

宇宙用太陽電池の現状と今後の展望

Present and future of space solar cells in Japan

中村 徹哉*

Tetsuya Nakamura

Abstract

This article introduces newly developed thin-film triple-junction solar cells with excellent specific power, which have been adopted in Japan Aerospace Exploration Agency's projects such as "SLIM", "DESTINY+", and "MMX", and research trends in next-generation space solar cells.

Key words : Space solar cells, Thin-film triple-junction solar cells, SLIM project

1 はじめに

2024年1月20日、日本は月への軟着陸を実現した世界で5か国目の国となった。本稿では、この成功を支えた一コンポーネントである宇宙用太陽電池にフォーカスしたい。着陸に成功したのは宇宙航空研究開発機構（JAXA）による小型月着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon)¹ である。SLIM はその名の通り月着陸に特化した実証機であり、質量のほとんどが着陸に必要な燃料で、それ以外の構造系や搭載コンポーネント等ほとんかく軽量となるようチャレンジングな設計がなされた。電源である太陽電池も例外ではなく、SLIM では新開発の高効率で軽量

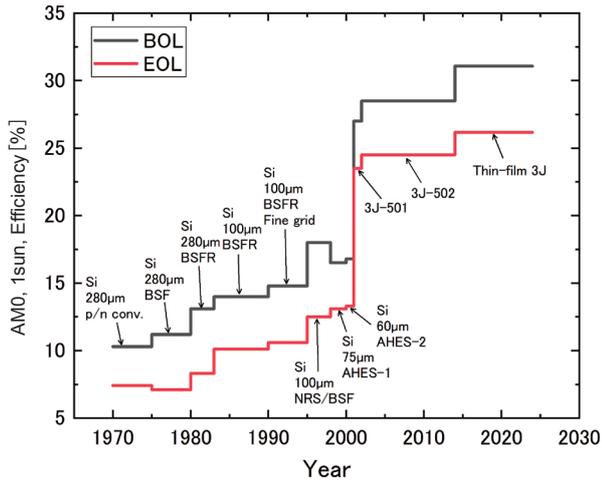
な薄膜3接合太陽電池^{2,3}が採用された。薄膜3接合太陽電池は、小型軽量の指標となる太陽電池一枚当たりの出力質量比において、従来型の3接合太陽電池と比べ5倍以上の性能を有しており、SLIM 軽量化に大きく貢献した。本紙では、SLIM に搭載された薄膜3接合太陽電池を中心に、宇宙用太陽電池の現状と今後の展望について述べる。

2 宇宙用太陽電池

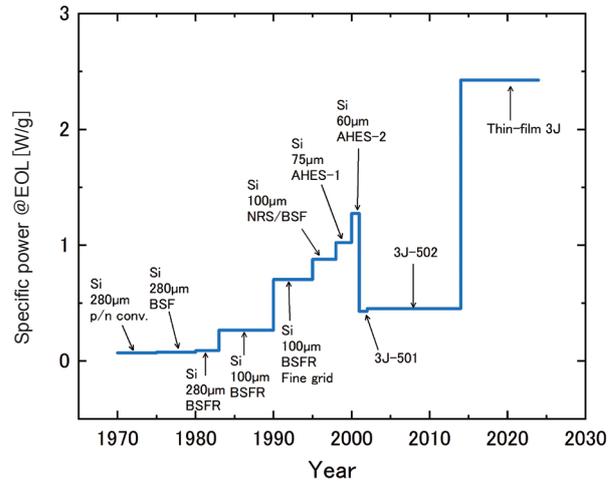
図1は日本の宇宙用太陽電池の(a)変換効率と、(b)太陽電池1枚当たりの出力質量比の変遷を示している。太陽電池は太陽光を電力に変換する受動的な素子であるがゆえ、求められる性能要求はほぼこの2点に集約される。ただし、宇宙用の場合、初期値ではなく、宇宙空間に存在する高エネルギー放射線による劣化を考慮したミッション末期時の値（初期値と予測放射線劣化率を掛け合わせた値）が重要となる。日本の宇宙用太陽電池の開発の歴史は1960年代にSi太陽電池から始まった⁴。層構造の工夫、発電層の高品質化、薄膜化、反射防止技術の向上、電極構造の工夫

* 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
Research and Development Directorate
Research Unit I
主任研究開発員
Associate Senior Researcher



(a) 地球近傍のエアマスゼロ太陽光下における変換効率 (BOL: Beginning of life, EOL: End of life)



