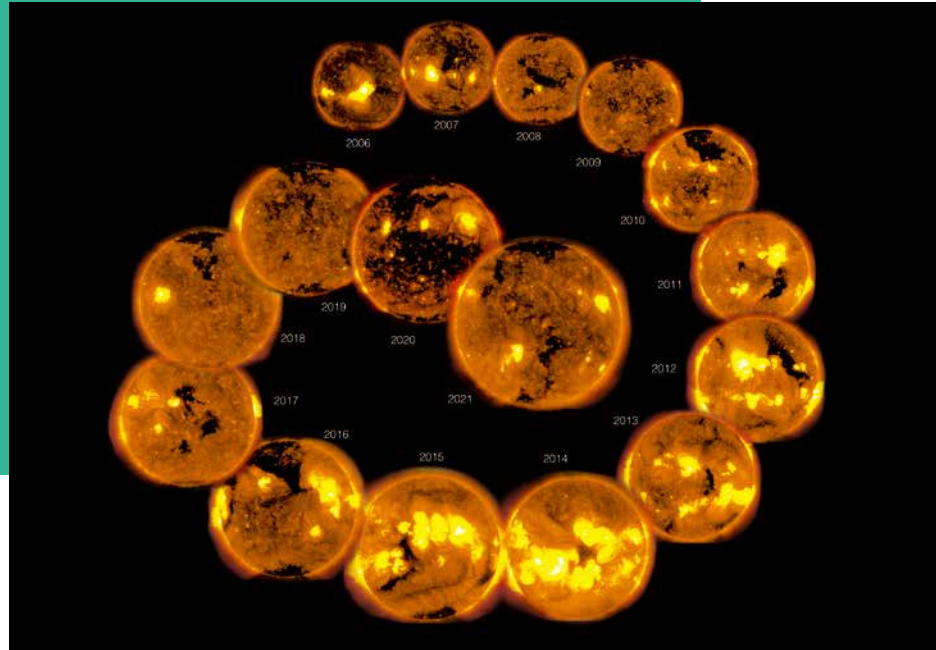


「ひので」軟X線画像で捉えた 15年にわたる太陽コロナの 変遷。

2006年から2021年までの15年にわたり「ひので」搭載のX線望遠鏡が撮影した画像から作成した。太陽活動の周期的な変化に伴い、太陽フレアが主に発生するX線で明るい領域の数、サイズや発生領域の変化を見ることができる。(p.4参照)
© NAOJ/JAXA/MSU



The Forefront of Space Science

宇宙 科学 最前線

次世代太陽電池：ペロブスカイト太陽電池

宇宙探査イノベーションハブ 宮澤 優 (みやざわ ゆう)

地球と太陽の距離は1億4,960万km。太陽から遠く離れた地球においても、太陽光が降り注ぐと暖かいことなどから、太陽エネルギーの総量が莫大であることが想像できます。潤沢な太陽エネルギーを利用する太陽光発電は、クリーンエネルギーの1つとして、地球上で欠かせないものになっています。宇宙機に目を向けると、太陽光発電が唯一無二の日照中の実用的なエネルギー源であり、ほぼ全ての宇宙機に太陽電池が搭載されています¹⁾。本稿では、“ペロブスカイト太陽電池(以降、PSC)”と呼ばれる、実用化に向けて多数の企業や大学が研究開発中の太陽電池を紹介します。我々は、宇宙での最大の劣化要因である放射線に対して、PSCが極めて高い耐性を有することを世界に先駆けて明らかにしました^{2,3)}。

PSCは、2009年に桐蔭横浜大学の宮坂 力教授らがABX₃構造から成るペロブスカイト結晶*を光吸収層に用いた太陽電池で発電できることを発見したことを始まりとして研究がスタートした、日本発の太陽電池です。図1にPSCの特徴をまとめました。ペロブスカイト結晶の光吸収係数が大きいいため、薄膜でも十分に光を吸収できることから、PSCは基板を除いて1μm厚以下で構成されます。更に、150℃以下の低

温でも成膜できるため、耐熱温度が低い薄膜フィルム上にも成膜できることから、曲げることができる太陽電池の製作が可能です。また、ペロブスカイト結晶の少数キャリア拡散長が長いこと、太陽電池に適したバンドギャップを有することなどから、最高エネルギー変換効率は25%を超えています。溶液塗布により成膜できることを主な理由として、製造コストが低く、製造に必要なエネルギーが小さいです。このような特徴を有するPSCは、カーボンニュートラル実現に向けて耐荷重の低い屋根上に設置されることや、室内光下においても高い変換効率を維持する特徴も生かしてIoT用電力源として実用化されることが期待されています。現状では熱耐久性や光耐久性と変換効率の両立などに課題がありますが、多くの企業や大学が参画し研究開発が盛んに行われている現状を考えると、数年以内に地上において普及するのではないかと期待できます。

さて、宇宙科学とPSCの繋がりを見ていきたいと思います。「はやぶさ2」や「あらせ」などの探査機や科学衛星に使用される太陽電池は、3接合型化合物太陽電池(以降、3接合型)が一般的です。宇宙を主な適用先として開発された3接

*ペロブスカイト結晶とは、立方体の中に正八面体を含むような構造を持つ結晶の総称である。構成される原子の種類により特性が大きく変化し、例えば高温超伝導体や強磁性体として働くことが知られている。

