝突した際に、9 回中 3 回発生した。

短絡モード 2: 受光面の n 極パッド上に溶接されたインターコネクタに衝突した衝突体が、太陽電池セルを貫通するケース (図 3 (c)). 粒径 $200\ \mu\text{m}$ のソーダ石灰ガラスが速度 $6\ \text{km/s}$ で衝突した際に、2 回中 1 回発生した。

ただし、散弾打ちのため、ショット 1 回あたりの衝突数は数十個程度で、1 回の衝突あたりの短絡発生確率は上記の数十分の一になる。

ガラスアレイシートにおいて短絡故障が発生し得ることは、設計上注意を要する知見である。そこで 2019 年度には短絡故障の発生条件をより詳細に把握し、これを一般化して宇宙機の設計に資する知見を得ることを目的とした。そのために、衝突体の運動エネルギーをパラメータとして整理を行った。

2. 実験方法

2018 年度に引き続き、宇宙科学研究所の 2 段式軽ガス銃を用いて超高速衝突実験を行った。被衝突体は $100\ \mu\text{m}$ 厚のカバーガラスを有するガラスアレイシートを、衝突体はソーダ石灰ガラス粒子の散弾打ちを用いた。

2018 年度に識別された「短絡モード 1」を引き起こす運動エネルギー範囲の絞り込みを狙い、これを

発生させた条件である衝突体粒径 80 μm 、衝突速度 6 km/s を中心として、衝突体の制御速度を 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 km/s、粒径を 50, 80, 100 μm と変化させ、衝突実験を行った。各ケースの運動エネルギーを表 1 に示す。運動エネルギーの算出にあたっては、衝突体であるソーダ石灰ガラスの密度を 2.5 g/cm^3 と仮定した。

太陽電池セルの発電状態を模擬するため順方向に通電し、発電による電位差発生を模擬するために CFRP シートに対して +100 V にバイアスした状態で、受光面に対し衝突させた。衝突の影響評価は、光照射時の電流電圧特性 (LIV)、エレクトロルミネッセンス (EL) 像、顕微鏡写真、サーモグラフィで行った。

表 1 2019 年度の超高速衝突実験に使用した衝突体 (ソーダ石灰ガラス) の運動エネルギー

		衝突体粒径 [μm]		
		50	80	100
衝突速度 [km/s]	5.0		8.38E-03	
	5.5		1.01E-02	
	6.0	2.95E-03	1.21E-02	2.36E-02
	6.5		1.42E-02	
	7.0		1.64E-02	

(単位 : J)

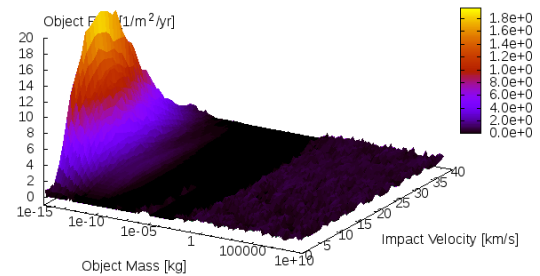
3. 実験結果と考察

実験の結果、太陽電池セルの短絡故障は、衝突体粒径 80 μm 、衝突体速度 6.0 km/s の場合にのみ発生し、それ以外のケースでは発生しなかった。この実験結果に 2018 年度の知見をあわせて考慮し、短絡故障を引き起こす運動エネルギーの範囲を次のように推定した。

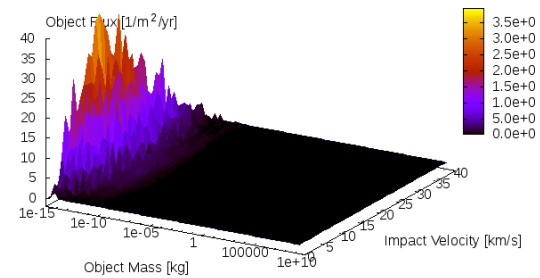
- 短絡モード 1 : 1.01E-2 ~ 2.36E-2 [J]
(80 μm , 5.5 km/s ~ 80 μm , 6.5 km/s 相当)
- 短絡モード 2 : 1.88E-1 [J] 以上
(200 μm , 6.0 km/s 相当以上)