(b) 寿命末期における太陽電池1枚当たりの出力質量比

図1 日本の宇宙用太陽電池の変換効率と出力質量比の変遷

などによって、Si 太陽電池は初期効率および放射線耐性の向上、そして寿命末期時における出力質量比の向上を実現してきた。その後、2000年頃に III-V 族化合物半導体を用いた 3 接合太陽電池 (InGaP/GaAs/Ge) が登場し、宇宙用太陽電池の主流は Si 太陽電池から 3 接合太陽電池に変わった。薄膜結晶成長技術によって異なるバンドギャップの太陽電池を積層した多接合太陽電池の設計・製造が可能となり、単一材料の太陽電池を凌駕する高効率を実現されたためである。現在では、日本の人工衛星のほとんどは 3 接合太陽電池を搭載している。直接遷移半導体である InGaP や GaAs の吸収係数は間接遷移半導体である Si に比べ大きく、各太陽電池層は数 μm もあれば十分な太陽光吸収ができるため、発電に寄与している層の質量のみを考えれば 3 接合太陽電池の出力質量比は高い。しかし、実際の 3 接合太陽電池では、結晶成長に必要な結晶基板が厚いため、出力質量比が Si 太陽電池より小さくなった点が課題であった。

3 薄膜 3 接合太陽電池の研究開発

シャープ株式会社 (以降、シャープ) と JAXA は、寿命末期時の変換効率だけでなく、出力質量比においても世界最高水準を実現すべく、2005 年頃から発電に寄与しない基板を除去した基板レスの薄膜多接合太陽電池の研究開発に着手した。

まず、InGaP (~1.9eV)/GaAs (~1.4eV)/Ge (~0.7eV) 型の 3 接合太陽電池よりも更に初期変換効率を高めるた

め、3 接合太陽電池の構成材料を変更した²。3 接合太陽電池は 3 つの太陽電池 (サブセル) が直列に接続されているため、図 2 に示す通り、3 接合太陽電池の電圧は各サブセルの電圧の和として得られる。一方で、電流は最も発生電流が少ないサブセルで律速される。Ge ボトム太陽電池の発生電流は大きい、最も発生電流が小さい InGaP トップ太陽電池で出力が制限されるため、Ge と InGaP 太陽電池の発生電流の差分は損失となる。そこで新型の薄膜 3 接合太陽電池ではこの電流損失を低減するため、ボトム太陽電池の材料をよりバンドギャップの広い InGaAs (~1.0 eV) に変更して発生電流を他の 2 つのサブセルに近づける工夫をした。バンドギャップを広げることで電圧は向上するが、電流は変わらず InGaP で制限されるため、電圧向上分だけ出力が向上した。ただし InGaAs は InGaP および GaAs と格子定数が 2% 程度異なるため、そのまま結晶成長をすると高品質な光吸収層が得られない。そこで、格子不整合緩衝層を設け、高品質な InGaAs 光吸収層を得た²。また、通常は受光面を最後に結晶成長させるが、薄膜 3 接合太陽電池では、逆方向に結晶成長、つまり格子不整合の InGaAs を最後に成長させることで、InGaP や GaAs への格子不整合の影響を抑制した。

次に放射線耐性について述べる。高エネルギー放射線が太陽電池に入射すると、はじき出し損傷によって結晶内に欠陥 (以降、放射線欠陥) が形成される。太陽電池作製時に形成される初期欠陥同様、放射線欠陥は太陽電池の性能を低下させる場合がある。放射線欠