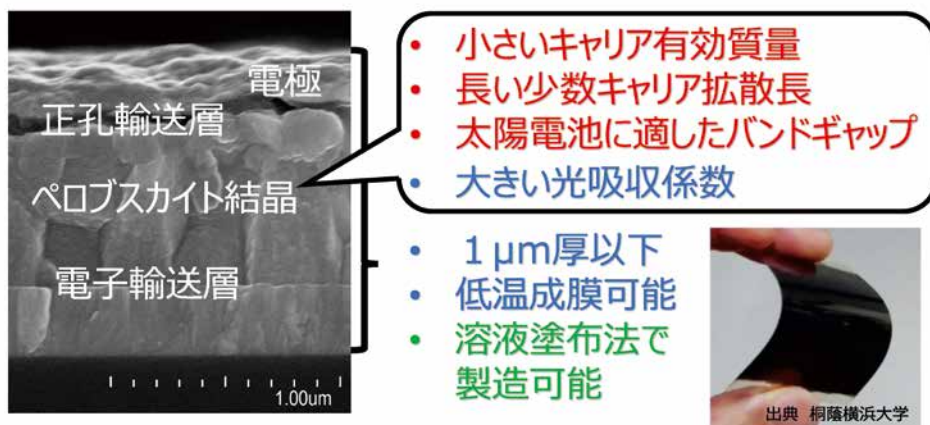


図1：ペロブスカイト太陽電池の特徴。

合型は、3つの半導体材料を直列接続して幅広い波長を吸収していることなどから、実用化レベルの変換効率が約30%と高いです。また、近年では3接合型が薄膜化され曲面にも搭載できる薄膜3接合型が開発され、SLIMやDESTINY⁺に搭載される予定です。単接合PSCが、変換効率で(薄膜)3接合型を上回ことは原理的に困難です。一方、コスト面と放射線耐性においてはPSCが優位になりそうです。(薄膜)3接合型は材料や製造方法が複雑であり低コストでの製造が難しい上に、主な市場が宇宙に限られているため大量生産による低コスト化も難しい状況です。一方で、PSCは真空や高温環境を必要とせず簡易な溶液塗布により低コストで製造できることに加えて、地上用途における需要が見込めるため大量生産による低コスト化も期待できます。そして、詳細な理由は解明を目指して研究中であるものの、PSCは(薄膜)3接合型に比べて極めて高い放射線耐性を有することが明らかになっています。放射線環境と要求寿命によっては、寿命末期での変換効率は(薄膜)3接合型と同等になることが期待されます。これらのことから、地上における実用化を目指した研究開発が進み、高い変換効率と熱や光に対する耐久性を有し、高い放射線耐性を兼ね備えた低コストのフレキシブルPSCが開発できると、大電力を必要とするミッションや放射線量が多い軌道を飛翔するミッションに貢献できると考えています。

ここからは、我々の研究成果も含めてPSCの放射線耐性について紹介します。一般的な太陽電池の宇宙での最大の劣化要因は放射線です。放射線が太陽電池に入射すると、半導体結晶中の原子が格子点からはじき出され、欠陥が導入され得ます。欠陥が少数キャリア(光生成した電子またはホール)の再結合中心として働いた場合、少数キャリアの拡散長(L)が短くなり(少数キャリアが進める距離が短くなり)、太陽電池の出力が低下します。さて、各太陽電池の放射線耐性はどのように決まるのでしょうか。化合物半導体材料の放射線耐性の違いについて、バンドギャップ(E_g)、光学吸収係数(α)、少数キャリア拡散長の損傷係数(K_L)を用いて、次のように整理されています。E_gが大きい程、放射線により低下が大きい表面電流成分の発生電流への寄与が小さくなるため、発生電流の低下が小さくなります。αが大きい程、光吸収層を薄くできるため、放射線により導入される欠陥量が少なくなります。K_Lが小さい程、放射線によりLが短くならないことを示すため、発生電流の低下が小さくなります。K_L

は実験により明らかになる値であり、ペロブスカイト結晶のK_Lは明らかになっていませんでしたが、ペロブスカイト結晶が大きいE_gと大きいαを有することから、我々はPSCが高い放射線耐性を持つ可能性が高いことに着目して、桐蔭横浜大学宮坂研究室と共にPSCの宇宙応用に向けた検討を世界に先駆けて2014年にスタートさせました。宇宙機設計においては、放射線による劣化を考慮して太陽電池搭載量を決めるため、放射線耐性が高いことは太陽電池パネルの小型軽量化や低コスト化に寄与、すなわち観測機器を増やせることによるミッションの質の向上に寄与します。

では、どれだけPSCの放射線耐性は高いのでしょうか。太陽電池の放射線耐性の評価として、太陽電池に損傷を及ぼす電子線、または陽子線を照射し、照射前後の発電特性を評価する方法が一般的です。電子線は通過した経路に一樣な欠陥を導入するため、他の太陽電池と放射線耐久性の比較ができます。陽子線は止まるところでエネルギーを落として局所的に欠陥を導入するため、光吸収層で止まるエネルギーの陽子線が太陽電池に最も大きな劣化を及ぼすと考えられます。我々は、他の太陽電池と耐久性の比較ができる1MeV電子線、光吸収層で止まり最も劣化を及ぼすと考えられるエネルギーの陽子線、双方の照射実験から、いくつかの有機無機ペロブスカイト結晶を光吸収層とするPSCが、3接合型に比べて高い放射線耐性を有することを明らかにしました⁴⁾。例えば、3接合型の最大発電電力量が38%低下する1MeV電子線 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ を照射した後においても、図2に示す通り、PSCの最大発電電力量の低下は見られませんでした。我々の報告に続き、PSCの高い耐久性を支持する結果が多数報告されています。

