

リュウグウの重力モデル

リュウグウの実画像(左)とリュウグウ表面重力の分布図(右)。地球や月とは異なり、リュウグウは歪んだ形をしているため、重力に偏りが生じている。右図はリュウグウが完全な球だった場合との表面重力加速度の差(百分率)を表す。重力分布は、Watanabe et al. Science (2019) で公開されたリュウグウの3次元形状モデルから、内部密度が一定であるという仮定の元で計算された。この重力モデルは、「はやぶさ2」の着陸軌道計算にも使われ、タッチダウン運用の成功に寄与した。詳しくは本号の「宇宙科学最前線」をご覧ください。(参照: http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181221_AstroDynamics/)

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

小惑星近傍における探査機の軌道運動

はやぶさ2プロジェクト プロジェクト研究員 菊地 翔太(きくち しょうた)

リンゴを手から離せば、地面に向かって真っ直ぐ落ちる。地球上に住む我々にとっては、至極当然のことである。しかし、この常識が必ずしも当てはまらない世界がある。イトカワやリュウグウなどの小惑星である。本稿では、小惑星の特異な力学的環境と、それに起因する小惑星探査の難しさについて、「はやぶさ2」を題材にした筆者の研究を交えながら紹介する。

小惑星近傍でのリンゴの軌道

リンゴは地球の中心に向かって落下し、人工衛星は地球の周りで円や楕円の軌道を描く。いずれも地球重力の作用によるものである。このようなリンゴや人工衛星の振る舞いは、多くの人にとっては常識と言えよう。ところが、リンゴや探査機を小惑星に持っていくと不思議なことが起こる。リンゴは小惑星の中心方向から逸れて落下し、探査機は図1のような奇妙な軌道を描く。これは、小惑星の重力が小さいために様々な外乱が生じ、物体の運動が影響を受けるためである。

主要な外乱は2つ。まず1つ目は太陽光圧である。太陽光圧とは、探査機表面に太陽光が当たることで物理的に生じる圧力のことを指す。と聞いても、恐らく普段から宇宙を扱っていない限りピンと来ないのではなかろうか。それもそのはず、この太陽光圧は地上では気付かないほど弱い。地上で

「太陽の光に押されている」と感じる人はいないであろう。もしいければ、それは気のせい、あるいは驚異のセンシング能力である。地上において、人に作用する太陽光圧による力は、重力の約1億分の1以下である¹。ところが、舞台を小惑星に移すと状況は一変する。小惑星重力が微小であるが故に、太陽光圧は相対的に大きな力となり、探査機の軌道を強く乱す。実際に、「はやぶさ2」が滞在し

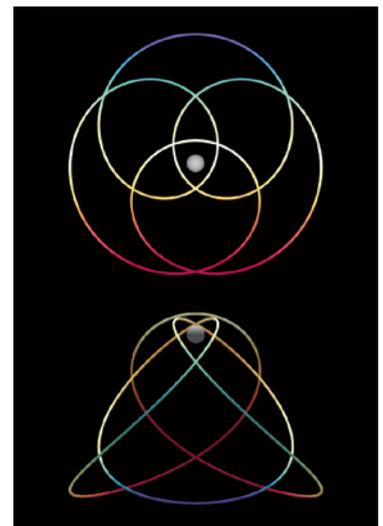


図1:「はやぶさ2」のリュウグウ周回軌道の例。実用された軌道ではないが、理論上は実現可能な軌道。太陽から見た図(上)と、リュウグウ公転軌道面に垂直な方向から見た図(下)。

¹ 身長170cm・横幅40cmの長方形型断面と質量70kgを有するヒトが、地上で仰向けになって真上から日光を浴びる場合、太陽光圧による加速度は約 $4.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ である(ただし、大気等による太陽光の減衰を無視)。これは重力加速度 9.8 m/s^2 の1億分の1以下である。

ていたホームポジション（リュウグウ上空の高度20km）では、太陽光圧による力とリュウグウの重力とがほぼ同じ大きさであった。

小惑星周りの軌道に対する2つ目の外乱は、小惑星重力の偏りである。惑星や月などの大型天体は、自身の重力の作用によってほぼ球状に形成されている。逆に、小惑星は重力が弱いため、一般に歪んだ形をしている。例えば、「はやぶさ」が訪れたイトカワは、ピーナッツの様な形をしているし、「はやぶさ2」の探査対象であるリュウグウは、表紙左図の様にそろばんの珠を想起させる外観である。天体形状が歪だと天体の質量分布も球対称ではなくなるため、天体が周囲に及ぼす重力に空間的な偏りが生じる。この影響で、小惑星重心から等距離であっても重力の大きさが異なったり、重力の向きが小惑星重心方向からずれたりする。具体例として、リュウグウの表面重力分布の計算結果を表紙右図に示す。リュウグウは赤道部分が張り出しているため、赤道付近に質量が集まっている。その結果、図が示す通り、リュウグウの赤道付近では、通常より（完全な球である場合より）も20%ほど強く重力が作用する[1]。

強摂動環境における軌道力学

上述の通り、太陽光圧や重力の偏りなどの効果²によって、小惑星近傍での探査機の軌道運動は強く乱される。この軌道運動の乱れのことを、軌道力学の分野では「摂動」と呼ぶ。よって、小惑星近傍の力学的環境は、しばしば「強摂動環境」と称される。小惑星近傍の強摂動環境は、小惑星探査にとって厄介な障壁である。小惑星に滞在して観測を行い、ローバーを分離し、また着陸する、といった運用全てが外乱の影響を受ける。それ故に、小惑星探査の動向が世界的に活発化すると共に、強摂動環境における軌道力学の研究も発展してきた。

17世紀にケプラーやニュートンらによって礎が築かれた軌道力学の分野にあって、小惑星近傍での軌道運動を扱う研究が体系化されてきたのは極最近と言える。例えば、図1のような特殊な小惑星周回軌道の存在が広く知られるようになったのは、筆者の知る限り過去10年余りのことである。筆者がこの分野の研究をし始めたのは2013年のことだが、以来毎年多くの新しい軌道力学理論を目にしている。その研究対象は、複雑な重力環境をもつ二重小惑星周りでの探査機軌道や、微小重力下でのローバーや着陸機の運動、重力場を精緻かつ高速にシミュレートする数値計算アルゴリズム、など多岐にわたる。そこで以下では、強摂動環境における軌道力学の最新研究の一端を、実ミッションを例にとって、「小惑星近傍での軌道維持」、「小惑星への着陸」という2つの観点で眺めてみる。

小惑星近傍での軌道維持

詳細な探査を行うためには、探査対象の天体に留まらねばならない。しかし、「ただ滞在する」ことが、小惑星では存外難しいことは先述の通りである。地球などの大型天体の周りでは、十分な速度さえ与えれば、宇宙機はほぼ一定の円・楕

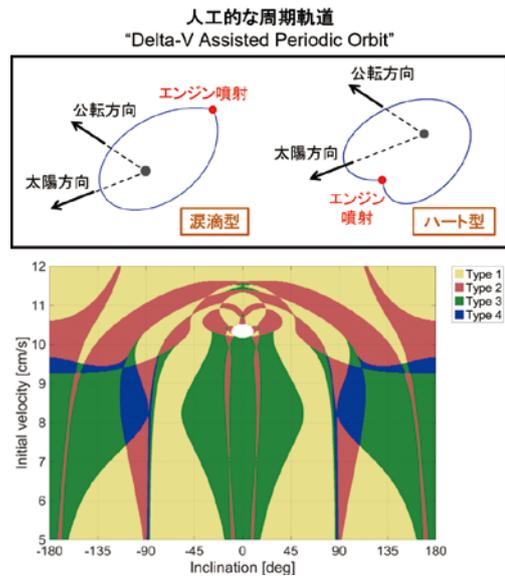


図2：小惑星近傍での人工的な周期軌道とその軌道群の固有構造。下の図は、初期位置を5 kmに固定し、軌道傾斜角（横軸）と初期速度（縦軸）を変化させた場合の涙滴軌道群の安定性タイプを表す。各軌道の安定性に関連する6次元の固有値に基づき、軌道を4つのタイプに分類している。「Type 4」が最も安定な軌道に対応する。

円軌道を描き続ける。対照的に、小惑星近傍では、探査機が滞在する高度域において、主に太陽光圧による摂動が強く顕れる。そのため、容易に小惑星からの離脱や小惑星への衝突という結果に至ってしまう。では、どうするか？ 解決策は2つに大別される。

1つ目の解決策は、「はやぶさ」・「はやぶさ2」で採用された、ホバリングと呼ばれる手法である。小惑星重力や太陽光圧を相殺するように、定期的エンジン噴射を行うことで、小惑星上空での位置を保持する戦略だ。原理はシンプルで実用性も高い³。実際に、「はやぶさ2」ではホームポジションでのホバリング運用を起点として、着陸やローバー分離、インパクト実験などの多くのミッションを成功させた。一方で、高頻度のエンジン噴射による燃料浪費がホバリングの短所である。

2つ目の解決策は、「上手く軌道を選ぶ」という戦略で、海外の小惑星探査機で採用されている。軌道力学の研究を通じて、特殊な条件下で成立する安定な周期軌道の存在が知られている。代表的なものが、ターミネータ軌道と呼ばれる極軌道や、図1の共鳴軌道である。ターミネータ軌道は、NASAのOSIRIS-REXミッションで採用されており、その有用性は今まさに小惑星ベンヌでの探査を通じて実証されている[3]。軌道に摂動が生じないように探査機の位置・速度条件が上手く設計されており、理論上は放っておいても同じ軌道を描き続ける。しかし、安定な周期軌道は、太陽方向に対して軌道面が垂直でなければならないなど、限定的な条件でしか得られないため、軌道設計の自由度が低いことが難点である。

ホバリング運用と周回運用は、いずれも確立された手法だが一長一短がある。そこで、筆者らの最近の研究では、両者の折衷案として、周回しながら定期的なエンジン噴射を行う人工的な周期軌道を考案した[4]。研究の結果、1周に1回の制御で、図2のようなハート軌道と涙滴軌道が得られることがわかった。周回の遠心力で重力を相殺するため所要燃料は

2 その他の外乱としては、太陽重力と熱輻射圧が挙げられ、彗星の場合にはブルームによる推力も加わる。

3 シンプルな原理とは裏腹に、小惑星近傍でのホバリングの力学理論もまた奥深く、運動の安定性等に着目した研究が、21世紀に入ってから多く発表されている[2]。

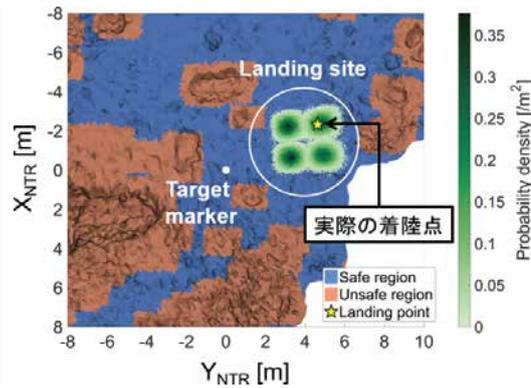
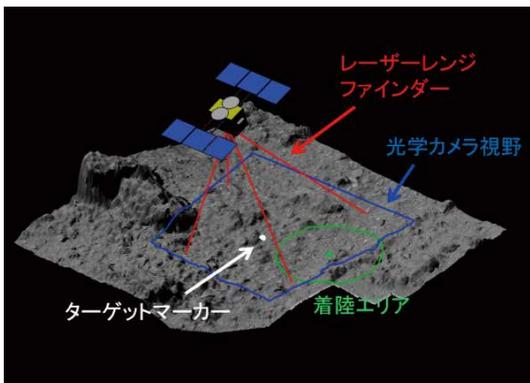


図3:「はやぶさ2」の着陸シミュレーションの例(左)と着陸分散(右)。半径3mの非常に狭い安全エリアへの着陸が要求された。右図の濃い緑色の点群は着陸確率の高い領域であり、「はやぶさ2」制御系の特性によって四方に分かれている。

ホバリングより少なく、また従来の周回軌道より設計自由度が高い。周期的な制御を自然運動の一部として扱うことで、従来の力学理論を拡張した安定性の解析などを行った。解析結果の一例を図2の下部に示す。軌道速度と傾斜角が異なる涙滴軌道群の安定性マップである。ここでは敢えて詳細な解説を避けるが、小惑星近傍の複雑な力学系が生み出す、軌道解構造の芸術性(?)を感じて頂ければ幸いである。この新たな軌道の有用性を鑑みて、「はやぶさ2」運用のオプションとして、涙滴軌道によるリュウグウ周回が実際に検討された。残念ながら実現には至らなかったが、「小惑星に滞在する」という最も基本的な運用に対する新たな選択肢を獲得した点では進歩である。今後のミッションで、小惑星探査機が涙滴軌道やハート軌道を描く日が来ることを期待したい。

小惑星への着陸

ここからはもう少し高度を下げて、小惑星表面付近での軌道運動に関する研究を紹介する。「はやぶさ2」ミッションでは、リュウグウ到着後の観測で、予想以上に多量の岩塊が分布していることが判明した。安全に着陸するためには、探査機に衝突する危険性のある岩を避ける必要があり、最終的には半径わずか3mの着陸点が選定された⁴。「はやぶさ2」の全幅は6mなので、「半身」以内のずれに収める必要がある。小惑星上空から表面に近づいていくと、太陽光圧に替わって重力の偏りの影響が顕著になり、小惑星表面への物体投下や着陸の精度を低下させてしまう。「はやぶさ2」の例では、着陸時のわずかな誤差が命取りになる。したがって、強摂動環境下での高精度着陸の実現が、「はやぶさ2」着陸運用の最大の課題であった。そこで、リュウグウ到着後に新たに練られた最終着陸シーケンスが、「事前投下したターゲットマーカー(人工的な目印)を追尾して最終降下点に精密に誘導し、その点から着陸エリアに自由落下する。」というものであった。

表紙右図に示したリュウグウの重力場の解析に基づき、重力の偏りによる摂動を加味した着陸軌道が設計された。この軌道は、目標点に正確に着陸するばかりでなく、接地速度や接地角などの工学的条件を満たすように設計されている。また、現実の運用では、センサ測定誤差や、エンジン噴射誤差に起因する探査機の位置・速度誤差が生じる。種々の誤差が生じても安全に着陸できることを担保するために、筆者らの研究では、「はやぶさ2」の着陸分散(着陸位置のばらつき)も合わせて解析した。図3(右)は、着陸軌道を10万ケースで数

4 着陸点選定においても、苛烈なリュウグウ環境を克服するために、はやぶさ2 理学・工学チームの知識と知恵の粋が結集された。その紆余曲折の一端は、筆者の他の解説記事[5]を参照されたい。

値シミュレーションして、着陸分散を求めた結果である[1]。この解析の結果、目標エリアに着陸分散が収まっており、着陸軌道が十分安全であることが確認された。

斯くして、2019年2月に、「はやぶさ2」はリュウグウへの着陸を見事に成功させた。運用後の軌道復元の結果、図3(右)の通り、「はやぶさ2」が予測された分散エリア内に着陸し、着陸誤差がわずか1mであったことが明らかとなった。また、ここまで述べたのは、1回目の着陸運用についての研究成果であるが、「はやぶさ2」は2019年7月に2度目の着陸も成功させている。2回目の着陸誤差は約60cmであり、高精度着陸の再現性が実証された。

おわりに

小惑星近傍の強摂動環境における軌道力学は、未だ発展途上であり、多くの興味深い性質を秘めた研究分野だと感じる。例えば、本稿では割愛したが、小惑星近傍では探査機の軌道運動と姿勢運動が互いに強く影響を及ぼしあう現象も顕れる[6]。小惑星探査を行う上で、小惑星近傍での物体の運動を理解することは、最も根源的な活動と言える。惑星科学上の意義に留まらず、鉱物資源の宇宙利用や地球への隕石衝突防止の観点でも、小惑星探査の重要性は増していくであろう。小惑星探査の需要の高まりと共に、軌道力学論の新たな側面を垣間見ることが楽しみである。最後に、本稿執筆の契機となった研究を支援して頂いた、はやぶさ2、IKAROS、OKEANOSプロジェクトの皆様、この場を借りて感謝申し上げます。特に、川口淳一郎教授と津田雄一教授という2人の偉大な師の指導を賜ったことは、筆者の研究者人生の中で最も幸運な出来事であり、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] S. Kikuchi, F. Terui, N. Ogawa, T. Saiki, G. Ono, K. Yoshikawa, Y. Takei, Y. Mimasu, H. Ikeda, H. Sawada, S. Van Wal, S. Sugita, S. Watanabe, and Y. Tsuda, "Design and Reconstruction of the Hayabusa 2 Precision Landing on Ryugu," *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020. (in press)
- [2] S. B. Broschart and D. J. Scheeres, "Control of hovering spacecraft near small bodies: application to asteroid 25143 Itokawa," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 28, No. 2, pp. 343–354, 2005.
- [3] D. R. Wibben, A. Levine, S. Rieger, J. V. McAdams, P. G. Antreasian, J. M. Leonard, M. C. Moreau, and D. S. Lauretta, "OSIRIS-REx Frozen Orbit Design and Flight Experience," *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, Portland, Maine, 2019.
- [4] S. Kikuchi, Y. Tsuda, and J. Kawaguchi, "Delta-V Assisted Periodic Orbits around Small Bodies," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 40, No. 1, pp. 150–163, 2017.
- [5] 菊地翔太, 「火の鳥「はやぶさ」未来編 その18～はやぶさ2の高精度タッチダウンの裏側～」, *日本惑星科学会誌遊星人*, Vol. 28, No. 2, pp. 143–149, 2019.
- [6] S. Kikuchi, K. C. Howell, Y. Tsuda, and J. Kawaguchi, "Orbit-Attitude Coupled Motion around Small Bodies: Sun-Synchronous Orbits with Sun-Tracking Attitude Motion," *Acta Astronautica*, Vol. 140, pp. 34–48, 2017.

II 新型コロナ禍への対応

新 型コロナが猛威を奮う中、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の一翼を担う宇宙科学研究所は、政府や地方公共団体の方針に従い、できる限り緊急事態に対応してきました。テレワークの励行と出勤の最小化、優先業務に限定した活動、「『おおすみ』打ち上げ50周年記念行事」や「講演と映画の会」・「宇宙学校」・「君が作る宇宙ミッション(きみっしょん)」・各種シンポジウムの中止、宇宙科学探査交流棟の閉鎖、等を行ってきました。

並行して、生命や健康・日常生活に即効的直接的に寄与できない宇宙科学にいったい何が出来るのか、自問自答してきました。2010年「はやぶさ」の地球帰還が、2011年東日本大震災に打ち拉げられる日本に少しでも勇気を与えられたことを思い出しました。再び、コロナ禍／五輪延期の日本に寄与できるように尽力したいと思います。それを実行するために、4月冒頭には宇宙研内一斉メール配信にて、この苦しい数ヶ月を、

「太陽系深宇宙探査船団」波長統合した宇宙天文観測網」構築に向けて大きく飛躍するための準備の期間といたしましょう。

と伝え、職員・学生・プロジェクト・プリプロ・準備チーム・各基盤グループ・Working Group・Research Groupに奮起を促しました。そして、この不自由な業務環境の中であっても、確

実に未来を築きつつあり、

- 1) BepiColombo / 「みお」は、4月10日に地球スイングバイを達成し、進路を金星に設定
 - 2) 「はやぶさ2」は、本年11月～12月の地球帰還に向けて、5月13日にイオンエンジンを稼働させ、順調に加速中
 - 3) DESTINY+のプリプロジェクト化
 - 4) 「ひので」、「ひさき」、「あかつき」、「あらせ」等、軌道上衛星の順調な運用継続
 - 5) 大学共同利用システムとして、観測ロケット、再使用ロケット、大気球の運営
 - 6) 完成間近のGREAT、引き渡しの迫るOMOTENASHI / EQUULEUS / JUICE、開発中のXRISM / SLIM / MMX、の着実な進行
 - 7) 関連設備の維持
- といった布石を置いてきました。

緊急事態宣言解除を受けての業務正常化に向けての準備、感染防止と両立できる新しい業務運営の確立に取り組んでいますが、再度の緊急事態措置の発動も想定されます。これまで通りにはいかないと認識しつつも、宇宙研が世界の宇宙理工学を先導して、全体俯瞰した上で10年先の未来を先回りし、各領域に十二分な準備を施しワンチャンスであっても確実に成果を収めることを標榜します。(宇宙科学研究所 所長 國中 均)

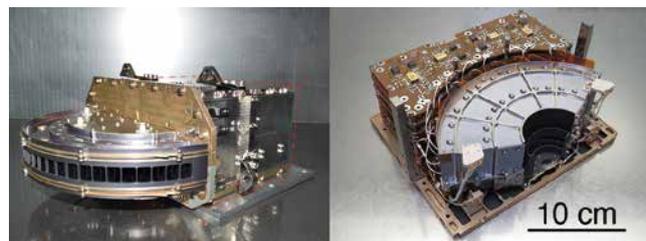
ISAS 事情

木星氷衛星探査計画 JUICE 日本チームの現状について

JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) は、ESA (欧州宇宙機関) が主導する大型木星氷衛星探査計画で、2022年5月にアリアン5で打ち上げられ、2029年に木星周回軌道に投入、2032年にガニメデの周回軌道に投入されて、ミッション終了の2034年まで世界初の氷衛星周回衛星として約1年半の間観測を行います。JUICEには国際公募によって選定された11の観測機器が搭載されますが、そのうち3つの機器、RPWI (プラズマ波動及び電波観測装置)、GALA (レーザー高度計)、PEP/JNA (粒子環境パッケージ/非熱的中性粒子分析器) には宇宙研からハードウェアの一部を提供して参加し、2つの機器、JANUS (カメラ)、J-MAG (磁力計) にはサイエンスメンバーとして参加しています。

JUICEは所内チームとしてハードウェアの開発を進めており、3つの機器のうちRPWIとPEP/JNAについては、昨年度のうちにフライト品の欧州へのデリバリーを完了することができました。写真はPEP/JNAのフライト品です。現在は残る一つ、GALAのフライト品の製作を進めており、本年度の夏には欧州にデリバリーする予定です。このところの最大の問題は、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う緊急事態宣言です。RPWI、PEP/JNAについては、欧州における感染拡大の影響が大きくなる前にフライト品のデリバリーを終えていて良かったのですが、GALAは大きな影響を受けています。GALAのPI機関はドイツのDLRで、ハードウェアはドイツの他、日本、スペイン、スイスなどいくつかの国が担当

部分を製作し、ドイツで最終的な観測装置として組み上げられます。これらの欧州の国々では日本より少し早く新型コロナウイルスの感染拡大によって都市封鎖などが行われました。ドイツへ出張して実施する予定であった、欧州担当部分と日本担当部分を組み合わせる試験も実施できなくなってしまい、その結果フライト品の完成が予定よりも遅れてしまいました。欧州側でも遅れは生じてはいるのですが、それでも何とかフライト品の準備を進めており、日本でもこれ以上の遅れは許されない状況になっています。まだまだ予断を許さない状況が続きますが、何とかこの困難を乗り越えてハードウェア開発の責任を果たしたいと思います。フライト品の欧州へのデリバリーが終わると、あとはフライトスペアの製造・試験と欧州へのデリバリーが装置開発の最後の作業となります。(JUICE所内チーム長 齋藤 義文)



PEP/JNAのフライト品。左：外観写真。右：外観写真の奥にある直方体の部分(赤い点線の部分)のカバーを外して見た内部の写真。

新型コロナウイルスに負けるな！ ～はやぶさ2プロジェクトより～

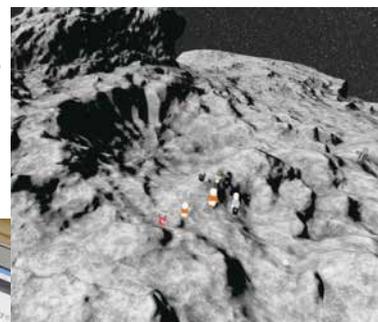
現在、新型コロナウイルスによって世の中が全くの想定外の状況になっています。はやぶさ2プロジェクトでも、5月末までは原則、在宅勤務で、探査機運用など必要な場合のみ出勤して作業をしているという状況でした。

「はやぶさ2トークライブシーズン2」として全国のいろいろな場所で企画していた講演会も、3月から6月は全て延期か中止になってしまいました。そこで、3月22日にはネットワーク上のトークライブを開催したり、また、5月5日(こどもの日)にはネットワーク上で“なぜなに「はやぶさ2」何でも質問教室”を開催しました。

これらのトークライブや質問教室は、講演者や質問回答者にWeb会議システムで参加してもらい、講演や解説をYouTubeで配信するというやり方で行いました。この配信の作業は、星空公団の小野間史樹さんらに行っていただきました。質問教室の方は250名ほどの皆さんに中継を視聴していただいたようです。

さらにバーチャルリアリティ(VR)を応用して、自分の部屋に居ながらにして小惑星リュウグウの上を歩きまわろうという試みも行われています。これは、太陽系物理学研究系のエリザベス・タスカーさんが中心となって試行されているもので、VR用の特別な装置がなくてもネットワークに繋がったパソコンがあれば体験できるものです。「はやぶさ2」が取得したデータを使ってよりリアルにVRの世界を構築すれば、自分がリュウグウに行ったらどのような光景を見ることができるのか、疑似体験できることになりそうです。

VRで参加者がリュウグウ表面を探索しているようす。(エリザベス・タスカー氏提供)



YouTube中継中のパソコン。(小野間史樹氏提供)

一方で、現実の世界に戻ると、「はやぶさ2」の第2期イオンエンジン運転が5月12日から始まりました。午前7時(機上、日本時間)にイオンエンジン1台が点火され、07:25(地上、日本時間)には安定して動作していることが確認されました。第2期イオンエンジン運転は9月頃まで続きますが、この運転が終わると、「はやぶさ2」は地球にカプセルを届けることができる軌道に乗ることになります。「はやぶさ2」もいよいよ、最終段階に入ってきました。

(吉川 真)

奥田 治之名誉教授が瑞宝中綬章を受章されました

2020年春の叙勲において、宇宙科学研究所名誉教授の奥田治之先生が、瑞宝中綬章を受章されました。

奥田先生は、日本における赤外線天文学の創始者と言っても過言ではありません。名古屋大学時代に、故早川 幸男先生の勧めで、松本 敏雄先生(宇宙研名誉教授)などに行った「岡山天体観測所における月の赤外線観測」は、日本における赤外線天文学の第一歩となりました。1967年に京都大学に移られ、故長谷川 博一教授のもと、長野県上松町に口径1mの赤外線望遠鏡を建設、赤外線偏光観測などのユニークな観測成果をあげられました。さらに、気球を用いた銀河系の赤外線サーベイ観測にも取り組み、銀河系中心部の構造解明につながる成果を生み出されました。

その後、スペースからの赤外線天文学を本格的に開拓すべく、1981年に宇宙科学研究所に移られました。そこで、気球を用いた遠赤外線分光観測に取り組み、星間ガスの主要な冷却源であると思われる[CII]158 μm スペクトル線の観測で、多くの成果をあげられました。

これらの成果をもとに、日本初の赤外線スペースミッションIRTS(Infrared Telescope in Space)の実現に、名古屋大学、東京大学のグループとともに、取り組みられました。IRTSは、超流動液体ヘリウムを用いた日本初のミッションでもあり、その実現には多くの技術的困難がありましたが、奥田先生の指導のもと、

その一つ一つが解決されていきました。IRTSは、多目的実験衛星SFU(Space Flyer Unit)に搭載されて、1995年に打ち上げられ、多くの成果をあげました。この成功が、その後の「あかり」(ASTRO-F 2006年打上げ)の実現およびSPICA計画(2020年代の打上げを目指す)の推進に発展して行きました。

このように、奥田先生は、まさに日本における赤外線天文学の発展とともに歩いてこられ、その発展に尽力されてこられました。心からお慶び申し上げます。

(中川 貴雄)



SPICA国際会議(2000年)で議論する奥田先生。議論の相手は、2006年にノーベル物理学賞を受賞したNASAのジョン・マザー博士。

塚本 尚義先生が紫綬褒章を受章されました

2020年春の叙勲において、前JAXA地球外物質研究グループ長の塚本 尚義先生（北海道大学大学院・教授）が、紫綬褒章を受章されました。紫綬褒章は、科学技術分野における発明・発見、学術及びスポーツ・芸術文化分野における優れた業績を挙げた方に対し授与される栄典です。

塚本先生は、筑波大学・東京工業大学・北海道大学において、長年にわたり研究教育活動に従事してこれ、19人の博士号取得者を含む数多くの若手研究者を育ててこられました。特に、研究室の若手研究者達と開発した世界初の同位体顕微鏡では、「太陽系形成初期の原始惑星系円盤に存在した最古の水」や「太陽系形成以前に存在していた岩石微粒子」を発見するなど、多くの科学業績を挙げてこられました。また、はやぶさプロジェクトでは、小惑星イトカワのサンプルの酸素同位体分析を主導されました。これらの科学業績は国際的に高く評価され、2019年には国際隕石学会により、顕著な功績をあげた科学者に贈られるレオナルド・メダルを受賞されました。

塚本先生と宇宙研との関係は、1990年代のMUSES-C（後の「はやぶさ」）計画の立上げ段階にまでさかのぼります。その後、「はやぶさ」帰還試料のキュレーションおよび初期分析チームの主要メンバーとして多大な貢献をされた塚本先生は、藤村 彰夫先生・安部 正真先生の後を受け、2016年に地球外物質研究グループ長に就任されました。グループ長としては、「はやぶさ2」のキュレーション設備の構築をJAXAインハウスで行うことで、「は

やぶさ」の経験に基づいた先進技術の導入に成功されています。

現在、地球外物質研究グループは、2020年12月の「はやぶさ2」試料の帰還に向け、一丸となって準備を進めているところです。そして「はやぶさ2」の後には、NASA OSIRIS-RExの小惑星Bennu試料の受け入れや、火星衛星サンプルリターン（MMX）に向けた研究開発が控えています。「そんなことしても、全然面白くないじゃん」が口癖*（？）の塚本先生に、「面白い!」と言ってもらえるような魅力的なサンプルリターン探査を成功させたいと思っています。塚本先生、受章おめでとうございます！

*少なくとも私の記憶では

（臼井 寛裕）



キュレーションチームメンバーとの記念撮影。
（右から6人目が塚本先生。2019年宇宙研キャンパスにて）

パリ日本人学校オンライン講座「科学を知ろう～今と科学とわたしと未来～」を開催

フランスのパリ日本人学校にて、5月にオンライン講座「科学を知ろう～今と科学とわたしと未来～」を開催しました。

新型コロナウイルスは、フランス社会にも甚大な影響を及ぼしています。現地の人々には、長期間の厳しい外出制限等が課されました。このオンライン講座は、休校が長引くなか、学習機会に限られる日本人学校の児童・生徒の皆さんへの手助けになればと思い、パリに事務所を置く国立研究開発5法人（JAEA/JST/NEDO/NICT/JAXA）が共同で立ち上げた企画です。各法人の専門家が、科学の基本から最先端の研究、社会と科学の関係まで様々なテーマについて紹介しました。

講座は全8回のリレー形式で行われ、JAXAは「太陽系探査のいま」と「地球温暖化を知ろう」の2回を担当しました。このうち「太陽系探査のいま」には、小学4～6年生70名程が、各家庭からオンラインで参加しました。講座では小惑星探査機「はやぶさ2」の吉川ミッション・マネージャと、水星磁気圏探査機「みお」の村上プロジェクト・サイエンティストが講師をつとめ、各ミッションについて紹介しました。子供達が現場のイメージを持ちやすいよう、ミッションの概要だけでなく、国内外の多くの人々の手で探査機が開発・運用される様子も示されました。講座の最後には、「惑星に触ったらどんな感じなのか」「地球スイングバイにはどれくらい時間がかかるのか」など、多くの質問が寄せられました。

欧州では、科学技術関連の研究キャリアを選ぶ若者の減少が

課題とされる中、各国の宇宙機関が青少年向けの宇宙教育事業を積極的に展開しています。ESAは国際機関という特徴を活かし、加盟国の教育担当省庁と連携して、各国に欧州宇宙教育支援室（ESERO）を設置しています。こうした取組みによって、欧州の宇宙開発を担う青少年が増え、また日本の人材も同様に維持され双方の交流が深まれば、将来の宇宙開発プログラムにおける日欧協力は明るいと云えるのではないのでしょうか。今回の講座が、子供達が科学に関心を持つきっかけになればと思います。企画に賛同して下さったパリ日本人学校の先生方に、この場を借りて御礼申し上げます。そして1日も早く、この厳しい状況が良くなることを願ってやみません。

（朝倉 寛子）



オンライン講座当日の様子。小学4～6年生70名程が参加した。

「みお」つくし

第14回

世代も国境も越え水星へ挑むベピコロomboの物語

水星 / 「惑わない星」より



従来とは違う「みお」の地上系システムと運用

ご存じの通り「みお」は日欧共同のプロジェクト「BepiColombo」の一部であるため、従来のISAS衛星とは運用方法が異なります。試験～打上後～水星到着後までフェーズ毎に地上系システムの構成(図参照)が変わります。

まずは、前半で試験から打上までの通信(テレメトリ/コマンド)について記述したいと思います。

日本での「みお」の地上試験は従来のISAS衛星と同じ様に進められましたが、従来との違いとして、フライトモデル総合試験に2年以上と長くかかりました。

その後、MPOとの結合試験の為、ESTEC(欧州宇宙技術研究センター)に地上系システムも輸送し試験に挑みました。地上システムをESTECに設置し、コマンドをESTECから打ち、テレメトリがESTECと日本に伝送されるかを確認します。ESTEC側の伝送試験は無事に終わり、日本にテレメトリを伝送するためISDNに繋ぎ伝送試験です。日本側と連絡をとりながらテレメトリが伝送されたのか確認するとISDNの電話回線は繋がっているのにテレメトリが伝送されないとのこと。持ち込んだ日本製のISDN装置がヨーロッパでは使用出来ないのか。急遽日本から海外でも使用できる装置の輸送をお願いしました。いつ届くのか、もし間に合わなければ別の手段に変更、それをいつ判断するのかと毎日ヒヤヒヤでした。やっと「みお」の試験1日前に届き装置を入替し試験実施、日本から「テレメ

トリが受信出来た」との声が聞けた時は、嬉しかったのを覚えています。その後は地上系としては試験も順調に進んだと思っています(古い機器が壊れ何回か輸送しましたが)。

打上げ日程が決まりCSG(Centre Spatial Guyanais)で、テレメトリ伝送試験を開始しましたが、日本側にまたテレメトリが伝送されない事態が発生。大急ぎで調査すると、使用したISDN回線ではデータ伝送不可であることが判明し、急遽別回線の伝送に切替え間に合わせました。海外とのデータ伝送は本当に大変だと実感しました。水星に到着するまで5年と長いので、機器を安全に維持していくのも今後の課題です。

では後半は打上からの運用編宜しくお願いします。

地上系システム担当 **山下 美和子**(やました みわこ)

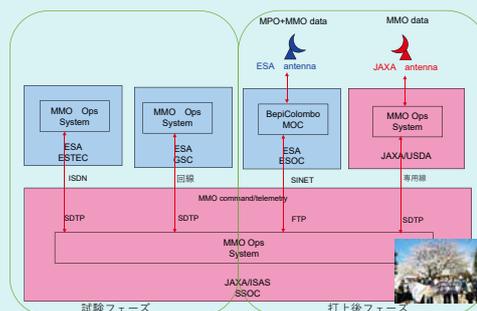


図 MMO Ground Segment Configuration

2018年10月20日、CSGから「みお」が打上げられました。

追跡管制隊員は、CSG、ESOC(欧州宇宙運用センター)、ISASの三拠点に分かれ衛星の状況を見守っていました。

私はISASにいて、「みお」のテレメトリを確認できるまでドキドキしたことをつい最近のように思い出します。

さて、打ち上げられた後もこれまでのISAS衛星とは違った形式で運用を行っています。

その一部をご紹介します。

● コマンド運用編

テレメトリやコマンドの授受はMPOを経由して行っているため、コマンド送信を行う場合にはMPOが解釈できる形式にして、運用の1-2週間前にESOCの管制装置へ送っておく必要があります。そのため、コマンド送信はESA(欧州宇宙機関)の衛星管制運用者が実施し、プロジェクトメンバーは現地もしくはISASからリモートでサポートする形式をとっています。