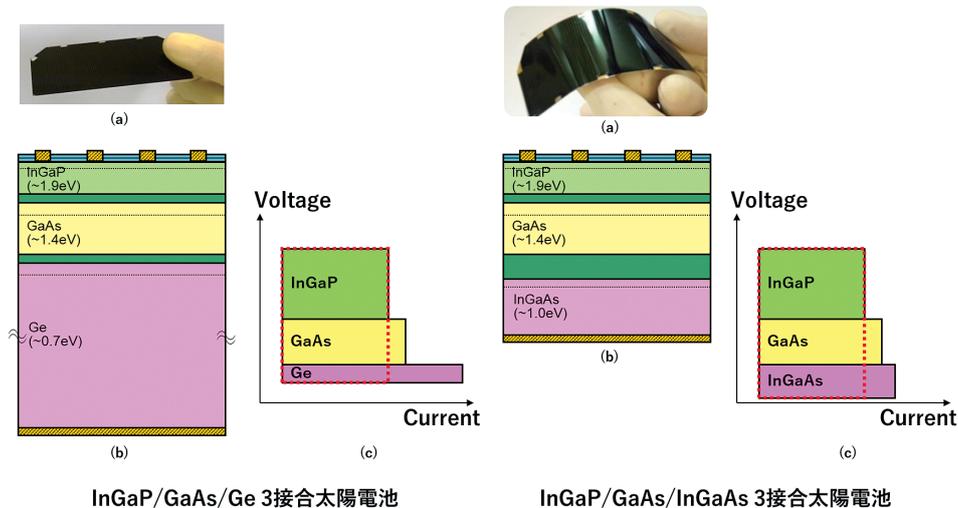


図2 従来型3接合太陽電池 (InGaP/GaAs/Ge) と薄膜3接合太陽電池 (InGaP/GaAs/InGaAs) の (a) 外観写真, (b) 断面模式図, (c) 出力イメージ (赤枠が最大出力電力)

陥の種類や放射線欠陥の太陽電池性能への影響等は材料に大きく依存するが、同じ特性の放射線欠陥が異なる材料内に形成された場合、その影響は一般的にバンドギャップが狭い太陽電池の方が大きい⁵。したがって、固有の放射線欠陥等の影響を除けば、薄膜3接合太陽電池では、InGaP > GaAs > InGaAsの順番で放射線耐性が高いことが予想される。実際、実験でもそのような傾向が確認されている⁶。したがって、薄膜3接合太陽電池では、InGaP太陽電池が電流律速状態である限り、GaAsやInGaAs太陽電池における発生電流の劣化＝低下は見えないこととなる。逆に、GaAsやInGaAs太陽電池が電流律速になると顕著な劣化が表れるため、あらかじめ各サブセルの発生電流の放射線劣化を見込んで末期で電流整合するように、初期状態での発生電流のアンバランス化を図った。

薄膜3接合太陽電池は、発電に寄与しない結晶基板を除去することで大幅な軽量化を実現した。基板除去は軽量化の目的もあるが、実際は、逆成長した薄膜3接合太陽電池において基板除去は必要不可欠なプロセスである。前述の通り、多層薄膜成長により作製した薄膜3接合太陽電池ウエハの最表面のサブセルはInGaAsになっている。この状態ではInGaPとGaAsに光が届かないため、軽量化とは本質的に関係なく基板を除去してInGaP側から受光させる必要がある。基板を取り除くと太陽電池多層薄膜の厚さは数10 μm となり、フレキシブル性が得られる。そこで、

シャープとJAXAはこのフレキシブル性を活かし、太陽電池アレイを透明フィルムでラミネートしたフィルムアレイシートを開発した³ (図3)。従来の太陽電池パネルは厚い＝曲げられない太陽電池を強固なアルミハニカムパネルに接着剤で貼り付けているが、それを軽量のアレイシートに置き換えることで、太陽電池本体のみならずパネル全体の軽量化が可能となった。

以上の研究開発の成果により、薄膜3接合太陽電池は従来の3接合太陽電池と比べ、寿命末期時の高効率化と軽量化を同時に達成し、出力質量比は従来比5倍以上となった。この薄膜3接合太陽電池は、特に質量制約が厳しい探査機を中心に採用され始めている。

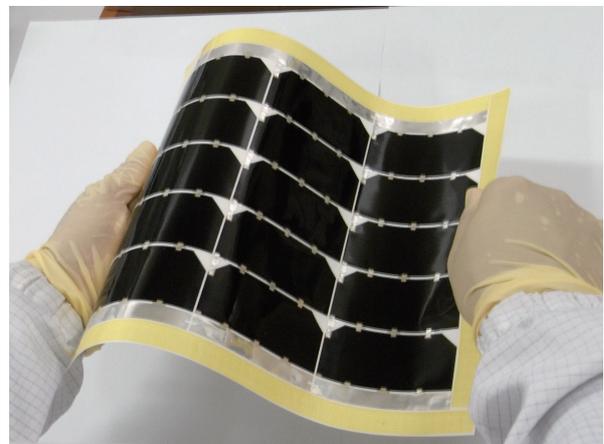


図3 薄膜3接合太陽電池搭載フィルムアレイシートの外観写真⁷ (© シャープ株式会社)

4 薄膜3接合太陽電池搭載フィルムアレイシートの宇宙実証

通常の宇宙機において、太陽電池は唯一の発電機であるため、当然高い信頼性が要求される。よって、太陽電池を新規開発した場合、いきなり実機応用するのではなく、まず宇宙機の主電源に用いない形で軌道上動作実証試験をするのが一般的である。薄膜3接合太陽電池も段階を踏んで複数の実証試験を実施した。太陽電池単体は2013年9月14日に「ひさき」に搭載して^{8,9}、またフィルムアレイシートモジュールは2016年12月9日に「こうのとりのり」6号機に搭載して¹⁰、それぞれ軌道上に打ち上げられた。図4は、「こうのとりのり」6号機に搭載された薄膜太陽電池フィルムアレイシートモジュール軌道上実証システム(SFINKS: Solar cell Film array sheet for Next generation)の外観写真である。太陽電池単体の軌道上実証では問題はなかったが^{8,9}、SFINKSは運用初期にて永久故障に至った¹¹。不具合分析や検証実験等から、フィルムアレイシートに搭載した薄膜3接合太陽電池の故障の根本的な要因は、太陽電池の熱暴走¹²であったと結論づけた。太陽電池で発生した電流は、外部回路に出力されない場合、太陽電池内部で消費される。太陽電池の温度が面内で均一であれば発電箇所とこの消費箇所は同じとなるが、太陽電池に温度分布等がある場合、電流は高温箇所に集中して消費されやすい。高温箇所に電流が集中すると、その箇所の温度が更に高くなる。従来の厚い太陽電池であれば、面内方向の熱抵抗が小さいため熱は拡散し局所的な温度上昇は起こりにくい。薄膜太陽電池の場合は面内方向の熱抵抗が大きいため局所的に高温になりやすい。検証実験から、様々な条件が重なった場合に、薄膜3接

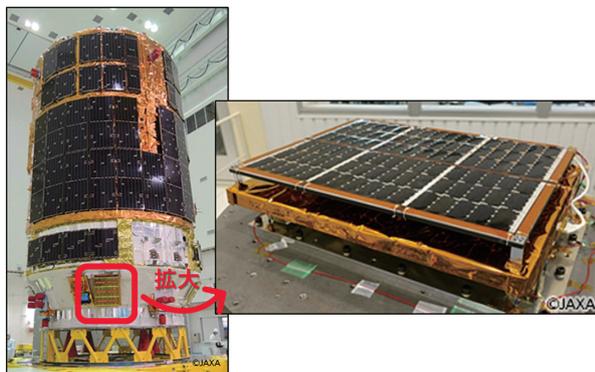


図4 「こうのとりのり」6号機に搭載されたフィルムアレイシートの外観写真¹⁰ (©JAXA)

合太陽電池はこの電流集中と局所的加熱の正帰還によって、太陽電池を永久故障させるほどの高温となり得ることがわかった。当時、太陽電池の熱暴走は一般的な事象ではなく知見は限られていたが、この軌道上実証試験の不具合経験から得た知見を基に、熱暴走に対して負帰還¹³の機能を薄膜3接合太陽電池に付与することで、同事象が起らないようにした。

このあとも着実に改良実績を積み重ね、結果として薄膜3接合太陽電池は冒頭述べたSLIMに搭載されることになった(図5)¹⁴。SLIMは全ての地上試験に合格し¹⁵、2023年9月6日に種子島宇宙センターから打ち上げられた。SFINKS後に加えた改良は軌道上で想定通り機能し、太陽電池パネルの発生電力は設計どおりの結果が得られた。また、2024年1月20日には無事月着陸も達成した。着陸直後、姿勢異常により太陽電池に光が当たらない状態が続いたが、同1月28日に太陽光が当たりSLIMは再起動した。その後も2024年4月末時点で3回の越夜に成功するなど、薄膜3接合太陽電池は昼夜で約300℃もの温度差を経験する非常に厳しい月の温度環境にも耐え得ることが示された。

薄膜3接合太陽電池を用いたコンポーネントとして、フィルムアレイシートだけでなく、耐環境性により優れるガラスタイプのアレイシートや、インターコネクタ・カバーガラス付き単型太陽電池(CIC: Coverglass Integrated Cell)も開発した³。ガラスアレイシートを用いた太陽電池パドルは2019年1月18日に打ち上げられた「小型実証衛星1号機」(RAPIS-1)搭載の「軽量太陽電池パドル」(TMSAP: Thin Membrane Solar Array Paddle)によってその機



図5 SLIMに搭載されたフィルムアレイシート¹⁴ (©JAXA)

能・性能が実証された^{16,17}。今後、この薄膜3接合太陽電池は、2025年打ち上げ予定のDESTINY+（ガラスレイシート採用）¹⁸や2026年打ち上げ予定のMMX（CIC採用）^{19,20}などにも搭載が決まっており、更なる採用先の拡大が期待される。

5 次世代宇宙用太陽電池

JAXAでは、薄膜3接合太陽電池の採用先拡大活動と並行して、次世代宇宙用太陽電池の研究開発も実施している。ここまで宇宙用太陽電池に求められることとして性能面に着目してきたが、当然ながらコストも重要である。近年は衛星一機で全ての機能を担うのではなく、複数機によってサービスを提供するコンステレーション衛星の市場が活発である。このようなケースではコストの方が重視される場合があり、宇宙用太陽電池に対する要求が多様化している。高性能化と低コスト化の完全な両立は現状難しいため、JAXAでは材料固有の特性等を考慮して、それぞれの要求に適した複数種の次世代宇宙用太陽電池の研究開発に取り組んでいる。コスト重視の太陽電池としては、安価な材料と製造法を用いたCIS太陽電池やペロブスカイト太陽電池に着目している。これらは特に、Si太陽電池に比べて高い放射線耐性を有していることが示されており^{21,22}、宇宙応用の可能性を有している。また、高性能化に関しては、新たにメカニカルスタック構造を取り入れた3接合太陽電池の開発を進めている²³。これはInGaPトップ太陽電池とGaAsミドル太陽電池（2つで薄膜2接合太陽電池を形成）は薄膜3接合太陽電池と同じだが、ボトム太陽電池として放射線耐性の高いCIS太陽電池を採用することで、寿命末期の変換効率を更に高めることを狙いとしている。上部の薄膜2接合太陽電池に関しても、光電変換損失を極限まで低減させることによって更なる高性能化を目指している。現在、これらの次世代宇宙用太陽電池の軌道上実証試験に向け、「HTV-X宇宙用太陽電池セル実証装置」（SDX：Space solar cell Demonstration instrument on HTV-X）²⁴の開発を進めている。SDXはHTV-X1号機で打ち上げる予定である。

6 おわりに

通常の宇宙機において、宇宙用太陽電池は唯一の発電機であり、非常に重要なコンポーネントである。シャープとJAXAでは、世界最高水準の出力質量比を

有する薄膜3接合太陽電池を開発し、その実用化に成功した。更にJAXAでは、多様化する要求に応えるべく、目標性能の異なる複数種の次世代宇宙用太陽電池の研究開発を進めている。

謝辞

本稿は薄膜3接合太陽電池の研究開発に携わられた多くの方のご協力のもと執筆した。特にシャープエネルギーソリューション株式会社の高本達也氏、山口洋司氏、鷺尾英俊氏、島田啓二氏、鈴木喜之氏、伊地知亮氏、松本雄太氏、量子科学技術研究開発機構の大島武氏、佐藤真一郎氏、三条市立大学の今泉充教授、宇宙航空研究開発機構の豊田裕之助教、住田泰史氏、宮澤優氏、金谷周朔氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 澤井秀次郎, 福田盛介, 坂井真一郎, 櫛木賢一, 荒川哲人, 佐藤英一, 富木淳史, 道上啓亮, 河野太郎, 岡崎峻, 久木田明夫, 宮澤優, 植田聡史, 戸部裕史, 丸祐介, 下地治彦, 清水康弘, 芝崎裕介, 島田貞則, 横井貴弘, 藪下剛, 佐藤賢一郎, 中村和行, 久原隆博, 高見剛史, 田中伸彦, 古川克己, *航空宇宙技術* **17**, 35-43, 2018.
- 2) T. Takamoto, T. Agui, A. Yoshida, K. Nakaido, H. Juso, K. Sasaki, K. Nakamura, H. Yamaguchi, T. Kodama, H. Washio, M. Imaizumi, M. Takahashi, *Proceeding of IEEE 35th Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, USA*, pp. 412-417, 2010.
- 3) 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, and T. Oshima, *Proceeding of IEEE 42nd Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA*, 15664138, 2015.
- 4) 上村邦夫, 佐賀達男, 松谷壽信, *シャープ技報*, 第70号, pp. 59-64, 1998年.
- 5) T. Nakamura, M. Imaizumi, S.-i. Sato, T. Ohshima, H. Akiyama, and Y. Okada, *J. Appl. Phys.*, **132**, 115701, 2022.
- 6) M. Imaizumi, T. Nakamura, T. Takamono, T. Ohshima, and M. Tajima, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **25**(2), 161, 2017.
- 7) シャープニュースリリース, 2024年1月29日,