なぜ、PSCの放射線耐性は高いのでしょうか。宇宙応用の

なぜ、PSCの放射線耐性は高いのでしょうか。宇宙応用の

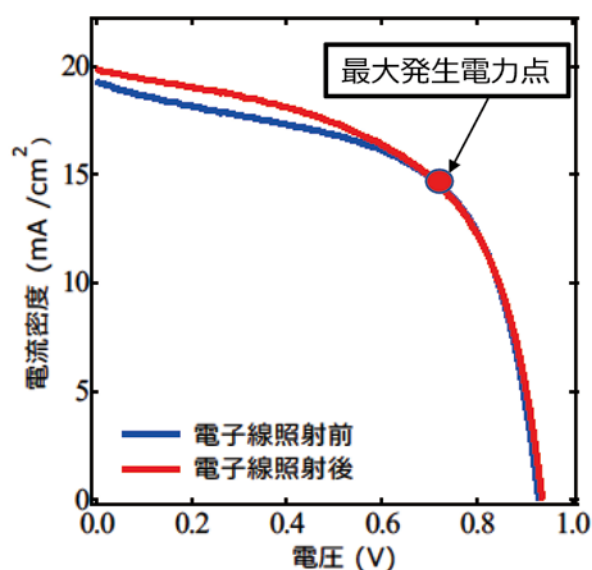


図2：1 MeV電子線 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 照射前後の発電特性。

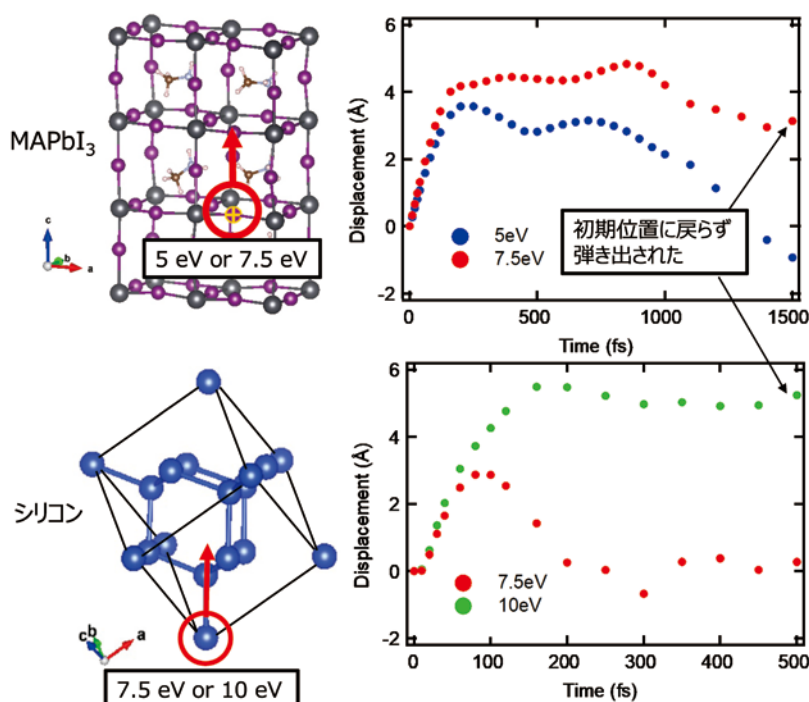


図3：MAPbI₃とシリコンにおける、それぞれI原子とSi原子にエネルギーを与えた後の座標変位。

実現には、放射線に対する振る舞いを明らかにすることが必要です。ペロブスカイト結晶が小さい K_L を持つ理由の解明のために、 K_L を決めるパラメータ（欠陥捕獲断面積、キャリア熱速度、キャリア拡散係数、再結合欠陥導入率）について、結晶構造や物性の理解が進んでいるペロブスカイト結晶MAPbI₃（ここで、MA：CH₃NH₃）とシリコンの比較評価を行いました。評価の1つとして、再結合欠陥導入率を支配するはじき出しエネルギーを第一原理分子動力学シミュレーションにて計算した結果を紹介します。図3に示すのは、MAPbI₃とシリコンにおける、それぞれI原子とSi原子にエネルギーを与えた後の座標変位です。MAPbI₃のI原子がシリコンのSi原子よりも少し低いエネルギーではじき出されることがわかります。これは、MAPbI₃中のI原子の方がシリコン中のSi原子に比べて放射線によりはじき出されやすく、MAPbI₃がシリコンに比べて放射線耐性が高いとは言えない、ということです。他のパラメータについてもペロブスカイト結晶の K_L の小ささを説明できる優位性は見られませんでした⁵⁾。小さい K_L を持つ化合物半導体InPについては、 K_L が小さい理由の1つとして、室温下で放射線劣化後の発電性能の回復が報告されており、ここがペロブスカイト結晶の K_L が小さい1つのキーかもしれないと考えています。

今回は放射線耐性に関する研究を中心に報告しましたが、宇宙応用、また地上での実用化の共通課題として、熱耐久性や光耐久性の向上が挙げられます。まだまだ市場規模が小さい宇宙での応用のためには、市場規模が大きい地上における事業化に向けた研究開発と協働していく、または地上事業における成果を取り込んでいくことが重要と考えています。このような研究に適したJAXAの取り組みとして、宇宙探査イノベーションハブにおいて、将来の探査に必要な技術を地上における技術課題解決と融合させ、得られた成果の地上での社会実装と宇宙探査への応用を目指すことにより、宇宙探査に必要な技術の継続的な研究開発を可能とする取り組み

を行っています。PSCについても、「高効率・低コスト・軽量薄膜ペロブスカイト太陽電池デバイスの高耐久化開発」のテーマで、産学官が連携し、地上におけるIoT用電力源としての実用化、その先の宇宙応用に向けた開発に取り組みました。将来の気球実験の高度化への貢献を目指して、極薄気球膜上PSCの開発も実施しています。

おわりに

日本発の技術であるPSCが実用化され、カーボンニュートラル社会の実現に貢献すること、更にはPSCの宇宙応用が宇宙開発の発展に貢献できることを期待しています。最後に、共同研究者の桐蔭横浜大学 宮坂 力教授、池上 和志教授をはじめとする宮坂研究室の皆様、早稲田大学 山本 知之教授、JAXA 廣瀬 和之特任教授、金谷 周朔氏、豊田 裕之助教、福家 英之准教授、今泉 充氏をはじめ共同研究者の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ISASニュース2017年8月号 (No. 437) “変革する太陽電池と新しい宇宙科学ミッション”、豊田 裕之。
- [2] Y. Miyazawa, M. Ikegami, T. Miyasaka, T. Ohshima, M. Imaizumi, and K. Hirose, Evaluation of Radiation Tolerance of Perovskite Solar cell For Use in Space. 42th IEEE PVSC, 14 - 19 June 2015, New Orleans.
- [3] ISASニュース2021年7月号 (No. 484) “宇宙研の半導体デバイス研究一深宇宙探査船団を実現するために” 廣瀬 和之。
- [4] Y. Miyazawa, M. Ikegami, H.-W. Chen, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Hirose, and T. Miyasaka, Tolerance of Perovskite Solar Cell to High-Energy Particle Irradiations in Space Environment. iScience 2, 148 (2018).
- [5] Y. Miyazawa, G. M. Kim, A. Ishii, M. Ikegami, T. Miyasaka, Y. Suzuki, T. Yamamoto, T. Ohshima, S. Kanaya, H. Toyota, and K. Hirose, Evaluation of Damage Coefficient for Minority-Carrier Diffusion Length of Triple-Cation Perovskite Solar Cells under 1 MeV Electron Irradiation for Space Applications. J. Phys. Chem. C, 125, 13131 (2021).

「ひので」軌道上観測運用15年を超える

M-Vロケット最後の打上げで軌道投入された太陽観測衛星「ひので」による太陽観測運用が15年を超えました。「ひのとり」の約1年、「ようこう」の約10年に比べると、衛星の寿命が大きく延びています。3年で計画されたミッションは、他衛星が今だ実現できない高解像度の観測を3つの目(望遠鏡)で継続しています。ミッション成果を論文数だけで述べるのには抵抗がありますが、査読誌に掲載された「ひので」関係の論文は今年中に1500編に到達する見込みです。日本のみならず世界各国の研究者が「ひので」観測を重宝してくれています。太陽活動サイクルの約11年(磁気的に見ると約22年)をカバーしつつある貴重なデータが蓄積されています(表紙写真)。JAXAおよび宇宙研が主体として衛星運用を維持し、NASAやESA等の海外機関が打上げ当初と変わらないレベルで運用支援してくれています。現在の「ひので」観測は、長い時間を要するなど観測が容易でなかったテーマや対象の観測に加え、新たに立ち上がった衛星・探査機・地上観測設備などと協働した支援観測が増えており、太陽が関わる学術的課題に総合的に取り組む流れが強くなっています。すなわち、「ひので」は太陽圏システム科学の世界観測網の中で重要な一翼を担っています。例えば、この3月には、Solar Orbiter探査機(ESA/NASA)が太陽-地球間距離の3分の1以下の距離に接近し太陽観測をする初めての機会があり

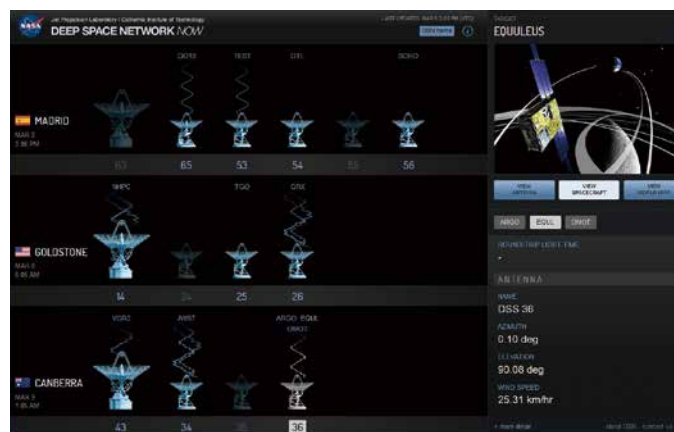
ました。その際には、最高精度を誇る太陽面磁場データの取得やEUV光によるコロナプラズマの分光観測が連携して行われ、データ較正から科学観測まで貢献するデータの取得が行われました。今後のデータ解析で何が得られるかが楽しみです。4月に入ると、太陽表面には黒点群(X線では明るい領域に対応)が次から次に現れ、そのうち幾つかの黒点群は太陽フレアを幾つも発生させるまでに発達しました。特に、4月中旬に太陽の東リムから現れた黒点群は、2020年始め頃からスタートした現太陽サイクル(第25サイクル)において現在のところ最も大きなサイズの黒点群に成長し、また複雑な磁場構造を伴ったため、Xクラスと呼ばれる巨大フレアを含む大中小様々な規模のフレアが頻発しました。「ひので」も事前に予定していた計画を延期させて、この領域を常に追跡して観測を行いました。現太陽サイクルは今後数年かけてさらに活発化することが予想されています。なお、これらの貴重な観測機会が行われる前の2ヶ月間、定常観測を中断する事態が起きました。衛星姿勢制御系の異常検知ロジックが通常と異なる衛星姿勢の動きを捉えたため、衛星を安全なモードに移行させる動作が起動したのです。姿勢系センサの劣化が原因と考えられますが、慎重を期した復旧作業が時間をかけて行われました。長寿命の衛星の定常運用維持の難しさを感じた機会となりました。(清水 敏文)