得られた実験結果を DESTINY+ 探査機の SAP サイジングに取り込むため、想定する飛翔環境の MMOD 環境を数値解析により求めた。DESTINY+ 探査機の飛翔する軌道と解析条件を表 2 に、解析結果を図 4 に示す。この解析結果から、3 項に述べた短絡故障を引

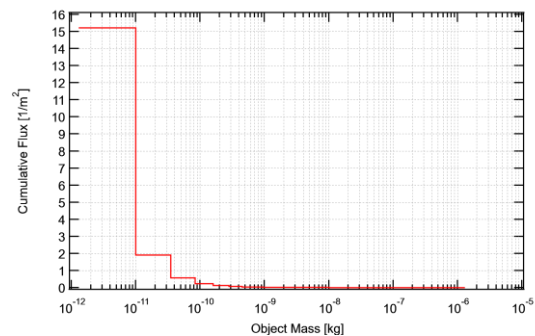
き起こす MMOD の個数を導くため、運動エネルギーに対して整理を行ったものが図 5 である。Phaethon フライバイフェーズの MMOD 衝突速度は、相対フライバイ速度の 33 km/s とした。短絡モード 1 および 2



(a)



(b)



(c)

図 4 DESTINY+ 探査機で想定される MMOD 環境 (a) スパイラル軌道上昇フェーズ (b) 月スイングバイ～惑星間航行フェーズ (c) 小惑星 Phaethon フライバイフェーズ

表 2 DESTINY+ 探査機の飛翔する軌道と解析条件

フェーズ	期間	軌道	解析ツール	MMOD モデル	MMOD サイズ
スパイラル軌道 上昇	500 日	地球周回軌道, 初期高度 230km \times 37000km から 徐々に上昇し 12 万 km \times 30 万 km に到達	MASTER-8	Debris: 2023/9 ~ 2025/2 の Condensed データ (軌道 高度 186 ~ 36,786 km) Meteoroid: Grün background model (Taylor velocity distribution) (軌道高度 < 500,000 km)	直径: 10^{-6} ~ 10^2 m 質量: 10^{-15} ~ 10^5 kg
月スイングバイ ～惑星間航行	1097 日	太陽公転軌道 (太陽距離 1 AU)		Meteoroid: Grün background model (Taylor velocity distribution)	
小惑星 Phaethon フライ バイ	-	小惑星 Phaethon を最接近距離 350 km, 相対速 度 33 km/s でフ ライバイ	千葉工業大学によるダスト放出モデル		直径: 10^{-5} ~ 10^{-3} m

を引き起こすエネルギー範囲を、それぞれ橙と桃色で示した。このフラックスに太陽電池セルの電極面積を掛け合わせ、各モードの短絡発生確率を表3に示すとおりに求めた。DESTINY+探査機に搭載する太陽電池セル数は未確定であるものの3600枚程度になる見込みで、その場合には短絡モード1は13セル、短絡モード2は1セル発生する計算となる。一般的に、短絡する太陽電池の回路内の場所によっては、発生電力が列単位で失われる可能性があるため、設計への取り込みにあたっては注意を要する。