- <https://corporate.jp.sharp/news/240129-b.html>
(参照: 2024年5月19日)
- 8) K. Shimazaki, Y. Kobayashi, M. Takahashi, M. Imaizumi, M. Murashima, Y. Takahashi, H. Toyota, A. Kukita, T. Ohshima, S.-i. Sato, T. Takamoto, H. Kusawake, Proceeding of IEEE 40th Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA, pp. 2149–2154, 2014.
 - 9) T. Sumita, Y. Shibata, T. Nakamura, K. Shimazaki, A. Kukita, M. Imaizumi, S.-i. Sato, T. Ohshima, and T. Takamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 08RD01, 2018.
 - 10) JAXA 研究開発部門 HP,
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/society5/sfinks.html> (参照: 2024年5月19日)
 - 11) JAXA 研究開発部門 HP,
https://www.kenkai.jaxa.jp/research/pastres/sfinks_results.html, (参照: 2024年5月19日)
 - 12) T. Nakamura, T. Sumita, and M. Imaizumi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 08RD03, 2018
 - 13) T. Nakamura, M. Imaizumi, K. Murai, R. Kawamura, and I. Nanno, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SK1049, 2023.
 - 14) JAXA/ISAS HP,
https://www.isas.jaxa.jp/feature/slim/slim_04.html, (参照: 2024年5月19日)
 - 15) T. Nakamura, H. Akiyama, S. Kanaya, Y. Miyazawa, H. Toyota, and S.-i. Sakai, Electrical Characterization of Solar Array Panels by Absolute Electroluminescence Intensity, *J. Evolving Space Activities*, in-press.
 - 16) T. Sumita, T. Nakamura, Y. Shibata, Y. Hiomi, H. Uchida, A. Okamoto, M. Imaizumi, N. Kaneko, T. Kobayashi, T. Ose, Y. Nozaki, and T. Takamoto, 12th European Space Power Conference, 270, 2019.
 - 17) NEC 技報,
<https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210133.html>, (参照: 2024年5月19日)
 - 18) H. Toyota, T. Takashima, H. Imamura, K. Nishiyama, T. Yamamoto, T. Miyabara, M. Ohta, Y. Mochihara, N. Ozaki, H. Nagamatsu, T. Okahashi, J. Takahashi, T. Okudaira, T. Hirai, M. Kobayashi, K. Ishibashi, P. Hong, O. Okudaira, and T. Arai, *J. Evolving Space Activities* **1**, 90, 2023.
 - 19) K. Kuramoto, Y. Kawakatsu, M. Fujimoto, A. Araya, M. A. Barucci, H. Genda, N. Hirata, H. Ikeda, T. Imamura, J. Helbert, S. Kaneda, M. Kobayashi, H. Kusano, D. J. Lawrence, K. Matsumoto, P. Michel, H. Miyamoto, T. Morota, H. Nakagawa, T. Nakamura, K. Ogawa, H. Otake, M. Ozaki, S. Russell, S. Sasaki, H. Sawada, H. Senshu, S. Tachibana, N. Terada, S. Ulamec, T. Usui, K. Wada, S.-i. Watanabe, and S. Yokota, *Earth Planets Space* **74**, 12, 2022.
 - 20) 中村徹哉, 嶋田貴信, 今田高峰, 内藤均, 新延大介, 赤澤慧, 青木香恵, 山坂大樹, 及川信一郎, 岡寿久, 第67回宇宙科学技術連合講演会, 3E16, 2023.
 - 21) H. Sugimoto, T. Nakamura, M. Imaizumi, S.-i. Sato, T. Ohshima, Proton Degradation-free Flexible Chalcopyrite Solar Cells, Proceeding of IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference, San Juan, USA, 2023.
 - 22) Y. Miyazawa, M. Ikegami, H. Chen, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Hirose, and T. Miyasaka, *iScience* **2**, 148, 2018.
 - 23) M. Imaizumi, T. Takamoto, H. Sumimoto, T. Ohshima, and S. Kawakita, Proceeding of IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA, pp. 1495–1498, 2019.
 - 24) M. Imaizumi, T. Okumura, T. Nakamura, S. Kanaya, and T. Sumita, Proceeding of IEEE 49th Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, USA, pp. 1257–1257, 2022.