OMOTENASHI/EQUULEUSは打上げ準備中

超小型探査機OMOTENASHI(OMOTと略記)とEQUULEUS(同EQUUL)は、NASA SLS Artemis-1ロケットでの打上げに向けて準備中です。ロケット側は、4月1日からNASA Kennedy Space CenterにてWet Dress Rehearsal(WDR)と呼ばれる最終確認試験が行われました。ロケットを発射点に移動させ、燃料の充填など本番と同様の作業を行い、打上げ10秒前でカウントダウンを停止させる試験です。残念ながらいくつか問題点が見つかったので、現在改修中で、再度WDRを行った後に打上げに臨むことになります。

この間探査機側は運用訓練を継続中です。通常運用の訓練は一通り終えたので、現在は主に、機器が故障した、あるいは性能が想定していたものと異なった場合の、いわゆるオフノミナル・ケースの訓練をしています。問題が起こってからその場で対応していると手遅れになるので、事前にいろいろなケースを想定して対応策を検討しています。

両探査機は、JAXAの美笹局、臼田局、内之浦局に加えて、NASAのDeep Space Network(DSN)を使った運用を行います。DSNは、米国ゴールドストーン、オーストラリアのキャンベラ、スペインのマドリッドの各場所に複数のアンテナがあります。OMOTは合計10個のアンテナ、EQUULは14個のアンテナを使う可能性があるため、3月までにその全てについて疎通試験を完了させました。DSN局は、Artemis-1打上げ時には主衛星であるOrionと相乗りの9機のCubeSatを追跡する必要があり、アンテナが不足します。そこで、1つのアンテナで4機まで同時に運用するMulti Spacecraft Per Antenna(MSPA)機能を使い



MSPA時のスクリーンショット。ボイジャー2号(VGR2)やジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)も同時に運用していた。©NASA/JPL

ます。Artemis-1からの分離直後は、全てのCubeSatが近傍を飛行しており同じアンテナビーム内に入るので、このようなことができるのです。写真は、3月8日のMSPA試験中のDSN Nowページ*のスクリーンショットです。キャンベラの36番アンテナを使って、OMOT、EQUULとイタリアのCubeSatであるArgoMoon(ARGO)が試験中の様子です。同時に3探査機からのテレメトリデータを受信しながら、順番にコマンド送信する試験を実施しました。当初の打上げ予定よりもかなり遅れていますが、この時間を利用して万全の体制を整えつつあります。

(橋本 樹明、船瀬 龍)

* <https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>

米国 天文・宇宙分野のDecadal Survey Report “Pathways to Discovery” と今後の国際協力

2021年11月、米国 National Academy of Scienceによる天文学・宇宙物理学分野の Decadal Survey の検討結果をまとめたレポートが発表されました。今回のレポートの大きな特徴は、スペースからの計画について2040年代にまたぐ multi-decadal な展望を示したこと、また特に超大型基幹計画については、優先して検討すべきミッションのコンセプトは提言するものの、まず、技術的・計画的成熟のための開発研究を相当なリソースをかけて戦略的に実施することが提言されていることです。優先すべき大型計画としては、ハビタブル(居住可能性を持つ)地球型惑星研究への取り組みが中心的課題として取り上げられ、そのために口径6m級の紫外線/可視光/近赤外線波長域の大型望遠鏡の実現を目標として定めています。2030年頃までに、6年程度、\$800M規模の費用を想定する成熟度検討を行い、その成立性を確認しながら、本格的な概念検討に入るといえるものです。望遠鏡計画そのものの予算は\$11B(約1.4兆円)が想定されます。

一方、このような超大型基幹計画と従来の Explorer級のミッションの間を埋める\$1500M規模の「Probe級」計画を2030年初頭にむけて実現することが提案されています。今回は、特に SPICA計画の検討中止をふまえて遠赤外線観測を行うミッション、あるいは、ESA Athena計画と相補的なX線ミッションを競争的公募によりすすめることを提唱しています。これをうけ

て、NASAは早速2022年1月に公募に向けてのアナウンスを出しています。来年初めには公募が行われ、2030年代初頭の打上を目指して計画が進められる見通しです。「遠赤外 Probeミッション計画」については、特にこれまで SPICA をすすめてきた日本・欧州の研究者たちも遠赤外線での深宇宙観測を実現する機会として注目しています。

このように1000億、1兆円を越える大型・超大型望遠鏡計画が世界をリードしてゆく中、我々はどうのように宇宙観測衛星計画を進めてゆくべきでしょうか？ JAXA最大の宇宙科学ミッションは最大約400億円規模の戦略的中型ミッションですが、ユニークな観点からこれら大型計画とも相補的な JAXA リードミッションを創出してゆくことが求められます。理工学委員会の議論の元、各分野領域の「戦略的中型創出グループ(GDI)」が、いよいよ、活動を始めています。一方、大型、超大型計画に国際協力として日本の研究者が参画する機会は重要です。限られた予算・人員の中で、日本の得意な技術、成熟した技術や科学研究でどのように国際協力の道筋を拓いていくか。現状の枠組みを変革／超越して、超大型計画への大規模な協力可能性をどのように拓いてゆくのか、今後さらなる活発な検討が期待されます。

(山田 亨)

3年ぶりの宇宙科学講演会開催

新型コロナウイルスの感染状況が落ち着かず、2019年以降開催を見合わせていた宇宙研主催の講演会を4月30日(土)、約300名の来場者を迎えて、相模女子大学グリーンホールにて開催しました。

前回までは「宇宙科学講演と映画の会」と銘打ち、講演と合わせてショートフィルムの上映を行っていましたが、今回は久々に会場での講演会なので喋りたい人がたくさんいるのでは、という藤本 正樹宇宙研広報・普及主幹の鶴の一声で、お話しに重きを置くプログラムになりました。

講演は、津田 雄一教授、坂井 真一郎教授、山口 弘悦准教授の順に、それぞれのプロジェクトについて最新の情報を語り、続いて羽生 宏人准教授、福家 英之准教授、野中 聡准教授が相模原以外のJAXA施設でどんな実験が行われているか、映像を交えて紹介しました。

最後のコーナーは、講師6名が壇上に勢揃いして、会場の皆さんからの質問に答えるQ&Aセッションです。今回、初めての試みとして、スマートフォンでQRコードを読み取り、講師陣に質問を送っていただく方式を取りました。寄せられた質問を確認するために休憩時間に控室に集合した講師陣が、とても楽しそうに、でも真剣に意見交換をしている光景を見るのは本当に久々で、会場での講演会ができなかった2年という月日を実感しました(講師陣は、司会の藤本主幹からの鋭いツッコミに備えて糖分



講師陣勢揃いで臨んだQ&Aセッション。

補給にも抜かりがなかったことを付け加えておきます)。

新型コロナウイルスの影響は、いろいろなところに波及し、我々に不安を与え、不便を強いています。だからこそ、「久々に会えたね!」という雰囲気会場内に溢れていたのはとても嬉しいことでした。

「どんな形であれ、いま出来ることをやる!」客席で様子を見守っていた國中 均宇宙研所長の背中がそう語っているような気もしました。

(宇宙研広報)

銀河を 吹き渡る 風をみる

連載

第1回

連載開始に寄せて

今回から、X線分光撮像衛星XRISM(X-ray Imaging and Spectroscopy Mission)の連載コーナーがスタートします。この連載では、XRISMが取り組む研究課題の紹介や展望、機器の開発状況、運用準備などをお届けする予定です。NASAとがつり組んで取り入れたシステムズエンジニアリング、大学所属の研究者や学生たちの力が発揮されている軟X線撮像装置Xtendの開発、国際共同で開発を進めている軟X線分光装置Resolve、「確実に運用できる」仕組みを目指した運用準備、そして科学成果の創出に向けた取り組みなど、様々な角度からXRISMをご紹介します。

質 量	2.3t
サ イ ズ	7.9m x 9.2m x 3.1m
設計寿命	3年
軌道高度	575 ± 15 km
軌道周期	96 分

表：衛星の仕様

XRISMのミッションは、2016年に運用を停止したX線天文衛星ASTRO-Hが担っていたサイエンスのひとつ、「超高分解能X線分光による宇宙物理の課題の解明」を早期にかつ確実に回復し、世界に届けることです。現在、国内外40を超える大学や研究機関から100名以上の科学者や技術者が参加して、JAXA/NASA/ESA及びメーカーとともに開発や運用準備を進めています。



写真：(左) Resolveの試験の様子。(右) Xtendをつり上げて検査している様子。

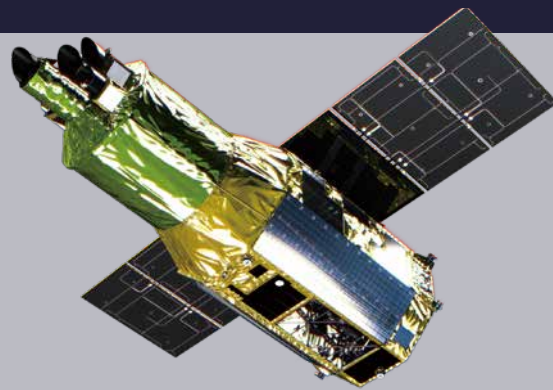


図1：軌道上でのXRISM外観。

短命ではありましたがASTRO-Hは、X線マイクロカロリメータによる高精度分光観測の威力を示しました。例えば、銀河団ガスの運動エネルギーや物理状態を正確に知ることを可能にし、銀河団ガスの乱流が予想よりも小さいことや、銀河団ガスの元素組成が、全く異なる環境にある太陽系組成と似ていることも発見しました。打上げ後の初期機能確認フェーズに取得されたデータで、新たな時代の到来を感じた矢先、ASTRO-Hは通信不能に陥り、結局は運用停止となってしまいました。

JAXAは、ASTRO-Hの不具合事象に対して徹底した原因究明を行い、不具合の直接の要因とその背後にある要因を調べ、再発防止のための対策をしました。XRISM計画は、この再発防止策に基づいて計画されたプロジェクトです。

図1は軌道上の衛星外観、表は衛星の仕様をまとめたものです。ASTRO-Hの開発を通じ、従来の30倍のエネルギー分解能を有する分光装置、焦点距離12mの望遠鏡を保持する構体の熱歪制御などの高度な技術が軌道上実証されています。ASTRO-Hの開発成果を最大限活用し、受け継いだ教訓を確実に実行するという方針で開発と運用準備を進めており、XRISMの基本的なデザインはASTRO-Hのそれを踏襲しています。違うのは、XRISMが、観測エネルギー帯を軟X線に絞り、硬X線帯域は別のミッションに任せた点です。

軌道上でのXRISMは、X線の宇宙天文台です。図2は、X線・可視光・電波で観測した銀河団Abell 1775です。同じ天体を観測しても、波長によってその姿はずいぶん異なります。その天体や宇宙で起こる現象をよりの確に理解するために、様々な波長で観測することが不可欠なのです。これまでの研究から、X線で観測する高温のプラズマは、宇宙におけるエネルギーと物質の流れをトレースし、宇宙におけるあらゆる構造の形成の重要なプローブになっていることがわかってきました。XRISMは、銀河団やブラックホール、超新星爆発・超新星残骸など莫大なエネルギーを伴うダイナミックな現象や巨大な重力が関与する天体を調べます。

XRISM研究主宰者 田代 信(たしろ まこと)



図2：銀河団の1つAbell 1775のX線(左)、可視光(中央)、電波(右)の画像。(credit) X-ray: NASA/CXC/Leiden Univ./A. Botteon et al.; Optical/IR: PanSTARRS; Radio: LOFAR/ASTRON