4. まとめと今後の課題

DESTINY+で採用する薄膜軽量SAPへの微小粒子衝突の影響を評価するため、2018年度の研究で識別

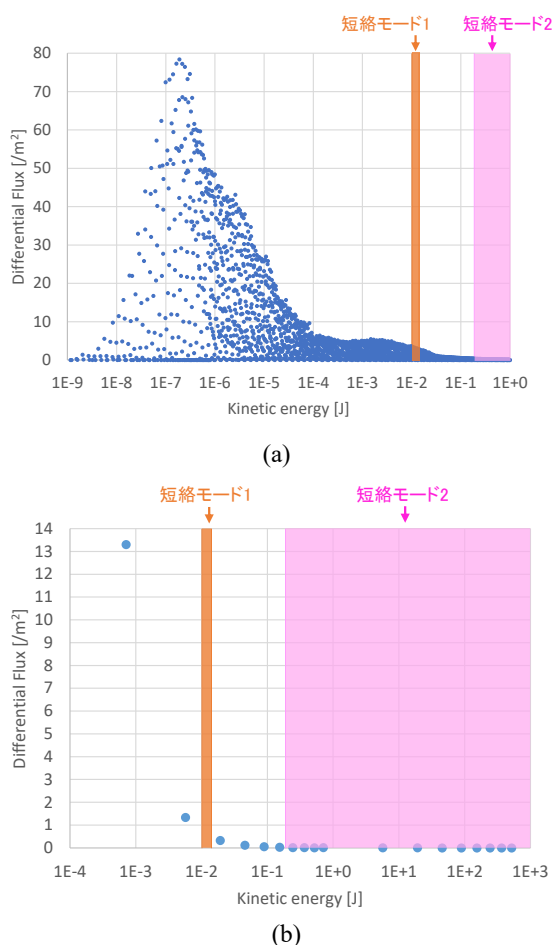


図5 MMODフラックスの運動エネルギー分布と短絡故障を引き起こす運動エネルギー範囲 (a) スパイラル軌道上昇フェーズ～月スイングバイ～惑星間フェーズ (b) Phaethonフライバイフェーズ

表3 全ミッション期間の短絡を引き起こし得るMMODフラックスと短絡セル数割合の推算結果

	合計フラックス	電極面積 (セルあたり)	短絡セル数 割合
短絡モード1	64.3 /m ²	0.57 cm ²	0.37 %
短絡モード2	31.9 /m ²	0.11 cm ²	0.04 %

した2つの短絡モードについて、運動エネルギーによる整理を行い、発生確率の推定を試みた。いずれも1%未満の低い値ではあるが、太陽電池セルの短絡は列単位の電力喪失につながりかねないため、慎重な設計への取り込みが必要である。

今後はサンプル構造を変化させた実験により、短絡メカニズムを解明し、発生確率推定精度の向上や、短絡防止策の検討を行う。

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日本電気株式会社の関係各位に感謝致します。また本試験実施にあたり、ご協力頂いた長谷川直様をはじめとするISAS大学共同利用実験調整グループの関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 高島健, 西山和孝, 豊田裕之, 山本高行, 餅原義孝, 佐藤峻介, 川勝康弘, 荒井朋子, DESTINY+準備チーム, 第20回宇宙科学シンポジウム, S1-003.
- 2) 中村徹哉, 柴田優一, 住田泰史, 今泉充, 豊田裕之, 川勝康弘:「DESTINY用薄膜軽量太陽電池パドルの開発」, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2D06.
- 3) 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会, 4F08.
- 4) T. Takamoto, T. Agui, A. Yoshida, K. Nakaido, H. Juso, K. Sasaki, K. Nakamura, H. Yamaguchi, T. Kodama, H. Washio, M. Imaizumi, and M. Takahashi, “World’s Highest Efficiency Triple-junction Solar Cells Fabricated by Inverted Layers Transfer Process”, Proc. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaii U.S.A., 2010, pp.412-417.
- 5) H. Yamaguchi, R. Ijichi, Y. Suzuki, S. Ooka, K. Shimada, N. Takahashi, H. Washio, K. Nakamura, T. Takamoto, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Shimazaki, T. Nakamura, T. Ohshima, “Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple-junction Cells”, Proc. 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015, pp.1-5.
- 6) スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル JERG-0-002-HB001.
- 7) 中村徹哉, 豊田裕之, 平井隆之, 金谷周朔, 西山和孝, 高島健:「深宇宙探査技術実証機 DESTINY+用薄膜軽量太陽電池パドルへのデブリ衝突の影響評価」, 平成30年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム