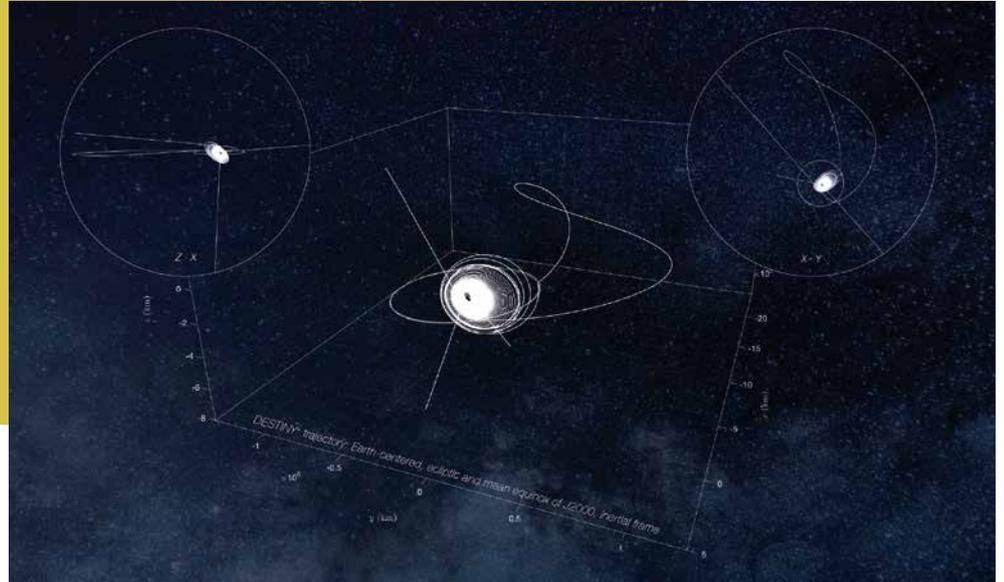


## DESTINY+の 地球近傍軌道の例

DESTINY+はイオンエンジンを連続的に用いて地球周回軌道から徐々に軌道高度を上げていく。太陽潮汐力をも駆使しながら2回の月スイングバイをこなし小惑星(3200) Phaethonへ向けてようやく深宇宙へ飛び立つ。軌道設計のワザを駆使することで、小型のイプシロンSロケットであっても深宇宙探査が可能になるミッションである。2024年度打上げ予定。



The Forefront of Space Science

宇宙  
科学  
最前線

## 軌道設計への挑戦

宇宙機応用工学研究系 テニュアトラック特任助教/DESTINY+プリプロジェクトチーム併任 尾崎 直哉(おぎき なおや)

自家用車でどこかへ旅行する計画を立てるとき、目的地を決めたあと真っ先に考えることは何だろうか? おそらく多くの人は「移動ルート(と、その所要時間・ガソリン代等のコスト)」を考えるのではないだろうか? 宇宙ミッションにおける軌道設計(Trajectory Design)は、この「移動ルート」の計画を立てることである。軌道を設計するためには、科学的な要求や技術的な成立性を合わせて複合的に考える必要があるため、それらを引くくめてミッション・デザイン(Mission Design)と呼ぶこともある。自家用車でドライブする場合、近年、カーナビやGoogleマップが普及したため、綿密な計画を立てずとも目的地に到達できるようになった。しかし、宇宙の旅は、現状、軌道設計の専門家に頼らないと飛行ルートを決めることができない。本稿では、軌道設計の難しさ・軌道設計研究が目指す世界について、筆者の研究内容を交えながら紹介する。

### 軌道を創る職人芸

「ひてん」(MUSES-A)に始まり、宇宙科学研究所は軌道設計の創意工夫により挑戦的なミッションを実現してきた。現在、2024年度内の打上げを目指して計画途中である深宇宙探査技術実証機DESTINY+ (デスティニープラス)も、「ひてん」、「のぞみ」(PLANET-B)が用いた月スイングバイ(および太陽潮汐力)

による軌道操作技術と、「はやぶさ」(MUSES-C)、「はやぶさ2」が用いたイオンエンジンによる軌道操作技術の合わせワザで、小型のイプシロンSロケットによって地球周回軌道から小惑星(3200) Phaethonを目指す挑戦的ミッションといえる<sup>[1]</sup>。ここでスイングバイとは、月・惑星の重力を効果的に用いて加速・減速する軌道設計のワザである。『月・惑星』というテニスラケットで、前方後方に走りながら「探査機」というボールを跳ね返すイメージを持ってもらえるほとんど正解である。また、イオンエンジンは静電気力(クーロン力)を用いて、電荷を帯びた物質(イオン)を加速して噴射させる効率の高いエンジンである。イオンエンジンは高効率である(少ない燃料で大きく軌道を変えられる)反面、推力が小さいため、ゆっくり長時間動作させる必要がある。このようにDESTINY+の軌道設計は、持てるワザを全て出し尽くした最上級に難しい軌道を用いていると言って過言ではない(その軌道図を表紙絵および図1に示す)。そして、このように難しい軌道を航行して、イオンエンジンで地球周回軌道から深宇宙空間へ飛び出した探査機は未だかつてない。高価で大きなロケットで飛ばせば苦労しないかもしれないが、限られた予算の中で(低価格なロケットを用いて)頻度高く深宇宙探査を実現可能とするための日本らしい工夫である。

特に、打ち上げてから最初の月スイングバイを迎えるまで

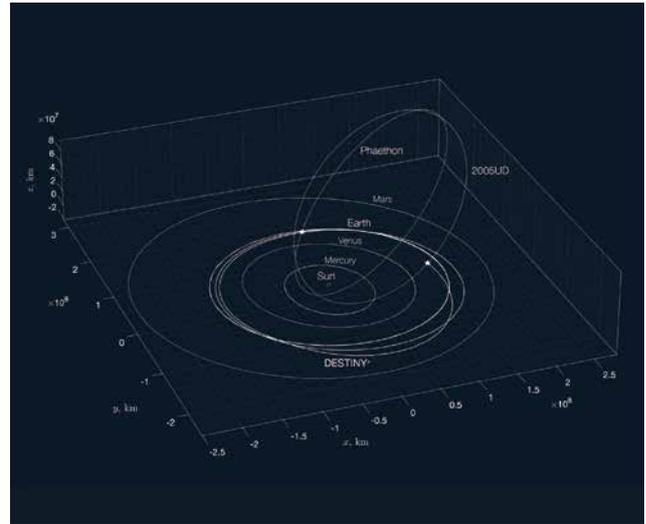
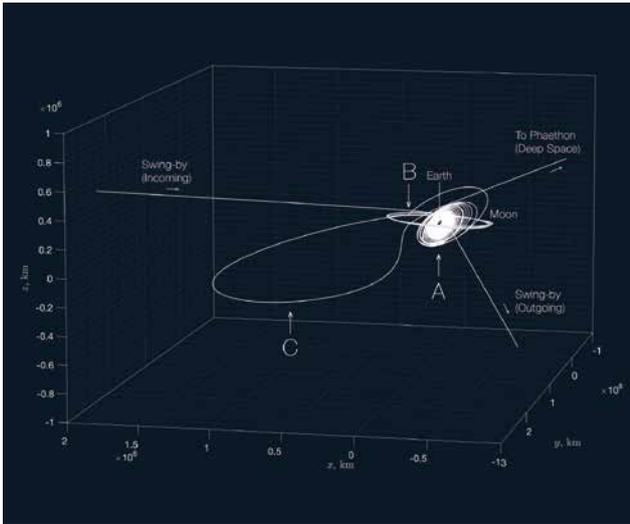


図1：DESTINY<sup>+</sup>の飛行軌道の例(左図：地球中心・慣性座標系における地球近傍軌道拡大図、右図：太陽中心・慣性座標系における惑星間軌道図)。左図で渦巻きに見える箇所(A)が「スパイラル軌道上昇フェーズ」であり、イオンエンジンを約1.5年間ほとんど連続的に動作させる必要がある。複数回の月スイングバイ(B)と太陽潮汐力(C)による軌道制御を使うことで地球出発エネルギーを増大させることができる。

の期間(「スパイラル軌道上昇フェーズ」と呼ぶ。図1の(A)は、約1.5年間ほとんど連続的にイオンエンジンを動作させた後、然るべき時刻・位置・速度で月スイングバイを行う必要があるため、難易度の高い軌道制御技術が求められる。例えば、「はやぶさ」が経験したようなイオンエンジンの予期せぬ停止が起こったとしても、あるいはイオンエンジンによる軌道制御量に誤差があったとしても、月スイングバイは正確に行うことが求められる。宇宙を航行する探査機の軌道は、通常、ニュートンの運動方程式を用いて、非常に正確に予想できるのだが、DESTINY<sup>+</sup>の地球近傍軌道は、こうしたイオンエンジンの予期せぬ停止や軌道制御誤差といった不確定性への対策が課題になる。

### 挑戦を諦めないための軌道

「イオンエンジンの予期せぬ停止」や「軌道制御の誤差」という不確定性がある中で宇宙ミッションを成功させるためには、大きく分けて2種類の対処法がある。「(設計上問題にならない程度まで)不確定性を小さくする」という対処法と「不確定性が大きくても耐えられる設計にする(専門用語で“ロバストな”設計と呼ぶ)」という対処法である。前者の究極は、決して停止しない・軌道制御誤差の無いイオンエンジンを作るという対処法になる。もちろん、イオンエンジンが止まらない方が良く、誤差も小さい方が良く、こうした設計は往々にして大きなリソース(時間・コスト・重量)が必要にな

る。また、十分に成熟した“枯れた技術”である必要もある。逆に、全く新しい技術・難しい技術に挑戦していくためには、「不確定性が大きくても耐えられる設計にする」対処法の方が求められる。

「はやぶさ」を始め、「PROCYON」(プロキオン)でもイオンエンジンの不確定性を目の当たりにした筆者は、博士研究の頃から「不確定性を考慮しても失敗に陥らないような軌道設計(“ロバストな”軌道設計)」をテーマとして研究を続けてきた<sup>[2]</sup>。図2に示すように、ロバストではない軌道設計では、予期せぬトラブルが発生した際に、目標地点へ到達できず、ミッション喪失を招き兼ねない。そこで、トラブルがあっても立ち直れるように軌道制御能力に余裕を持った設計にしておくことで、ロバストな軌道設計が達成される。筆者らは、不確定性を考慮した軌道“群”をまとめて最適化計算することで、このようなロバストな軌道設計を実現した。図3に示すように、地球から火星へ電気推進で遷移する軌道に対して、提案する手法を軌道設計に適用することで、(より小さなばらつきで)より安全に・より効率的に軌道を遷移できるようになることがわかる。本研究を発展させて、「あかつき」(PLANET-C)の金星周回軌道投入のように仮に最初の軌道投入が不成立であったとしても、ずっと短時間で再び軌道投入可能となる軌道設計手法を提案し、火星衛星探査計画MMXへも適用可能なことを示した<sup>[3]</sup>。応用として、「のぞみ」では急遽採用されたようなバックアップ軌道も予め想定しておい

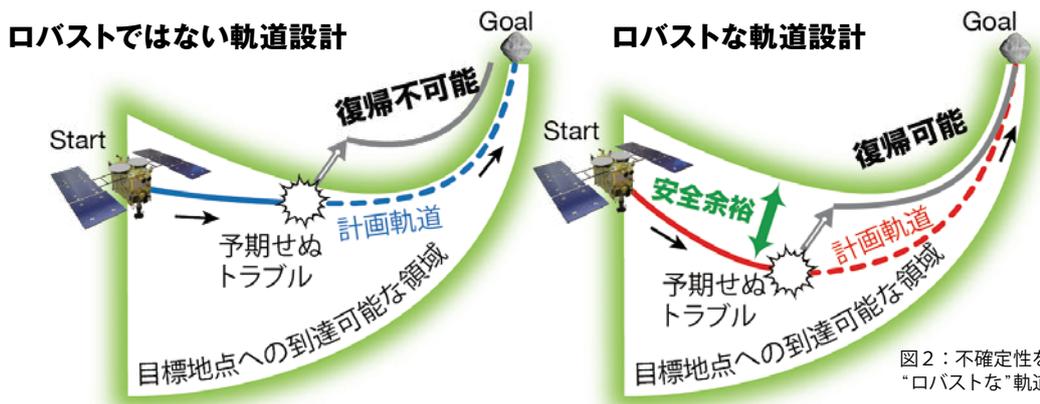


図2：不確定性を考慮しても失敗しないような“ロバストな”軌道設計。

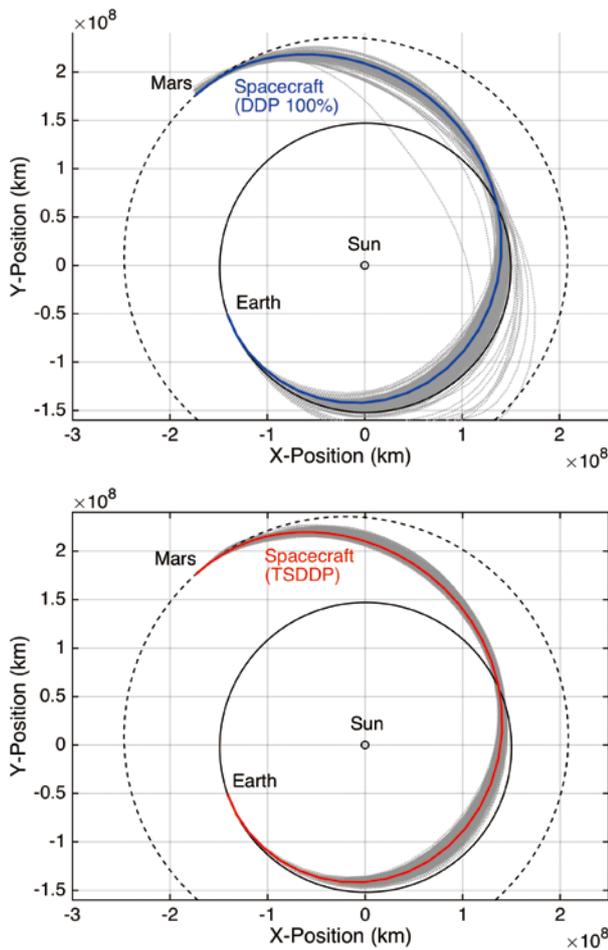


図3：イオンエンジンの停止・誤差の影響を考慮しても安全に火星に到達できる軌道設計(上図：従来の手法、下図：提案手法。青・赤色の実線は計画軌道、灰色の点線は不確定性の影響で逸れた軌道。但し、軌道誤差を5倍に拡大して表現。提案手法は従来手法より小さなばらつきで軌道を遷移できることがわかる)。

て、最悪の事態に至らないような軌道計画を立てることも可能となる。不確定性が大きくても成立する軌道を積極的に採用することは、「IKAROSのようなソーラーセイル探査機」、「火星大気を用いて軌道投入するエアロキャプチャ」、「全く新しい推進系」、「未知の重力環境を持つ小惑星探査」などの新しい技術・探査スタイルに挑戦し続けることを可能にするでもである。このような軌道設計技術を通じて、新しい技術に挑戦することを諦めない世界を作りたいと考えている。

## 軌道をつくるAI(人工知能)

冒頭でも述べたが、現状、限られた軌道設計の専門家に頼らないと探査機の飛行ルートを決めることができず、深宇宙探査ミッションを計画できない。お陰様で大変ありがたいことに、多くの研究者に「○○へ行く軌道を設計して欲しい」と頻りに頼まれている。しかし、今後、「月軌道ゲートウェイ」(Lunar Orbital Platform-Gateway)の開発や「PROCYON」 「EQUULEUS」(エクレウス)といった超小型深宇宙探査機の発展によって深宇宙探査ミッションの数が益々増大することが予想される。そのような時代において、「軌道設計職人に頼らないと飛行ルートを決められない」という状況は非常に不便である。そうした状況を打破するために、近年、世界中でAIを用いた軌道設計の研究が始まっている<sup>[4]</sup>。すなわち、誰もが使える宇宙版のGoogleマップを実現する研究である。軌

道設計は、前述のように「スイングバイ」等の複雑なワザを駆使することが通例であり、設計解の探索が難しく、その自動化、AI化も一筋縄にはいかない。実は日本は、米国と比較して軌道設計の専門家の数が1～2桁ほど数が少ない。だからこそ、AIを駆使した軌道設計の自動化のニーズは一層高い。軌道設計需要の増大と人材難の課題を一举に解決する好機と考え、軌道設計の自動化研究で世界と勝負していきたいと考えている(科研費・学術変革領域研究(B)20H05749)。

筆者は、DESTINY<sup>+</sup>を通じて軌道設計の自動化も推し進めたいと目論んでいる。DESTINY<sup>+</sup>の軌道設計は、専門家も唸る難しい問題である。その軌道設計の自動化ができるなら、多くの問題に容易に適用できるようになると考えている。更に、DESTINY<sup>+</sup>ではイオンエンジンの予期せぬ停止や軌道制御誤差によって何度も軌道計画を立て直す場面が出てくるかもしれない。軌道設計の自動化を進めることで、DESTINY<sup>+</sup>のミッションを着実に成功させる後押しをしたいと考えている。

## 僕の生きる軌道

筆者が研究者人生の集大成を迎える2050年代(30年後)、世界では何が起きているだろうかということについて考えている。宇宙探査の分野では、地球外生命探査・外惑星探査が一層活発化しているだろう。もしかすると地球外生命が発見され、人類は月・火星に都市開発が進行し、太陽系外に探査機を飛ばしているかもしれない。更には、地球上ではシンギュラリティを迎えてAI・データ革命が起きているかもしれない。そうした世界では、今の常識では考えられないような「(地上との通信無しで)自律的にミッションを遂行してサンプルリターンできるような探査機」や「(故障しても)自己修復する探査機」が宇宙空間を飛んでいても不思議ではない。

軌道設計の分野では、軌道設計の職人が魔法のように斬新な軌道を見つけ出す世界は少しずつ終わりを迎えようとしている。宇宙版Googleマップが実現し、専門家に頼らずに飛行ルートを決められる世界は、軌道設計の職人の端くれとして少し寂しいような気もする<sup>2</sup>。逆に研究者としては、今では全く予想できないような課題に直面するのだろうと考えてワクワクする。そのようなワクワクする世界の実現に向けて、何かしらの形で貢献することが筆者の夢である。

### 参考文献

- [1] 尾崎直哉, 山本高行, デイトス・ディオジエネ, 他, “DESTINY<sup>+</sup>の軌道計画に関する初期検討” 第63回宇宙科学技術連合講演会, 2105, 徳島, 2019年11月
- [2] Naoya Ozaki, Stefano Campagnola, and Ryu Funase, “Tube Stochastic Optimal Control for Nonlinear Constrained Trajectory Optimization Problems,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.43, No.4, April 2020.
- [3] Naoya Ozaki, Takuya Chikazawa, Kota Kakhira, Akihiro Ishikawa, and Yasuhiro Kawakatsu, “Extended Robust Planetary Orbit Insertion Method Using Probabilistic Uncertainties,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.57, No.6, November-December 2020.
- [4] Dario Izzo, Marcus Martens, and Binfeng Pan, “A Survey on Artificial Intelligence Trends in Spacecraft Guidance Dynamics and Control,” *Astrodynamics*, Vol.3, No.4, pp.287-299, 2019.

<sup>1</sup> 地球近傍において太陽重力および公転運動する地球の遠心力が場所によって異なることで生じる力。

<sup>2</sup> 仮に宇宙版Googleマップが実現したとしても、理学・工学的な要求を複合的に扱い、人間の意思決定が必要となるミッション・デザインは依然として、人間の創造性が必要になると考えている。

## 小惑星リュウグウ往復旅行

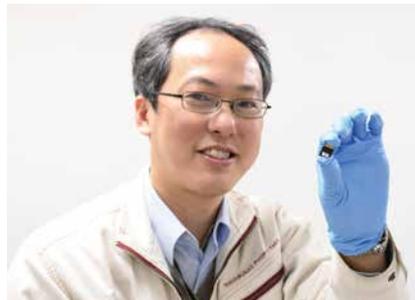
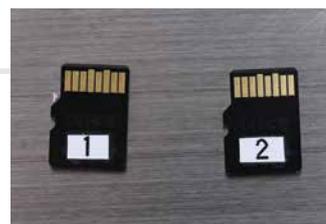
もう50年も前になりますが、米国のアポロ計画で人類は月まで行きました。当時は、西暦2001年にすれば人類は木星まで出かけているというような映画も公開されていました。しかし、現実には映画にはいかず、アポロ計画の後で人類が行くことができた宇宙は宇宙ステーション止まりです。

そこで、はやぶさ2プロジェクトでは、宇宙に行ってみたいという皆さんの夢を少しでも叶えようと、2013年の4月から8月にかけて「星の王子さまミリオンキャンペーン2」というものを行いました。このキャンペーンでは、皆さんからお名前やメッセージ・イラストなどをお送りいただいた上で、「はやぶさ2」探査機の方には2つの仕掛けをしました。

1つは、タッチダウン時の目印として使うターゲットマーカに皆さんのお名前を刻んだシートを入れました。「はやぶさ2」が探査をした小惑星リュウグウには、4つのターゲットマーカが着地しています。それら全てに名前が刻まれたシートが入っています。いつか誰かがリュウグウを訪れてターゲットマーカを見つけて、名前が入ったシートを見てくれるかもしれません。この仕掛けは、「はやぶさ」ミッションでも行ったことです。

もう1つの仕掛けは、「はやぶさ」では行わなかったことです。地球に戻ってくる再突入カプセルに、皆さんのお名前やメッセージ・イラストを入れました。ただし、カプセルにかさばるものは入れられませんので、メモリーチップに書き込んで電子ファイルとして搭載しました。こちらは、リュウグウまでの往復旅行を模擬したものです。

再突入カプセルから取り出したメモリーチップ。非常にきれいな状態で取り出すことができました。



取り出したメモリーチップを持つ津田プロマネ。

2月19日に、カプセルに埋め込んだメモリーチップの取り出しを行いました。メモリーチップは、コピーを作って2枚をカプセルの支持アプレータというところに埋め込みました。2枚とも取り出して中の電子ファイルを確認したところ、全てのファイルを正常に読むことができました。約25万人の皆さんに参加していただいたキャンペーンですが、これで無事にリュウグウ旅行の実行を確認できました。

メモリーチップに書き込まれた皆さんからのお名前やメッセージ等につきましては、皆さんご自身で確認できるようなシステムを構築したいと考えています。お楽しみに。(吉川 真)

## エアターボロケットの燃焼試験を開始しました

2020年12月14日から12月25日にかけて、能代ロケット実験場においてエアターボロケットの要素燃焼試験を行いました。エアターボロケットは、宇宙研が共に開発してきた「再使用ロケットエンジン」と「エアターボラムジェットエンジン」を複合させた新型エンジンです。空気吸込みによる効果で推進剤消費量を大幅に節約し、世界最小規模にコンパクトな再使用ロケットを実現できます。宇宙研の工学委員会の下に承認されたワーキンググループ「再使用型宇宙輸送システムにおける大気アシスト飛行の実証研究」で、このエンジンをATRIUMエンジン\*と命名し、推力10kNエンジンとしての試作研究を2019年にスタートしました。

今回の燃焼試験は、ATRIUMエンジンの重要な構成要素である酸素/水素ガスジェネレータの性能確認を目的とするものです。ガスジェネレータは、タービン駆動に必要な高温高圧燃焼ガス(1,000K、2MPa)を生成する部分です。コンパクト化のために特別な球形の燃焼室を採用しました。実はこの方式の燃焼室は、宇宙研が1980年代に開発した10ton級液体ロケットエンジンで採用されていました。今回の燃焼試験の実施のため、当時の研究開発に関わった方々に多大な支援をいただきました。試験の準備段階で苦労した球形燃焼室の製作方法では、複数の製造方法を比較検討し、ニッケル系の高温用合金であるハステロイXの平板をヘラ絞りによって半球状に加工して半球同士を電子ビーム溶接して球形にする方式を採用しました。念のため、金属積層



右は燃焼試験の保安集合写真。2020年12月23日撮影。上は燃焼中のガスジェネレータの様子。球形燃焼室が赤熱している。



造形による試作も別に行いました。燃焼試験は、この球形燃焼室の完成を待って、予定通り12月下旬に実施できました。新型コロナウイルス感染症対策を徹底して、宇宙研メンバーの他、名古屋大学や室蘭工業大学の研究室の参加も実現しました。試験期間中、吹雪などの荒天続きで一時は中止も覚悟しながらも、なんとか計画した燃焼試験を完了し、期待通りに性能データを取得することができました。

ガスジェネレータ以外のエンジン試作は、現在、宇宙研の工作室で組立作業を実施していて、2020年度内完成を目指しています。来年度は、これを用いたエアターボロケットの総合システム燃焼試験を計画しており、その時には全員マスクなしの保安集合写真が撮れる状況であることを祈念しています。(小林 弘明)

\* Air Turbo Rocket for Innovative Unmanned Mission

## 火星衛星探査計画(MMX)詳細設計フェーズに移行!

火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration: MMX)は、世界初の火星衛星フォボスからのサンプルリターン計画です。火星衛星の起源の解明、惑星形成過程と物質輸送への制約、火星圏進化史への新たな知見の獲得とともに、宇宙探査を先導する技術の獲得をミッション目的として2024年度の打上げを計画しています。

2020年2月の文部科学省宇宙開発利用部会でMMXの開発が決定したことを受けて、2020年度は基本設計を進めました。基本設計は、MMXを構成するシステムやサブシステム・機器について各種整合を図りつつ、設計仕様を固めていく重要な活動です。基本設計においてはコロナ禍による影響は大きく、2020年春の緊急事態宣言発出直後からテレワークへ切り替え、各種会議や審査会は全てオンラインで開催するとともに、特に各国宇宙機関とのやりとりは完全にリモートへ移行しました。しかし、対面で議論ができないのは厳しいとの声もあがり、これまで対面での非言語コミュニケーションを組み合わせて難しい国際調整を乗り越えてきたことを実感させられました。そのような状況でも関係各所の不断の努力により、コロナ禍の影響を最小限に抑えてほぼ計画通りに基本設計作業が進められたことに感謝しています。

その基本設計結果を確認するため、各レベルの基本設計審査会(PDR: Preliminary Design Review)が行われました。まずミッション機器、続いて探査機バスのサブシステム、地上システム、



フォボス着陸時の火星衛星探査機(MMX)の想像図

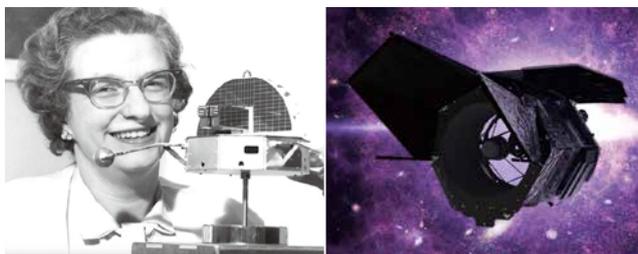
その後探査機システム全体のPDRが順番に行われ、最後に全ての要素を含んだ総括PDRが2021年2月に開催されました。JAXA内外から参加した多数の方々に審査いただき、次フェーズ(詳細設計フェーズ)への移行が認められました。

今後試験用モデルなどのモノづくりが始まり、海外からも含めモノのやり取りが本格化します。それに伴い各国宇宙機関との協定もそれらの活動をカバーするために改訂が予定されています。やることは山積みですが、チーム一丸となって2024年度の打上げを目指して開発に邁進してまいります。

MMXの様子はTwitter(@mmx\_jaxa\_jp)やMMX NEWS(<https://mmx-news.isas.jaxa.jp/>)で随時お伝えしていきますので、ぜひご覧ください。(川勝 康弘)

## Nancy Grace Roman(旧称WFIRST)宇宙望遠鏡計画への協力

Nancy Grace Romanは、1960年初頭、NASA宇宙科学部の最初の主任天文学者となった女性で、「ハッブル宇宙望遠鏡の母」とも言われている。2020年5月、NASAはJames Webb宇宙望遠鏡に続く天文学の基幹ミッションであるWFIRST計画についてその名を改め、Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡とすることを発表した。2026年までの打上げを目指す、口径2.4mの主鏡を持つ近赤外線/可視光波長帯の望遠鏡衛星である。Hubble望遠鏡の約200倍の視野で宇宙の姿を捉えることができる「広視野観測装置」を搭載し、天文学の中心的課題である「宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー」、「太陽系外惑星の分布の全貌解明」に挑む。また、技術実証装置として地球型惑星観測への大きなステップとなる「コロナグラフ装置」を搭載する。2011年には宇宙の加速膨張について、2019年には構造形成と太陽系外惑星の発見研究についてノーベル物理学賞が授与されており、Nancy Grace



Nancy Grace RomanとRoman宇宙望遠鏡のコンセプト図(NASA)。

Roman宇宙望遠鏡の研究は、まさに人類の宇宙観の発展に正面から挑もうとするものである。

日本は2013年頃からこの計画に高い関心を持ち、ISAS理学委員会の下、WG(Working Group)が日本の強みを活かし貢献すべき4つのプログラムの検討を進めてきた。第1にコロナグラフ装置への光学素子の提供である。1%の精度で偏光強度測定を可能とする機能を提案し、日本で製作した偏光素子を提供する。これによりコントラストの向上や惑星形成円盤・デブリ円盤の観測を可能にする。また、コロナグラフ装置の心臓部であるマスクについても、日本企業の技術を活かして、その材料基板を製作し提供する。すでにこれらの試験モデル用の素子が製作され、NASAにおいて偏光機能の試験、マスク製作評価が進められつつある。第2には、JAXA地上局による受信協力である。Romanは最大で12Tbit/Dayという大量の観測データを生成し、計画にはJAXA局の協力が不可欠である。Ka帯まで受信可能な美笹局の特性を活かし、26GHz帯の受信機能を拡張整備する。さらに第3、第4として、日本が誇る世界的にユニークな装置である、国立天文台のすばる望遠鏡、大阪大学が建設し運用するプラ임望遠鏡との協調観測を、それぞれ実施する計画である。

JAXAとNASAは、2020年4月には協力に関するLetter of Agreementを取り交わし、「戦略的海外共同プロジェクト」としてこれを推進している。2021年2月にはミッション定義審査に合格し、部門プリプロジェクトが設置された。(山田 亨)

## 退職の時を 迎えて

この3月に、4名の先生方が定年を迎えられます。宇宙飛翔工学研究系 嶋田 徹教授、宇宙物理学研究系 坪井 昌人 教授、宇宙機応用工学研究系 廣瀬 和之教授、同研究系 山本 善一 教授。長年の宇宙研での研究生活を締めくくるにあたって、本号では山本先生にご寄稿いただきました。他の3名の先生方については今後の号に執筆いただく予定です。(ISAS ニュース編集委員会)

# 緊張感溢れる現場で過ごした日々

山本 善一 (やまもと ぜんいち)

**東** 京大学修士大学院生として野村民也先生の研究室に入ってからこれまで40年近く宇宙研にお世話になった。助手として入所してから1年経った頃、ボイジャー2号海王星掩蔽日米共同電波科学実験の日本側現場指揮官を拝命。同実験は1989年8月25日にボイジャー2号が海王星と衛星トリトンの裏側に回る瞬間を利用し、これらの大気中を通過する電波の微妙な変化を克明に記録し解析するというもの。失敗の許されない一発勝負であった。当時は実験に使用する白田宇宙空間観測所(UDSC)の設備に関する予備知識も全くなく、新米の助手には甚だ荷の重い業務だった。極めて位相安定度の高い受信・記録系が必要とされたが、当時のUDSCは性能が低くて実験の要求仕様には遠く及ばない。水素メーザ発振器を導入し受信系各部の性能改善を図った。測定や観測機器設置のために大勢のNASA関係者が日本に乗り込んできて、自分は朝から晩まで質問攻めに遭い、彼等の実験の準備に奔走した。お陰でUDSCの設備に一気に精通できた。苦労の末、日本側観測装置も完成した。NASAは自前の観測装置をUDSCに持ち込み、並行して動かす事で冗長系を組んでいたが、いつしか彼等の設備に負けない性能の装置を開発する事が我々の最大の目標となり、最終的には何とか達成できた。

本番の1年近く前からORTと称するオペレーションレディネステストが何度も行われた。初回のORT1では英文の手順書をコピーして配っても、日本人運用者の誰も内容の理解に到らず、いきなり言葉の壁にぶち当たる。ならばとUDSCの宿泊棟に籠り、何日もかかって手順書を和訳して配ってみたが、今度は資料が分厚すぎて大事なポイントが見逃されてしまう始末。そこで内容を噛み砕き、作業ごとに各オペレータの名前も書き込み簡易版の運用手順書(SOEと呼ぶイベントの流れを記したデータに解説文を加えたようなもの)を作って手短かに流れを説明すると、これが大変うまく機能した。本番では落雷停電による想定外の装置故障にも見舞われ、時間ぎりぎりの綱渡りにも、入念なりハーサル訓練のお陰で慌てることなく装置の復旧に成功し、白田局は良好なデータを得る事ができた。河島 信樹先生からは「SEPAC(Space Experiments with Particle Accelerators)の時はいろいろトラブルが起きて大変だったが、今回の実験は山本君のお陰で本当に楽だったなあ」と最大限の労いの言葉を頂いた。

その後は観測ロケット実験と呼ばれ、横山 幸嗣先生率いるロケットテレメータ班に入る。暫くして、M-Vロケット開発責任者の小野田 淳次郎先生から電気系主任を仰せつかった。要は電気に詳しい人間に全体の指令権を与えるので信頼性確保とトラブルシュートをしっかりやれ、との事。守備範囲は想像以上に広く、搭載系各種装置、内之浦宇宙空間観測所(USC)のレーダー設備、テレメータ設備、破壊コマンド送信設備にまで及ぶ。「はやぶさ」初号機を打ち上げたM-V-5号機では打



日米共同電波科学実験でテストコンダクターを務める筆者(右端)。

ち上げの2日前に行われた最終電波テストで、2段目に搭載されたレーダーアンテナ切替器が応答しなくなった。フェアリングを外し、探査機を降し、故障装置を取り出し、修理作業、再組付けする手順を踏んだのでは何日ものロスが発生する。小惑星を目指す「はやぶさ」では致命的な遅れとなる。関係者一同蒼くなった。苦肉の策で、ロケットは分解せずに機体にある小さな蓋を外し、そこから小柄な作業員が機体内部に潜り込んで故障した装置を外す。翌朝一番の航空機に手荷物で持ち込み、担当メーカーの工場(茨城県)まで運んで技術者が大急ぎで修理、同日中に工場内で単体動作試験まで終えて最終便で移動、鹿児島空港からタクシーを飛ばしてUSCに持ち帰り、夜中にすぐにロケットに組み込み、打上げに臨む、という一大作戦となった。どこか1つでも躓けば「はやぶさ」初号機の成功はなかった。電気系主任の無理なお願いを快く引き受けてくれた内外の関係各位には本当に感謝している。

月日は流れ、「はやぶさ」初号機が地球に戻ってきた時にはUDSC所長として64mアンテナで出迎える事となった。6年半務めたUDSC所長としては、毎月内外の関係者を集めて行う白田局運用会議というものを立ち上げ、老朽化の進む装置の不具合処置の指示出し等に奔走した。ほんの僅かな前兆現象も見逃さず、設備の信頼性向上に取り組んだつもりである。UDSC 64mアンテナが38年間、今も現役で元気に動いているのは嬉しい限り。自分もその一翼を担えたのは光栄である。予算取りで協力的に動いてくれた歴代の追跡担当者諸氏にこの場を借りてお礼申し上げる。

M-Vロケットの時代には、このように電気系主任として打上げまでロケットを担当する他、打ち上がって以降はロケットテレメータ班としても設備のオペレーションに参加、そして探査機や衛星が内之浦から可視となるや、自分が設計に携わったUSC 34mアンテナを駆使して第1可視での初期捕捉の現場指揮まで執る、といった形でドキドキする現場を渡り歩いたことが思い出される。つい先日「はやぶさ2」地球帰還オペレーションに至るまで緊張感・使命感・充実感に満ち溢れる数々の現場を関係者と共に楽しく過ごしてこられた。お世話になった内外の関係者の皆様、長い間有難うございました。

連載

超小型探査機

# EQUULEUS と OMOTENASHI

世界最大のロケットで  
打ち上げる世界最小の探査機

第 4 回

## 世界最小の月着陸機 OMOTENASHI

### OMOTENASHIのミッション

今月はもう一つの探査機OMOTENASHIの紹介です。OMOTENASHI (Outstanding Moon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor) のミッションは、その名の通り、超小型探査機 (CubeSat) による月面へのセミハード着陸の実証です。月まで航行するためのオービティングモジュール (OM)、月面接近時に減速を行うロケットモータ (RM)、着陸モジュールであるサーフェスプローブ (SP) の3モジュールで構成されています。

OMOTENASHIは打上げロケットから分離して約1日後、月衝突軌道へ自ら乗るため2ユニットのリアクションコントロールシステム (RCS) により最初の軌道制御を実施します。その後、月面衝突の数分前に着陸準備シーケンスに入り、RMによる減速 (秒速2.5km分) 時の姿勢安定のためRCSを使用してスピンアップを行います。探査機全体を月面に着陸させるには大きな推進系が必要で、CubeSatの限られたリソースでは困難です。そのためOMOTENASHIでは月面到達直前にRMを点火すると同時にOMを分離してRM+SPだけ着陸させます (図1)。減速させる質量を減らすことで超小型でも月着陸が可能となります。SPにはクラッシュアブル材を搭載しており、着陸時にかかる衝撃も低減させます。探査機の合計サイズは12×24×37cm、質量は12.6kgと過去の宇宙機の中でも非常に小さく軽量です。

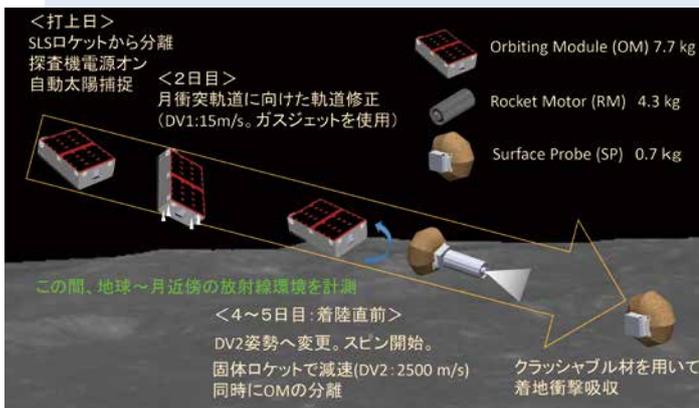


図1：OMOTENASHIのミッションシーケンス

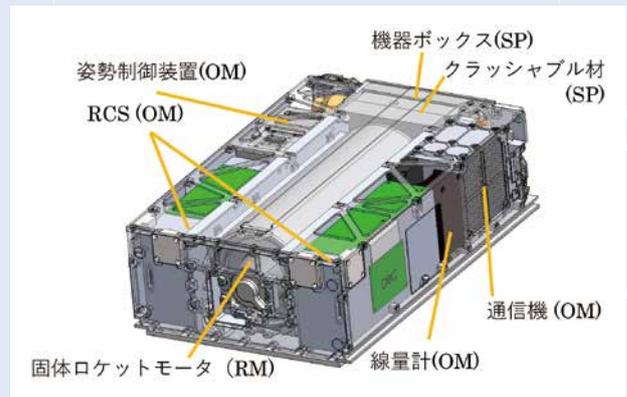


図2：OMOTENASHIの内部構成図

### OMOTENASHIの機器構成 (図2)

探査機を超小型化するためには体系的な工夫とともに、各機器を小型にする必要があります。OMの電源にはJAXA 研究開発部門が開発した高効率3接合薄膜太陽電池を使用しています。「ひさき」搭載NESSIE 実験および「こうのとりのり」6号機搭載SFINKS 実験の結果を反映して改良が加えられたものです。バッテリーは厳しい安全基準が課されているため、NASAから支給された基準に合格したリチウムイオン電池を3直列で使用しています。通信系はPROCYONで搭載したX帯送受信機をさらに小型軽量化しました。また、アウトリーチ活動のため、アマチュア無線のUHF帯の発信器も搭載し、OMOTENASHIからの電波を世界各国のアマチュア無線家に受信してもらう予定です。姿勢制御装置は世界中から最も小型のものを探しました。0.5U\*サイズ、0.9kgの小型軽量でありながら、3台のリアクションホイール、4つの太陽センサ、3軸ジャイロ、スタートラッカを有しています。RCSもまた輸入品で、合計8基のスラスタにより、軌道制御、角運動量管理、並びにスピンアップを行います。推進剤としては安全性を考慮し、低圧、無毒、不燃性の液化ガスを使用します。観測機器は、地上用の携帯放射線線量計を改造したものを搭載しています。RMは直径110mm、長さ300mm程度、質量は約5kgのレーザ点火方式固体ロケットモータを開発しました。着陸モジュールであるSPは、リチウム金属1次電池、搭載計算機、UHF送信器、3軸加速度計を搭載し、UHF電波が着陸後も地上にて受信できることで、着陸成功を確認します。

### 超小型、低擾乱の分離機構

OMとRM+SPの分離には、小型、軽量である2種類のノンエクスクローシブアクチュエータ (NEA) が使用されます。打上げ時の振動環境に対して強固に保持するためフランジボルトという比較的遅延時間の大きいNEAを用います。これを軌道上で動作させた後、分離の瞬間には数ミリ秒の遅れ時間で動作するピンプラーと呼ばれる別のNEAを使います。分離タイミングには50ミリ秒以下の非常に高い精度が求められるためです。その直後にRMにレーザ点火して固体ロケットモータの推進力を利用してOMを分離します。分離時に発生する外乱を低減させるため、OMとRMの間に板バネと固体潤滑を使った分離レール機構も採用しています。これらの分離機構は地上でのスピン分離試験にて機能を確認し、無重力空間のシミュレーションにより軌道上での分離外乱推定なども行っています。

菊池 隼仁 (きくち じゅんじ)

\* Uは超小型衛星のサイズを表す単位で約10cm×10cm×10cmの立方体のこと。OMOTENASHI探査機は6U。姿勢制御装置は5cm×10cm×10cmなので0.5U。

## 「はやぶさ2」サンプルリターン カプセルを探しに

研究開発部門第1研究ユニット

石丸 貴博 (いしまる たかひろ)

2020年10月24日、はやぶさ2カプセル回収班の豪州出張が始まった。

私の回収班での役割は、カプセルが発するビーコンからその位置を推定する方向探索(DFS: Direction Finding System)系の副係長である。DFSはビーコンの到来方向を探索する5つのアンテナ受信局と、その探索結果を集約してカプセルの位置推定を行うシステムからなり、チームとしては総勢24名(現地組22名、日本組2名)の大所帯だ。

このコロナ禍において豪州で活動するためには、入国前後の隔離とPCR検査が求められた。我々は出国前1週間の隔離中に2度PCR検査をパスし豪州へ入国、その後また2週間の隔離生活に入る。アデレード空港に到着するや否や、バスでホテルまで輸送され流れるように部屋へエスコートされる。これ以降、部屋から出ることは全く許されない。食事は全て部屋の前まで運ばれ、ドアノックでそれが告げられる。食事を取ろうとドアを開けると、廊下は屈強な警官に見張られている。毎朝健康チェックの電話がある。「なにかストレスを感じていませんか？」英語が苦手な私は、この電話が一番のストレスです、を日本語のままグッと飲み込む。PCR検査に使う綿棒はあまりにも太く激痛に泣いた。

11月16日、いよいよウーメラに入る。カプセルが飛来するウーメラ立入制限区域(WPA: Woomera Prohibited Area)は九州が4つ入る程の広大な宇宙航空・軍事実験場である。豪州国防省(DoD: Department of Defense)には、エスコートを始め、健康・安全面含めて全行程を通してサポートして頂いた。季節は夏。気温は平気で40℃を超え、湿度は10~20%程度、太陽がガラガラと照りつける。汗をかいても直ちに蒸発し、サラサラ肌が維持出来る。カンガルー、トカゲ、エミュー、ウサギ、ヒツジなどの動物たちも昼間はあまり見かけない。砂漠と言えど植生はそれなりに豊かで、サバンナを思わせる環境だ。固く乾燥した膝下丈の植物に加えて数メートルの樹木も点在する。スニーカーで歩こうものなら忽ち植物の棘が侵入し鋭い痛みが走る。帽子、サングラス、長袖・長ズボンに加えてトレッキングシューズがウーメラで活動する日本人のスタイルだ。

12月5日、数々の準備・試験・トラブルを乗り越えた自信にも僅かな不安は携え、カプセルを迎え入れるべく宿を営った。機器特性の校正作業やオペレーション手順の最終確認を行い、

砂漠で夜を過ごして日付変わって深夜のカプセル大気圏再突入に備える算段である。諸々の作業の後、夕食にパスタを茹でて休息。キャラバンを出ると日中の暑さが嘘のように気温がグッと下がり肌寒い。まだ月が昇らない砂漠は真っ暗で、天の川と南十字星が美しい。David Bowieの名曲『Space Oddity』を、鼓膜が千切れんばかりの大音量で聴いた。

12月6日現地時間3時58分頃、カプセルは地球大気圏に再突入した。3時59分50秒頃、火球確認。のびが、数時間前とは打って変わって空は分厚い雲に覆われており、何も見えない。僅かに不安がよぎるが、本部と接続した衛星電話越しに、他の全サイトで火球が確認されたことを知る。どうやら本当にカプセルが帰ってきたらしい。となれば、4時2分10秒にビーコン送信が始まるはずだ。カプセルの姿は見えなくてもDFSの出番がくる。カウントダウン「5, 4, 3, 2, 1, 0。」、予測時刻ドンピシャでカプセルの声とも言うべきビーコン音が受信機から鳴り、コンソールでは受信信号強度を示すグラフが立ち上がった。入感!胸のざわつきを感じつつも、アンテナ掃引、カプセル捕捉、訓練で幾度となく繰り返したオペレーションを淡々とこなす。すっかり胸の騒ぎが落ち着いた4時22分頃、高度を下げたカプセルは地球の丸みに隠れその声も消えた。これ以降は各種報道等に詳しいが、再突入から約2時間後、DFSが予測した着地点から僅か200mの位置でカプセルは発見された。

この日の夜、宿で祝杯を上げた。同じ宿のメンバー、DoDエスコータさん、最後には宿・レストランの従業員さんも交えて、これまでの苦労と疲れを吹き飛ばすとともに喜びを分かち合った。翌朝顔を合わせたDoDエスコータさんは、少し疲れた顔で「No more red wine」と笑っていた。

12月15日、日本へ帰国。12月28日、再びの隔離生活を終えて2ヶ月に渡る出張が幕を下ろした。

本稿では豪州出張にフォーカスしましたが、私たちは日本国内で行った準備・検証にこそ沢山の汗を流しました。その段階から多くの方々の支援、応援と、最後には祝福の言葉まで頂きました。支えて頂いた皆様に改めて感謝申し上げます。また、この仕事に携わることができた幸運と火球を見損ねた不運にも感謝します。火球見たかったなあ〜。



カプセル回収の翌日、滞在した宿から見た星空。

### 編集後記

旅立ちや節目となる時間に相応しく、ポスト「はやぶさ2」の流れを感じさせる話題が並びました。コロナ禍にあっても新しいミッションが途切れなく立ち上がっています。自らの動力によって目標軌道に到達せんとする巻頭のミッションは、「運命」を切り拓かんとするイメージそのものです。(戸田 知朗)



ISASニュース No.480 2021年3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/株式会社アズディップ

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008