匠の集団

— 科学衛星・探査機のことなら
おまかせください —

==== 第 4 回 ====

探査データの処理・解析技術に特化した組織：
月惑星探査データ解析グループ

月惑星探査データ解析グループ (JAXA Lunar and Planetary Exploration Data Analysis group: JLPEDA) は、2016年に新設されたグループです。これまで日本では、惑星探査によって得られた観測データ (以後「探査データ」) の解析は、大学等に所属する個々の研究者の技術や処理能力に依存して行われてきました。ところが「かぐや」以降、探査データの量や種類が急増し、ユーザ個々人の努力では処理しきれない状況になりつつあります。一方、科学研究のためだけでなく、将来の探査ミッション検討や効率的な運用のために、探査データの処理・解析ニーズは高まり続けています。すでに米国ではNASA内部や米国地質調査所 (USGS) の宇宙地質学センターに、ESAでは欧州宇宙天文学センター (ESAC) の科学データセンター等に、探査データ処理・解析専門組織が整備され、次の探査計画検討支援や、高次処理されたデータプロダクト創出による科学成果の増大化を行っています。JAXAにも、あらゆる探査データに精通し処理・解析技術に特化した組織の設立が求められ、それがJLPEDA発足のきっかけとなりました。

現在JLPEDAでは、主に5つの活動：①探査プロジェクト・シナリオ検討に資するデータ解析、②サイエンス研究に資する高

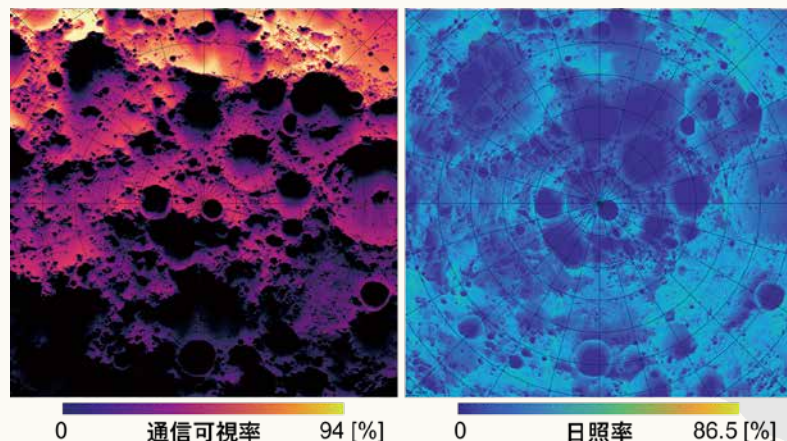
次処理プロダクトの創出、③探査データをブラウザで容易に表示・解析・配信できるシステムの開発、④情報科学分野の手法を取り入れた新しい解析手法の開発、⑤探査データのアーカイブ化支援、を行っています。

特に①と⑤は、JAXAの探査ミッションに密接に関連している活動です。これまでの実績をいくつかご紹介すると、①では主に月極域探査ミッション (LUPEX) の着陸地点検討に必要なデータ解析を行ってきました。地球と異なり自転軸が立っている月の極域では、年間を通じて太陽高度が低く、常に日が当たらない永久影領域と、白夜のように日が沈まない超長期日照領域が存在します。これら領域の正確な特定には、地形データ (DEM) を用いた太陽光の光線追跡シミュレーションを用いますが、いかに高解像度で人工的なノイズの少ないDEMを用意できるかが結果を左右します。NASAなどが公開しているDEMにはノイズが多かったため、JLPEDAではレーザー高度計の点群データや高解像度画像などを駆使し、より高精度で信頼性の高いDEM作成と、その作成技術を開発するところから行ってきました。独自開発アルゴリズムにより、画像から全ボルダー (礫) の位置と大きさを検出したり、上記のDEMから生成される傾斜分布などを使って、着陸ハザードマップを作成したりもしました。LUPEXは月面の水氷探査なので地表温度分布も重要で、熱観測データを使って任意の場所・任意の時刻における温度状態を推定する試みも行っています。今後はMMXの着陸探査に向け、Phobosの重力場計算や訓練用模擬地形の作成なども行っていく予定です。

一方⑤は新しい取り組みで、昨年度から準備を進めてきました。ここで言う「アーカイブ化」とは、探査によって新しく得られたデータをISASのデータ公開サイトに登録する前に、国際標準 (Planetary Data System version 4: PDS4) に準ずる形に整備することです。この国際標準は、収集されたデータが数世代先および他分野のユーザでも読み取り、継続した幅広い価値の創出が可能となるよう、データ利用時に必要とされるすべての情報を統一されたフォーマットで記述することを要求しており、必要であれば国外機関の審査を経て、ようやく準拠が認められるものです。これまでは各機器開発チームがそれぞれ自らの努力でデータのアーカイブ化を行ってきましたが、それが本来最も労力を注ぐべき科学成果創出の大きな足枷となってきました。アーカイブ化に必要な知識と技術を蓄積・継承し、アーカイブ化作業の支援 (規模的に可能であれば代行) を行う定常組織となって、機器チームの負担を大幅に減らし、科学成果創出に十分に力を注いでもらうのがこの活動の目的です。具体的には、機器開発段階でのテレメトリ情報項目のレビュー、SPICEカーネル*とデータ説明文書の作成 (もしくは作成支援)、観測データのPDS4準拠化、などの作業を想定し活動を行っています。

JLPEDAの活動詳細やご相談連絡先については、当グループホームページをご覧ください。
(<https://jlpeda.jaxa.jp/>)

佐藤 広幸 (さとう ひろゆき)



