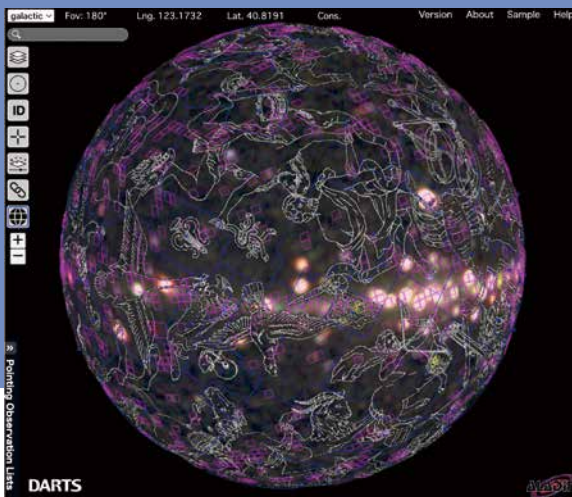
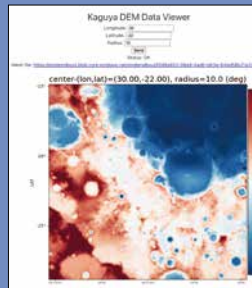


## DARTS

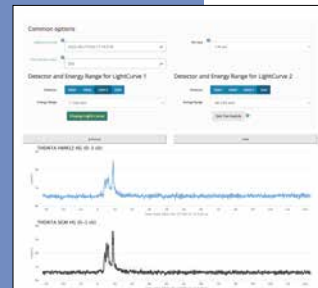
space science data archive



(a)



(b)



(c)



(d)

### DARTSから提供されるWebアプリケーションの例

宇宙科学研究所の科学データアーカイブDARTSは科学データの簡単な取得を助けたり、効率的に早見するWebアプリケーションを提供しています。ここではその一例を示します。

(a) 様々な観測装置の全天画像を観測視野やイラストと重ね書き出来るJUDO2、(b) 任意の地点の「かぐや」が取得したデジタル高度マップを表示し3Dデータを取得できるツール、(c) CALETガンマ線バーストモニタの時系列データを早見するツール、(d) 毎日の「ひので」観測画像を並べた太陽カレンダー。(p.6、p.8参照)

### The Forefront of Space Science

## 宇宙科学最前線

# ソーラー電力セイルによるハイブリッド推進の軌道設計

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 JSPS研究員PD

(現:九州大学 工学研究院 航空宇宙工学専攻 助教)

高尾 勇輝(たかお ゆうき)

## はじめに

「ルララ 宇宙の風に乗る」

スピッツのロビンソンという歌にある、この一節をご存知の読者は多いのではないだろうか。なんとも幻想的で、想像を掻き立てられる歌詞である。では、宇宙の風とはいったい何だろうか？作詞の草野氏が生み出した、空想の産物なのだろうか。一否、宇宙に「風」は実在している。そして、この「風」に乗り宇宙を自由に飛び回る船が存在するのである。本稿では、この宇宙帆船について日本が世界に誇る技術と、その最高難易度とも呼べる軌道設計に関して筆者が取り組んできた研究成果を紹介する。

## 光の力で進む船、ソーラーセイル

帆船とは、帆に風を受けて推進力を生み出す船のことである。そして宇宙にも、大きな帆を広げて燃料を使わずに推進力を生み出す帆船が存在する。しかし、宇宙空間には大気が存在せず、また大気がなければ風など吹かないことは周知の事実である。では、この宇宙帆船が受ける「風」とはいったい何だろうか？それは、太陽の光である。アーサー・C・クラークの「The Wind from the Sun」を始めとして、この太陽の光を

原動力とする宇宙帆船は数多くのSF小説にも登場している。こうした話を聞くと、まるで夢物語のように感じられる方も少なくないであろう。しかし、この概念は研究者や作家の空想などではなく、既に実在し活用されている技術なのである。

高校物理を学んだ読者であれば、光が波動と粒子の2つの性質を持つという話を思い出していただきたい。この光の粒子は光子 (photon) と呼ばれ、運動量をもって空間を飛行する。そして光子が物体に衝突すると、運動量交換に伴う圧力が生じる。この原理を応用し、宇宙空間で巨大な帆を広げ、太陽の光の圧力を浴びて推進力を生み出すのが、宇宙帆船=ソーラーセイル\*1である。そして、この光子加速による惑星間飛行に世界で初めて成功したのが、JAXAが開発したIKAROSである。IKAROSは2010年に種子島宇宙センターより打ち上げられ、宇宙空間で約14×14mのソーラーセイルを広げ、そして実際に光の力を使ってその軌道を変えてみせた。

## 日本独自の技術であるソーラー電力セイル

IKAROSが実証した技術は、実は光子加速だけではない。IKAROSのソーラーセイルには、紙のように薄くしなやかな薄膜太陽電池が多数貼られており、これを使った太陽光発電も同時に行った。ソーラーセイルの「薄くて大きい」という性質

\*1 こうした説明において、しばしばソーラーセイルの動力源を太陽風と混同されることがあるが、これは誤解である。太陽風とは太陽から吹き出すプラズマ(電離した荷電粒子)のことであり、ソーラーセイルが受けるのは質量を持たない「光」そのものである。なお、太陽風、すなわちプラズマとの相互作用を利用する推進方法は別に存在し、磁気セイルやE-sailが挙げられる。

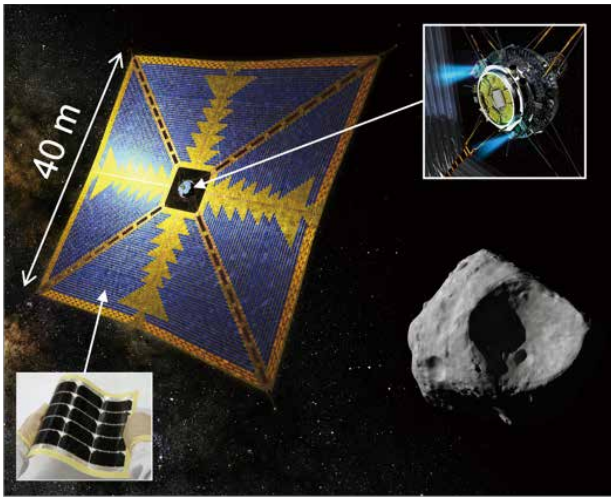


図1：ソーラー電力セイル探査機OKEANOS。

を活かすことで、軽量ながらも大電力発電が可能という第二の機能を持たせたのである。このコンセプトはソーラー電力セイルと呼ばれ、日本が独自に考案した、ソーラーセイルの発展形態である。

ソーラー電力セイルによって初めて可能となるのが、太陽から遠く離れた領域におけるイオンエンジンの運転である。イオンエンジンとは、電気エネルギーを利用して高速で推進剤を放出する電気推進の一種であり、弱い推進力ながらも非常に優れた燃費を誇るという特徴がある。「はやぶさ」、「はやぶさ2」はイオンエンジンを用いた探査機の代表例である。イオンエンジンは莫大な電力を消費するため、運転可能な太陽距離に制限がある。そのため、従来の太陽電池パドルを用いた探査機では、火星から木星の間あたりを限界領域としていた。しかし、太陽電池の面積/質量効率を劇的に向上させるソーラー電力セイルを用いれば、木星～土星圏においても大電力イオンエンジンの運転が可能となる。

JAXAではIKAROSの成果を継承しつつ、ソーラー電力セイルを使って本格的な探査に臨むOKEANOSの検討を進めてきた。OKEANOSは、ほぼ全面を薄膜太陽電池で覆った約40×40 mのソーラー電力セイルを広げ、高比推力イオンエンジンを用いて木星トロヤ群小惑星の探査を行う構想である(図1)。OKEANOSはオプションとして木星トロヤ群からのサンプルリターンも可能であり、現代でこれを実現する技術はソーラー電力セイルの他にない。

## 超小型ソーラー電力セイルが拓く新しい探査

IKAROSからOKEANOSへ、そしてその将来像において、ソーラー電力セイルの構想は大型化の道を辿ってきた。一方で、ソーラー電力セイルは超小型宇宙機においても極めて有効な手段となり得ることが、特に最近の研究で判明してきている。一般に、宇宙機は小型化すればするほど、推進剤や電源といった搭載可能なリソースに厳しい制約が課される。同様の理由で、超小型宇宙機用のイオンエンジンも、大型クラスのそれと比較して性能が低い傾向にある<sup>\*2</sup>。そのため、超軽量なシステムで大きな電力と推進力を生み出すことのできるソーラー電力セイルは、超小型宇宙機と相性が良いのである。低コスト・短時間で開発可能な超小型宇宙機に優れた推進力と燃費を付与し、その到達可能領域を拡大することは、

高頻度な深宇宙探査による持続的宇宙開発や、多数の超小型宇宙機群を用いた新たな探査方式の開拓といった発展性が期待される。筆者を含む研究グループでは、この超小型ソーラー電力セイルによる新しい世界の開拓を目指した研究開発に取り組んでいる。

一例として、50 kgの超小型ソーラー電力セイルによって、ケンタウルス族と呼ばれる木星以遠の小天体への軌道設計を行った例を図2に示す[1]。現在において50 kg以下の探査機で近地球領域を脱した前例がないことから、ソーラー電力セイルがいかに強力な手段となるかお分かりいただけるだろうか。なお、この研究ではOKEANOSと同様に、イオンエンジンのみを推進力として用いている。次節からは、さらにソーラーセイルによる光子加速も併用した、より発展的な研究成果について紹介する。

## ソーラーセイル×イオンエンジンによるハイブリッド推進

IKAROSはイオンエンジンを搭載しておらず、光子加速のみを主推進力としていた。一方、OKEANOSが訪れる外惑星領域では太陽光の圧力は極めて微弱であり、実質的にイオンエンジンのみを推進力として用いる設計であった。実際、これらの推進方式はそれぞれ一長一短があり、得意とする領域も異なっている。例えば、ソーラーセイルは推進剤の消費量が完全にゼロで済む反面、巨大な帆を広げる必要がある割に得られる推力が小さく、目的地に到達するまでに多大な時間を要する。一方、イオンエンジンは(ソーラーセイルと比較すれば)そこそこ大きな推進力を持つ反面、大きな軌道変更を伴うミッションでの推進剤消費量は決して小さいものではない。

そこで筆者が目をつけたのが、両者の併用によるハイブリッド推進である。ソーラーセイルと電気推進それぞれが、互いに燃費と推進力を補填し合うことで、高機動力・超高燃費の推進システムが実現できるのである。前述の通り、OKEANOSもハイブリッド推進を謳ってはいたものの、その特性を最大限に活かす設計とはなっていなかった。また、海外ではハイブリッド推進を提案し研究した論文がいくつか見受けられるが、ではいったいどうやって制約の厳しいソーラーセイルにイオンエンジンを載せ大電力を賄うのか...といった問い

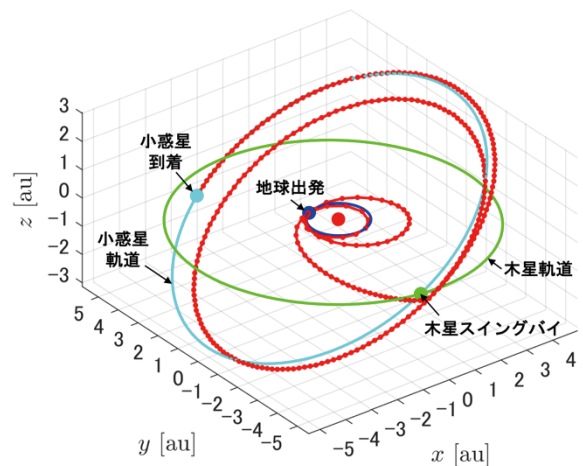


図2：50 kg超小型ソーラー電力セイルによるケンタウルス族探査の軌道例。2回の地球スイングバイによる増速と、木星スイングバイによる軌道傾斜角変更を経て、約20年かけて小惑星2019JZ5へランデブーする。なお、最新の研究では11年以下で到達可能な解も見つかっている[2]。

\*2 燃費の指標を表す比推力について、「はやぶさ」以上のサイズの探査機では3,000～7,000 秒ほどの性能が実現可能だが、超小型宇宙機では1,000～2,000 秒程度が一般的である。



には実用的な解が示されていない。実際、ハイブリッド推進では軌道・姿勢に加えて発電や通信の環境が強くカップリングし、単に2種類の推進力を出せるとして導いた解に実現性はない。ソーラー電力セイルという、ハイブリッド推進を体現する日本独自の技術に根差したシステムベースの研究である点が、筆者が取り組む研究の大きな特徴の一つである。

## ハイブリッド推進のシステム及び軌道設計

光子加速と電気推進は、いずれも長期間に渡って連続的に推進力を生み続ける連続低推力推進に分類される。では、これらの推進機関を使って探査機を目的地へと導く「軌道設計」の問題を考えてみよう。目的地は月でもよいし、火星でもよい。「はやぶさ」、「はやぶさ2」が好きな読者は、小惑星を選んでよい。あるいは、ラグランジュ点まわりのハロー軌道といった答えを返す猛者もいるだろうか。目的地を決めたら、はじめに出発日を決める必要があるだろう。ひとたび宇宙空間へ飛び出せば、今度は推進力を使って探査機の軌道を操作してやる必要がある。ここで決めるべきは、推進力の大きさと向き、そしてタイミングである。連続低推力なので、決めるべきは1点の時刻のみにおいてではない。とある時刻の推進力を定めたら、その1日後は？1秒後は？0.1秒後は...？

そう、低推力軌道設計の問題では、定めるべきパラメータが文字通り無限に存在する。適当に選んだパラメータで目的地に到達することなど、十中八九ないと言っていいだろう。仮に運良く到達できたとしても、出鱈目に長い時間を要するか、非現実的に莫大な推進剤を使ってしまった後である。さらに、2つの推進力が連成するハイブリッド推進ではこれだけでは済まない。ソーラーセイルの推力は、太陽に対する帆の向きで決まる。帆の向きが変われば、これに貼った太陽電池が生み出す発電量が変わる。発電量が変われば、イオンエンジンの推力も変わる。イオンエンジンの性能が欲しければ電力を増やす必要があるが、あまりにソーラーセイルに太陽電池を貼りすぎると光子加速の性能が落ちてしまう...といった具合に、厳しい依存関係を考慮しなくてはならない。

こうした難解な問題に解を与える上での有効な手段が、最適化というテクニックである。例えば、推進剤消費量などの最小化(あるいは最大化)したい指標を選び、これを評価関数に設定する。そして、「運動方程式を満たすこと」という必須項目に加えて、「出発日はいつであること」「推力はいくら以下であること」といったミッション固有の要求を制約条件として与える。こうして軌道設計問題を制約付き最適化問題へと組み換え、非線形計画法によって解くという方法が、現在最も広く使われているアプローチの一つである。

また、ソーラー電力セイルが活躍するのは外惑星圏といった遠方領域だけではない。アルテミス計画の進展に伴い、CubeSatの放出機会を活用した月以遠の探査構想が世界中で盛り上がりを見せている。こうしたミッションでは、探査機に太陽・地球・月の重力が同時に作用する複雑な四体問題を形成する。この力学系は数学的な厳密解が存在しないことで知られており、そこでさらにソーラーセイルとイオンエンジンを複合利用する問題は、軌道設計においても最高クラスの難易度を誇ると言ってよいだろう。この問題の攻略法の一つとして図3に示すのが、生物進化を模した発見的解法による大域的最適化である[3]。マルチスレッド環境を、独立の生態

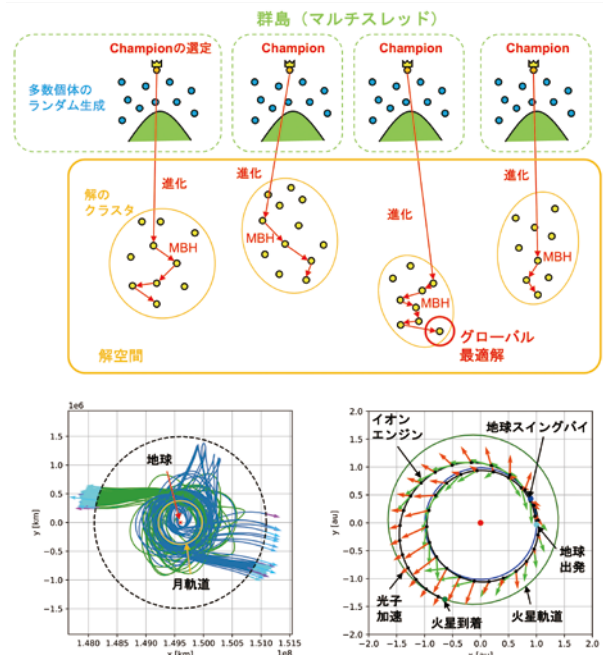


図3：進化的手法を用いた大域的軌道最適化アルゴリズム(上)。月周回有人拠点(Gateway)から放出され惑星間空間へ脱出する軌道例(左下)。地球スイングバイを経て火星へ到達する軌道例(右下)。

系を持つ群島に見立て、各々の島で最も優れた生物個体(=設計解)を進化させる(=最適化する)ことで、膨大な設計解空間の中で最も優れた最適解を導くというものである。これらの研究を通して、ソーラー電力セイルの高機動力・超高燃費を活かして実現される軌道が次々と見いだされており、同時にハイブリッド推進の軌道設計法の体系化、ならびに多くのミッションで汎用的に活用可能な軌道設計ツールの整備も進めている[1-4]。

## おわりに

本稿で紹介したソーラー電力セイルによるハイブリッド推進を扱う問題は、光子加速と電気推進という2つの連続低推力が複合作用し、軌道設計においても極めて難易度の高い部類に入るものと考えている。ここで培った軌道設計法はソーラー電力セイルという枠を超えて、様々なミッションに応用可能なものである。また、ソーラーセイルやイオンエンジン、あるいは超小型宇宙機による深宇宙探査は、いずれも日本が最先端を切り拓いてきた分野である。先人たちが培ってきた技術を受け継ぎ、次世代へと繋ぎながら、日本の強みを活かして人類の到達領域を遙か先へと広げていきたい。

最後に、本研究ならびに私の研究活動は、恩師である川口淳一郎教授と津田 雄一教授をはじめ非常に多くの方々を支えられてきたものであり、この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

### 参考文献

- [1] Takao, Y., Mori, O., Matsushita, M., and Sugihara, A. K., Solar Electric Propulsion by a Solar Power Sail for Small Spacecraft Missions to the Outer Solar System, Acta Astronautica, Vol. 181, pp. 362-376, 2021.
- [2] Takao, Y., Mori, O., Matsushita, M., Nishiyama, K., Tsukizaki, R., Tabata, K., Ozaki, N., Kubo, Y., and Funase, R., A Rendezvous Mission to Outer Solar System Bodies Using a 100-kg-class Solar Power Sail, 6th International Symposium on Space Sailing, New York, USA, 2023.
- [3] Takao, Y. and Chujo, T., Deep Space Exploration Missions by a Micro Solar Sail Using Hybrid Propulsion, 33rd International Symposium on Space Technology and Science, Online, 2022.
- [4] Takao, Y. and Chujo, T., Delta-V Earth-Gravity-Assist Trajectories with Hybrid Solar Electric-Photonic Propulsion, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 45, No. 1, pp. 162-170, 2022.

## 2023年オーストラリア気球実験

2023年2月中旬から5月中旬まで、オーストラリア中央部のアリススプリングスを拠点に3ヶ月間滞在し、気球実験を実施しました。

オーストラリア気球実験は「24時間規模の長時間飛行」「南天の観測」「飛行終了後の実験装置の陸上での回収」など、日本国内では地理的制約などのため実施が困難な気球実験を実現できる重要な機会です。宇宙科学研究所では1983年以降何度もオーストラリア気球実験を実施しており、近年では2015年と2018年に実施しました。これらに次ぐものとして当初は2021年の実施を想定していましたが、コロナ禍に伴い2年延期され、今年の実施となりました。

2018年から5年の間隔が空いたことで、運営母体である大気球実験グループの職員は半数が入れ替わり、オーストラリア側の監督官庁も部署によってはメンバーも手続きも一新されるなど、良くも悪くも単なる前例の踏襲に留まらないフレッシュな対応が必要となりました。コロナ禍やロシア・ウクライナ情勢などの昨今の世界情勢に伴い、円安やヘリウムガスのさらなる高騰などの影響も少なからず受けました。それでも、これまでの長年の協力で培われたオーストラリア関係機関などの強固な信頼関係にも支えられて、以下で述べるように、計画した2つの実験を実施することができました。

4月30日、気象を含む実験実施のための全条件が整い、「エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測」を目的とするB23-01実験（通称GRAINE）を実施しました。アリススプリング

スから放球された気球は予定通り24時間以上をかけて東方に千km以上飛行し、観測を終え着地した機器などはオーストラリア大陸東部に設けたダウンレンジ局ロングリーチの近郊で無事に回収されました。

5月11日には、「はやぶさ型カプセルの遷音速・低速域における空力安定性評価」を目的とするB23-02実験（通称SRC）を実施しました。この実験ではカプセルの一部が（パラシュートで緩降下する通常の実験機器よりも）高速で降下することから、安全上の配慮のため、無人の砂漠内に実験エリアを確保し、実験を実施しました。この実験に関しても、計画通りのフライトを実現でき、カプセルを含む全機器の回収も完了しました（下の記事を参照）。

気球実験は、最先端の宇宙科学研究の場であるとともに、若手や学生がミッション遂行の本番を経験できる貴重な場でもあります。今回も研修や技術交流などを目的に、JAXAの様々な部署から計10名以上の参加がありました。また、各実験チームの中核を担っている大学院生や若手研究者も多く、数ヶ月間の現地滞在の期間中に限っても、めきめきと成長していく姿を見ることができました。

実験実施にご協力いただきました関係者の皆様に深く感謝します。（福家 英之）



「放球直前の大気球B23-01号機（手前で吊られているのが観測機器）」

## 大気球を使ったサンプルリターンカプセル(SRC)の飛行試験

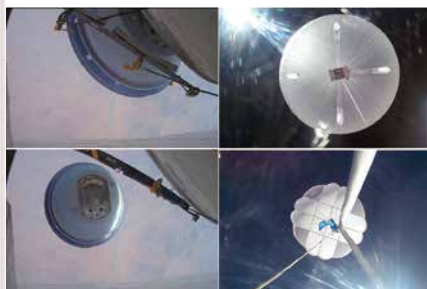
2023年オーストラリア気球実験で飛行した気球の一つに、将来のサンプルリターン(SR)計画を支える重要技術を実証する実験機が搭載されていました。ISAS/JAXAが、「はやぶさ」で世界に先駆けて実証したSR計画は、将来の惑星探査の重要な柱の一つとなっています。それを支える技術として、サンプルリターンカプセル(SRC)があります。遠くの天体で獲得したサンプルを搭載し、猛スピードで地球大気圏に突入し、大事なサンプルを無事に送り届けるのがその役目です。今回の大気球実験では、将来のSR計画で、より多くのサンプルを持ち還るために大型化したSRCの飛行試験を行いました。開発したSRCの実験機は、「はやぶさ」のSRC

と相似形状ですが、直径は40cmから60cm、質量は16kgから45kgと大きくなっています。SRCが大きくなることは、良いことばかりではありません。高速で飛行するカプセルは空気をうけて激しく運動します。重さや大きさが異なると発生する

空気力や運動速度も異なるので、安定して飛行できるかどうかを予測するのは簡単ではありません。また、SRCが重くなることで、軟着陸のために開くパラシュートにかかる荷重も大きくなります。地上試験や数値解析を駆使し、SRCは開発されますが、最終的には、実際に飛行させて確認することが重要です。その手段として、大気球は最適です。高高度から自由落下させることで、SRCの最終段階の飛行環境を完全に再現できるからです。

本試験では、大型化したSRC実験機を大気球で高度39kmまで運び、そこから自由落下させ、マッハ数1を超える遷音速領域から亜音速領域までの安定飛行と高度約14kmでのパラシュートの展開を実証しました。豪州での実験では、実験機を陸上回収することもメリットです。GPSと衛星通信を使って着地位置を特定し、実験機を回収し、その中に記録されていた飛行データや画像を取得しました。図はその画像の一部で、実験機が投下される様子、パラシュートの開傘の様子が確認できます。本試験では、予定していたすべてデータを取得でき、大成功と言える結果でした。本試験で得られた知見・経験を、将来のSRCの開発に活かすべく、詳細なデータの解析を進めていきます。

本試験のために尽力いただいた、大気球実験班、豪州当局をはじめ、全ての関係者の皆様に、この場を借りて感謝申し上げます。（山田 和彦）



図：(左上・左下)カプセルが投下される様子。(右上)カプセル投下直後に、カプセルから撮影された気球。(右下)カプセルから撮影したパラシュートの様子。



## SLIMの先の月面探査構想

2022年11月16日にSLSロケット初号機によって打ち上げられたアルテミス1ミッションの成功により、月面での有人活動を目指す米国のアルテミス計画が本格的に実行されつつあります。日本は2019年10月にアルテミス計画への参加を表明し、日本の宇宙飛行士を月に送るための活動の一環として、与圧ローバで何を行うかというミッション定義活動等が開始されています。

有人活動の一方で、月面は一級の成果が期待できる科学の場でもあります。「アルテミス計画への参画により我が国の月面活動の機会が拡大していくことを念頭に、当該機会を活用

して新たな知の創造につながる世界的な科学の成果を創出することを旨とする」という政府方針に基づき、地球とは異なる環境を活かした月面での低周波電波干渉計(月面天文台)や、地震大国日本の強みである地震計を月に設置し、月内部構造の把握を目指す月震計ネットワーク、月



50kg級ローバの地上試験モデル。

の衝突溶融岩等の試料のその場分析や地球への帰還を行い、太陽系や地球-月系の初期状態や進化を理解する月面サンプルリターンといった魅力的な科学の検討が進められています。

上記のような月面科学プログラムを実行する際に非常に重要なことは、今後の宇宙探査につなげることです。ただ単に観測機器を開発し持っていただけでなく、月面や太陽系探査で広く利用可能な技術を獲得し、我が国の探査の自在性を拡張していくことが必要です。我が国は、月表面での本格的な探査は未経験ですが、月面探査ローバ等の重力天体の表面探査技術を獲得していくことで、月探査はもちろん、将来の火星探査や惑星衛星の探査につながります。

有人探査では、宇宙飛行士が現場に行けばなんでもできるという考え方がちですが、無人ロボット技術を積極的に使うことにより、アポロ時代から格段に進歩した新しい探査の姿を見せなければなりません。そのためには、無人探査において複数の科学観測を並行して進めながら、必要な技術を段階的に獲得することが不可欠であり、それは有人探査の発展にもつながると思っています。

2023年度に月面ピンポイント着陸実証機「SLIM」が打ち上げられることになっており、我が国の本格的な月面探査の扉が開かれようとしている中、その次や更に先を見据えて理学者・工学者が一体となって研究開発を進めていきたいと思っています。

(佐伯 孝尚、森 治、吉光 徹雄)

## 子どもから大人までが宇宙科学に触れた1日に — 宇宙科学エトセトラ —

2023年5月6日に相模原市の相模女子大学グリーンホールで、「宇宙科学エトセトラ—みんなの宇宙深体験パピリオン—」を開催しました。今年は、毎年開催している講演会に加え、子どもも楽しむことができるミニイベントを同時開催しました。

講演会に先立ち、藤本 正樹副所長が「講演は大人向けなので、これまでは来場された子ども達がしんどそうでした。今年はいろいろな出し物を企画したので、ぜひ楽しんで行ってください。講演会では質問を受け付け、皆さんとやり取りできる会にしたいと思っています。」と挨拶しました。

続いて、山田 亨教授が「138億年の宇宙の姿はどこまでみえた

のか」を、佐伯 孝尚教授は「月に行って何をしよう? アルテミス計画と日本の月面探査のお話」というタイトルで講演しました。また、兵頭 龍樹国際トップヤングフェローは「太陽系の生まれ育ちは? リュウグウが語ること、最新理論から考えること、系外惑



講演会の様子。

星との比較」について話しました。

講演後のQ&Aコーナーでは、参加者からの質問に講演者が答えた他、地球外物質研究グループの坂本 佳奈子主任研究開発員が、小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウのサンプルの分析の進捗状況を説明しました。

一方、ロビーでは、宇宙教育センターとMMXプロジェクトが協同して開発したデジタル教材の体験やプロジェクションマッピング、ロケットや探査機の模型の展示などのブースを設置。子ども達が楽しそうに絵を描いたり、模型に触れたりしていた他、親子で宇宙研の研究を紹介するパネルを見たり、ゲームに挑戦したりするなど、親子連れでにぎわいました。

今回は初めて子ども向けのブースを設けたことで、子どもから大人までが宇宙科学に触れ、親しむことができるイベントとなりました。

(山下 真規恵)



壁面とM-Vロケットの模型に投影したプロジェクションマッピング



水星磁気圏探査機「みお」の模型を回せた!

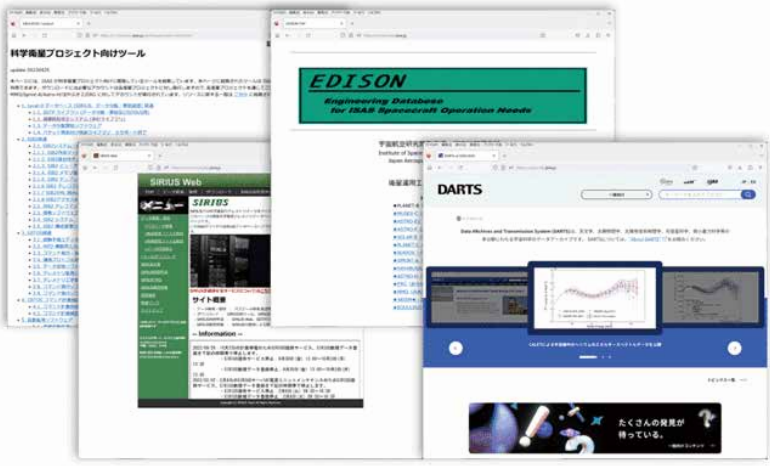
# 匠の集団

— 科学衛星・探査機のことなら  
おまかせください —

第13回

## 地上で衛星・探査機ミッションを支えます

科学衛星運用・データ利用ユニット(通称、C-SODA)は、宇宙科学研究所の衛星・探査機が共通に使用する「地上系システム・設備」の利用サービスの提供、新規サービスの開発等を通して、プロジェクトチームの科学衛星・探査機の運用やデータ処理・アーカイブ・公開を支援することが主な職務です。C-SODAは2008年度に設立された組織で、科学衛星・探査機からユーザーにデータが届くまで、地上系システムの全体像の見通しを良くすることで、より効率良く、より信頼性の高い地上系を実現できるようにすることがその設立の理念でした。一口に地上系システムといってもその範囲は多岐に及びますが、衛星・探査機と直接通信する地上のアンテナ(地上局)設備は、JAXA全体の共通設備として追跡ネットワーク技術センターの管轄です。衛星・探査機への/からのコマンド/テレメトリーを各地上局と相模原キャンパスの間で送受信するためのデータ伝送経路の途中から相模原キャンパス側をC-SODAが管轄しており、科学衛星・探査機に共通のものとして、衛星・探査機の管制やミッションデータ処理に必要とされる各種の設備・ソフトウェアを維持・開発・サービス



C-SODA各種提供サービスのウェブページ。

提供しています。

C-SODAが提供する地上系サービスの大きな特徴は、科学衛星・探査機共通に使うことができるように考えられていることにあります。例えば、衛星・探査機の管制ソフトウェアとして、汎用衛星試験運用ソフトウェア(GSTOS: Generic Spacecraft Test and Operations Software)を提供していますが、GSTOSは科学衛星の開発中の試験および運用に共通に使用することを目的として開発され、衛星・搭載機器の違いは、衛星情報ベース(SIB2: Spacecraft Information Base version 2)の内容の置き換えによって吸収できるよう設計されています。現在では、衛星・探査機側がJAXA標準に制定されている科学衛星等通信設計基準テンプレート(SCDHA: Standard Communication and Data-Handling Architecture)に準拠しさえすれば、SIB2を適切に整備することで、GSTOSを使って試験や運用を実施できるようになりました。実際、GSTOSが衛星・探査機運用に初めて適用された「ひさき」以降に開発された全ての科学衛星・探査機がGSTOSを利用しています。

また、衛星・探査機から取得されたテレメトリーデータは、全科学衛星・探査機共通のテレメトリー・データベースシステム(SIRIUS)に集約・蓄積されており、ユーザはSIRIUSにアクセスしさえすればテレメトリーデータを参照することができますようになってきました。更にエンドユーザが利用可能なレベルに処理されたデータについては、工学値データベース(EDISON: Engineering Database for ISAS Spacecraft Operation Needs)や科学データアーカイブ(DARTS: Data ARchives and Transmission System)に蓄積されており、科学衛星・探査機の軌道上状態を解析する衛星・探査機開発メーカーの担当者やミッションデータを利用する研究者などのエンドユーザのデータアクセス先を一元化しています。こうした処理済データは、かつては各プロジェクトで独自のデータフォーマットで提供されていましたが、現在では国際標準フォーマットに従ったデータが用意されるようになってきたことから、ミッションの垣根を越えて横断的に取り扱うことが容易になってきました。また、世界的にはオープンサイエンス化の流れもあります。こうした状況の変化から、エンドユーザへのデータ提供システムも、専門の研究者向けだけではなく、幅広いユーザにもデータが利用されるように改善していくことも検討しています。

C-SODAは共通サービスを企画・提供する部署なので、各科学衛星・探査機プロジェクトチーム、追跡ネットワーク技術センター、深宇宙追跡技術グループ、など、多くの関連部署と常に丁寧な調整をする必要があることから、地上系に関する情報のハブにもなっています。こうした部署としての特性を最大限活かし、プロジェクト横断的な視点をもって、幅広く地上系に関する専門家の皆さんと協力しながら、地上系の将来を切り開いていきたいと考えています。運用中・開発中・将来計画を問わず、科学衛星・探査機の地上系システムやデータのアーカイブ化などについて、何かあればお近くのC-SODA関係者にご相談下さい。

科学衛星運用・データ利用ユニット長：  
篠原 育(しのはらいく)





崇城大学工学部  
宇宙航空システム工学科

下田 孝幸 (しもだ たかゆき)

## JAXA生活34年を振り返って

平成元年のNASDA入社以来、今で言う輸送部門、研開部門、有人部門と渡り歩き、最後の10年は社内公募で辿り着いた宇宙研で定年となりJAXA生活を終えました。

この間、様々なプロジェクトに関わりましたので、成功や失敗の思い出を徒然なるままに書き連ねてみようと思います。

一番の思い出は、古い話になりますが、プロジェクトの立ち上げから打上げ、そして失敗とすべてを経験した極超音速飛行実験(1992-1996)です。NALとNASDAの共同プロジェクトとして実施し、再突入した機体を海に沈めたことで有名になりましたが、飛行そのものは大成功の実験でした。海に沈んだのはパラシュートのライザが低周期の振動で破断したためでした。審査会では、フローテーションバッグ放出時のシャープエッジとの干渉までは指摘できたのですが、この問題には気付くことが出来ず、悔しい思い出として残っています。この実験はHOPE開発のための実験と位置づけられ、当時NALであった現在の調布にNAL/NASDA共同チームとしてのHOPE事務所を置いて行いました。このときはロケットもJ1ロケットというISASとNASDAのロケットを組み合わせたロケットで、全体で3機関協調のように取り上げられていました。2月12日の打上げから3月25日の最終報告まで毎日徹夜のような状況で不具合原因調査、宇宙開発委員会報告に明け暮れ、それが終わった後3月29日に、1年間の留学に旅立ったのでした。

留学先は豪州クイーンズランド大学(QLD)でした。もともと飛行機少年で、スペースシャトルに憧れて、HOPEをやりたくてNASDAに入社したこともあり、NASA ジョンソンスペースセンター(JSC)でシャトル関連の研修を希望してJSCにはOKをもらっていたのですが、最後にNASAのHQに却下され、HYFLEXの飛行解析に興味を持ってきていたQLDへ行くことになりました。

時間が戻りますが最初に関わったプロジェクトが軌道再突入実験(-1994)でした。詳細設計から関わりましたが、一番の思い出は、載せるロケットがH-IIの1号機だったことです。射場での不具合を繰り返し、打上げに間に合わないかも知れないという状況の中、H-IIの成功が最優先のNASDAにとってただの実験機を待っているわけにいかず、間に合わないときのダミーペイロードまで用意すると噂がある中、無事打ち上げることが出来ました。実験は成功しましたが、打上げ時のブロックハウスの中では本来お客さんであるはずのペイロード担当席で肩身の狭い思いをしていました。

研開本部では再使用型輸送機の研究としてSSTO、TSTOを夢見て極低温複合材タンクの研究をしていましたが、当時は輸送系の研究をする人が少なく、ここでもすこし肩身の狭い思いをしていました。このときはプロジェクト支援としてGXロケットの極低温タンクの開発に入れ込み、富岡での耐圧試験にAE計



10年間連れ添ったアーク風洞と著者。

測装置を車で持ち込んで参加したりしていましたが、その甲斐無くGXロケット開発が中止されたことは残念な思い出です。

その後有人本部に異動して「きぼう」の開発に関わったときにはハードウェアはあらかじめ出来上がっており、それをスペースシャトルに乗せて打ち上げるための構造検証が主な仕事でした。シャトルと「きぼう」、ISSと「きぼう」の構造適合性を検証して、それをNASAの構造担当に認めてもらうために何度もヒューストンに出張して議論していました。おかげでNASAの構造担当チームとはいい仲を築くことが出来たことが思い出となっています。

宇宙研のプロジェクトに最初に関わったのは「はやぶさ」の回収運用でした。その頃「きぼう」3便の打上げが終わって一段落していたところでしたが、併任先のJSPECの仕事として回収運用隊の情報連絡班長を言いつけられ、運用隊の規程作りからロジから危機管理から雑用係として走り回りました。おかげで歴史的な回収成功に立ち会うことが出来、少しでも回収成功に寄与できたなら嬉しいことでした。

その後、セキュリティ統括室に異動となり、副室長として3年過ごしました。エリアセキュリティを担当しており、ISASの高い塀と忍び返しを早く付けるように急かしたのは私です。大変不満もあったようで今更ながら申し訳ありません。

セキュリティ統括室の顧問をされていたのが杉田 和博さんで、相模原はもちろん、種子島や内之浦のセキュリティ視察に同行しましたが、現役を引退されてなお大変お元気で、鹿児島空港から内之浦までのタクシーで運転手の横で居眠りしていたら注意されたりしていました。その後、第二次安部内閣から菅内閣にいたるまで官房副長官を務められたような方と親しく過ごす時間があつたのはこの上なき財産です。

その後、社内公募で宇宙研に異動し、アーク風洞の運用を中心として、「はやぶさ2」カプセル、MMXカプセルの開発に携わりました(写真はアーク風洞をバックにした著者)。「はやぶさ2」は詳細設計も終わるところでしたが、製造から打上げ、そして回収成功までも見届けることが出来てよかったです。MMXカプセルは立ち上げから関わりました。ASTRO-Hの事故を受けて宇宙研には重すぎる課題を負ったように思えたスタートでしたが、なんとか持ちこたえていると思います。JAXA全体にも言えますが定員の割に仕事之余りにも多いことは前から言われていますが、未だに解決策が見いだせていないようです。今後のJAXAがその問題にどう解決をつけるかが今後を見通す鍵になるかも知れません。

このあたりで筆を置こうとしたところでH3失敗のニュースが飛び込んできました。また難しい時代になりそうですが皆様体に気をつけて頑張ってください。

## 科学衛星のデータをたくさんの人に 使ってほしい

### DARTS ウェブサイトをリニューアル

— 宣伝したいことがあるそうですね。

はい。2023年4月に宇宙科学のデータアーカイブDARTSのウェブサイト (<https://darts.jaxa.jp/>) をリニューアルしました! (表紙参照) 一般の人向けのトップページをつくり、科学衛星のデータを簡単に閲覧できるコンテンツをピックアップして紹介しているので、ぜひアクセスしていただきたいのです。

— DARTSとは? また、なぜリニューアルを?

衛星が観測したデータは地上のアンテナに送られてきます。アンテナが受信したデータは0と1が並んでいるだけで人には理解できないので、さまざまな処理を行って画像などに変換します。そのデータを保管・公開しているのがDARTSです。

これまで世界中の研究者がDARTSのデータを使い、さまざまな科学的な成果を上げてきました。しかし、DARTSは研究者向けにつくられたものなので、一般の人が以前のウェブサイトアクセスしても、ほぼ使えませんでした。一方で、宇宙研の研究活動に興味を持ってくださっている人は多く、最近では宇宙ビジネスも盛んになってきて、衛星が取得したデータにも関心が寄せられています。そこで、一般の人にもDARTSのデータを使ってもらえるようにウェブサイトを整備しよう、となったのです。

— おすすめのコンテンツは?

まずは「ギャラリー」です。きれいな画像などを選んで紹介しています。「太陽カレンダー」もおすすめです。太陽の画像が取得日ごとにカレンダー形式で表示されているので、誕生日や記念日の太陽画像を選んで見ることができます。「JUDO2」は、さまざまな天文衛星が取得した画像を天球に貼り付けて表示しているツールです。Googleマップの天球版といえるもので、宇宙の探検を楽しんでいただけます。宇宙研のデータポリシーに従っていただく必要がありますが、原則としてDARTSのデータは無償で利用できます。営利目的でもいい。加工してもいい。ぜひ皆さんのアイデアで、DARTSのデータを自由に使ってください。

### 物理の先生と出会う

— 大学院生のときは宇宙研でX線天文学の研究をしていたそうですね。

高校生のときに通っていた塾の物理の先生の教え方がとても上手で、問題がどんどん解けていくのが楽しくて、物理が大好きになりました。しかも、日常の現象を物理と絡めて考えるようになったのです。ピザ生地を回して伸ばしているのを見ると、どの

科学衛星運用・データ利用ユニット

### 吉野 良子 (よしの りょうこ)

東京都出身。東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻博士課程修了。2010年、JAXA入職。地球観測研究センターセンサ研究室、気象庁(出向)を経て2017年より現職。



くらいの遠心力がかかっているのだろうか、走る電車の中を飛んでいる虫を見ると、あの虫は慣性の法則が成り立っているのだろうか、と。そして、大学では物理、しかも子どものころから好きだった宇宙を学ぼうと考えるようになりました。高校に進学したころには小学校の先生になろうと決めていたのですが。

宇宙を学ぼうと大学に入ったものの、卒業研究は原子核物理学を選びました。このときもまた、いいなと思う先生がいたのです。X線天文学は大学院からです。宇宙研に見学に来たとき、ちょうどX線天文衛星「すざく」に載せる望遠鏡の地上較正試験を行っているところで、作業している大学院生の皆さんが生き生きして楽しそうなのを見て、これだ! と決めました。

### 人の生活に関わる仕事をしたい

— なぜJAXAに?

X線天文学の研究は、とても楽しく好きでした。人類にとって大切なことだとも思います。しかし、人の生活からは遠い。もっと人の生活に関わる仕事、役に立つ仕事をしたいという思いが大きくなってきました。宇宙が好きなのは変わっていませんので、地球観測衛星に関わる仕事をしたいと考えたのです。

当時のJAXAの一次面接では最初に、応募者から面接官に質問する時間がありました。私は、「JAXAは地球観測衛星を打ち上げて二酸化炭素の濃度を観測しているが、観測するだけでは二酸化炭素の排出削減にはつながらない。どういう取り組みが必要だと考えますか」と質問しました。すると「あなたはどのように考えますか」と質問され、私は「観測結果を分かりやすいかたちで示すことが必要だ」と答えました。そのやり取りの中で、自分がやりたいのはそういうことなんだ、と気付かされました。

— 地球観測研究センターセンサ室、気象庁出向を経て、衛星運用・データ利用ユニットへ。

気象庁出向後、出産・育児休業を経て復職するとき、相模原キャンパスか東京事務所での勤務を希望しました。仕事の内容より、子育てができる環境が優先でした。ですが、今やっている衛星データの利用促進は、就職の面接で気付いた、自分がやりたいことにつながっているの、結果的にはよかったと思っています。

— 進路選択に関するイベントで講演されることも多いようですね。どのようなアドバイスをされるのですか。

流れに身を任せてもいいのではないかと、ということを話したりします。私自身、時々偶然の出会いがあり、そのたびに選択して、今があります。

### 編集後記

気球実験をやっていると、この時期は毎年、北海道に出張で、久しぶりに梅雨の季節に居合わせています。豪州では例年になく雨に見舞われたものの、やはり空気は乾燥していて、帰国の際には湿った空気に懐かしさを覚えたものでした。

今月も、しっかりと素敵なニュースのお届けです。(斎藤 芳隆)



ISASニュース No.507 2023年6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 isasnews@isas.jaxa.jp

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/>