月極域 (>84°S) における、地球との通信可視性マップ (左) と日照率マップ (右)。高精度化したDEMをもとに、2022/4 ~ 2024/3の2年間を想定し行った日照・地球可視性シミュレーションの結果。

*軌道・探査機の姿勢・カメラ視野などの補助情報を、JPLが定めるファイル形式で格納したものです。



元宇宙科学研究所長
JAXA 名誉教授

井上 一 (いのうえ はじめ)

“紙と鉛筆”の夢

私が大学院に入ったのはちょうど50年前、1972年4月のことになります。紙と鉛筆で宇宙の謎を解き明かしたいとの夢を持ってのことでした。折から、アメリカのX線天文衛星「ウフル」が上ってX線星の新しい発見がぞくぞくとなされていた時でした。私の入った大学院では、当時、新入生は大学院に入ってから自分の研究分野を決めることになっていました。いろいろな分野について見聞きするうち、X線星に興味を覚え、その理論的研究を始めました。博士課程に進んでしばらくして、宇宙研(当時は東大宇宙航空研究所)で三人の助手(今の助教)募集があり、まわりからのすすめもあって、ダメもとで応募してみました。当時の宇宙研には小田 稔先生のX線天文学研究室がありましたが、そこに田中 靖郎先生の新しい研究室が加えられることになったためでした。実験の経験の全くない私でしたが、思いがけず、採用されました。3人新人をとるなら1人くらい少し毛色の変った者を取ろうと考えた結果だったと後に聞かれました。

私としては、理論的な研究もできるだろうとの甘い考えで応募したわけですが、現実はきびしいものでした。田中研としての新味を出すべく新しいX線検出器の開発が始まり、実験室に入り浸る毎日をご過ごすことになりました。X線天文衛星CORSAの開発も進んでおり、間近な打上げに向けた準備作業にも動員されました。CORSAは打上げ失敗となってしまいました(1976年2月)が、すぐに再挑戦計画が立ち上がりしました。田中研新開発のX線検出器を搭載したロケット実験が計画され、徹夜に近い毎日をご過ごすことにもなりました。そういうわけで、理論研究をじっくり行うことは程遠い実験と衛星開発に追われる毎日となったわけですが、今から言えばその場その場で出会う種々の新しいことに対し、現象に即した自分なりに考えた対処を行っていく、貴重な勉強の時間だったと思います。そして、ロケット実験(1977年9月)に成功し、CORSAの再挑戦機「はくちょう」(1979年2月打上げ)が無事軌道に投入されると、観測データの解釈や、衛星の軌道上でのふるまいを理解するという新しい仕事加わり

衛星名	衛星種類	打上げ年月
CORSA	X線天文衛星	1976.2 (打上げ失敗)
「はくちょう」	X線天文衛星	1979.2
「ひのと」	太陽観測衛星	1981.2
「てんま」	X線天文衛星	1983.2
「ぎんが」	X線天文衛星	1987.2
「あすか」	X線天文衛星	1993.2
ASTRO-E	X線天文衛星	2000.2 (打上げ失敗)
「すざく」	X線天文衛星	2005.7

表：筆者の関った科学衛星計画。

ました。これらもまたわからないことだらけでしたが、現象を分析いろいろと考察を巡らすことは実に楽しい作業でした。特に、「はくちょう」やそれに続くX線天文衛星「てんま」は、軌道上で首振り運動(歳差運動)を起こし、なぜ、そのようなことが起こるかは、物理の応用問題としてたいへんおもしろいものでした。実は、X線星の中には、歳差運動をしていると考えられるものがあり、そのような問題を考える契機ともなりました。「はくちょう」以来、何機もの衛星の開発に関わりましたが(表参照)、開発時や軌道上での種々の問題を考えることは、「現象をよく見る中から、現象を支配している本質的な点をじっくり考える」いい訓練の場を与えてくれました。2005年からは、管理的な仕事に関わることとなり、対処する問題の中味は大きく変わりましたが、問題の一番おおもとは何かをじっくり考えることが大事なことに変わりはなかったように思います。

管理的な仕事もお役御免となり、大学院時代以来40年近い年月を経て、紙と鉛筆(+パソコン)で天文学の研究をじっくり行う時間がまた持てるようになりました。この間、じっくり考えてみたいと思う課題がいくつもたまっており、それらに一つ一つ自分なりに答えを出してみようと思いました。それらの課題のほとんどは、関連論文こそたくさんありましたが、まだ本質的な理解は得られていないように見えました。手始めに取り組んだのは、上で述べたX線星に見られる歳差運動の問題でした。これには、太い「降着リング」というものを考えると、歳差運動をする方がエネルギー的に安定するという解を得て、自分なりに答えが出せたと思っています。そして、この降着リングの構造の考察をさらに進めると、降着リングがX線星に関わるいくつかの課題を解く上で重要な役割を果たしている可能性が見えてきました。今や、天文学の研究の範囲は大きく広がり、かつ、理解も深まっています。しかし、本質的な部分は、意外とわからないまま、周辺の研究がどんどん細かく行われているようなところが、所々に感じられます。紙と鉛筆による理論研究者としては、まだ新人です。考えるべき大事な点を少しでも指摘できればと思い、せっせと考えを巡らし、論文を書いているこのごろです。

編集後記

太陽活動がだんだん活発になってきて、BepiColomboでも太陽フレアに起因する高エネルギー粒子が観測されています。他の衛星・探査機でも観測されているようです。太陽フレアには緊張しますが、いろいろな衛星・探査機の観測データから今後得られる成果が楽しみです。(小川 博之)



ISASニュース No.494 2022年5月号

ISSN 0285-2861

発行/国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
発行責任者/宇宙科学広報・普及主幹 藤本 正樹
編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠
デザイン制作協力/株式会社トリッド
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶<https://www.isas.jaxa.jp/>