● 運用場所編

ISAS衛星は基本的にB棟の2Fか3Fの管制室で運用しています。しかし、「みお」は前述の通りESOCを介して運用をしていることから「みお」運用室で行っています。「みお」が管制室で運用するのは約5年後の分離運用からの予定です。

● 運用頻度編

航行中のBepicolomboの運用は週1-2回の頻度で実施されています。その中でMMOが運用できる日はさらに限られています。

運用頻度が少ないためパスの最初にダウンリンクするテレメトリも多かったり、MPOに運用時間を譲渡しなければならなかったりと、「みお」の運用時間が逼迫してしまうなんてこともしばしば…。分離までの運用は、常に時間との闘いとも言えます。

このように運用方法が違う分、地上での運用準備作業も異なりますが、最近では作業もスムーズに実施でき、効率化も進めてきました。

滞りなく安定した衛星運用が進められるように、黒子のような立場として今後も「みお」のミッション成功に寄与できたらと思います。地上系システム担当 **中村 英斗**(なかむら ひでと)



中央が地上系担当の山下さん、右端が筆者。左側の画面を通してリモートでESOCと連絡を取り合っています。

》宇宙に行くことを諦めていません

水星到着まで科学者は一休み？

——国際水星探査計画ベピコロンボで日本側の科学者代表(プロジェクトサイエンティスト)を務めていらっしゃいます。

ベピコロンボは、JAXAが担当する水星磁気圏探査機「みお」とESA(欧州宇宙機関)が担当する水星表面探査機MPOによって水星を調べ尽くそうというプロジェクトで、2018年10月に打ち上げられ、水星到着は2025年末の予定です。到着までの7年間、科学者は暇だと思われませんか。でも、そうではないんです。NASAの水星探査機「メッセンジャー」が2011～15年に観測したデータの解析が今も行われていて、新しいことが次々にわかってきています。すると新しい謎が出てくる。その謎を解くためにはどういった観測をするべきか、水星到着までの時間を使って議論し、準備を進めています。

国際プロジェクトで大切なもの

——このプロジェクトで最も楽しみにしていることは？

個人としては、「みお」に搭載されているナトリウム大気カメラMSASI(ムサシ)の最初の画像です。私が初めて開発に携わったのは、月周回衛星「かぐや」の紫外線カメラでした。その最初の画像が管制室のモニターに映し出されたときの感動は、忘れられません。そのときに、惑星探査の世界で生きていこう、と決めました。MSASIとは付き合いが長い分、もっと感動すると思います。

MSASIの開発に加わったのが大学院生だった2006年ですから、水星到着時には19年の付き合いになります。部品の一部は海外のメーカーが作りしました。国際協力での開発が初めてだった私は、最初とても苦労しました。国や文化が違えば、常識も違います。国際協力では、違いを理解した上で相手をリスペクトすることが大切です。それは一朝一夕にできるものではなく、トラブルを一つ一つ解決して、時にはお酒を飲みながら語り合うことで、ようやく歯車がかみ合うようになり、信頼関係を築けるのです。その経験は、今のプロジェクトサイエンティストの仕事にも活かしています。

——「みお」という愛称は一般公募で選ばれました。ESAの人たちの反応は？

好評です。選考では、海外の人が呼びやすいことも意識しました。水に関する提案が多かったと話す、ESAの人は「なぜ水？」と不思議がります。こういう反応も、言葉が違う国際プロジェクトならではのですね。

編集後記

まだまだ非日常が続いている方も多いと思いますが、今月号も発行にこぎつけました。こんな時こそ、いつもと変わらないことを大事にしたいですね。みおつくしも14回目になりました。みおつくし、元々は滞りずで航路の標識の意だそうです。世の中も迷わず進んでいくことを望むばかりです。(坂東 信尚)

太陽系科学研究系 助教

村上 豪(むらかみ ほう)

1984年、神奈川県生まれ。
東京大学理学部地球惑星物理学科卒業。
同大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。
宇宙科学研究所にて日本学術振興会特別研究員、宇宙航空プロジェクト研究員を経て、2017年より現職。



SF映画の嘘を暴こうとしたら

——なぜ惑星探査に携わるように？

父の影響でSF映画が好きになり、『2001年宇宙の旅』を見て宇宙ってかっこいいなと思っていました。でも、『トータル・リコール』のラストシーンは納得がいきませんでした。アーノルド・シュワルツェネッガー演じる主人公が空気のない火星表面に放り出されてしまうが、極にある氷が融け、氷の中に閉じ込められていた酸素が広がって助かる。そんな都合がよすぎないかと。ちょうど好きなテーマについて調べて新聞をつくるという宿題が出たので、「SF映画の嘘を暴いてやる!」と意気込みました。ところが図書館で調べると、映画は正しかった。それで、さらに宇宙に興味を持ちました。小学校の卒業アルバムの寄せ書きには「火星の石を持って帰ってきてね」とあるので、宇宙に関わる仕事をすると公言していたのでしょ。

——宇宙飛行士になりたいとは思わなかったのですか。

近い将来、宇宙飛行士でなくても宇宙に行ける時代が必ず来る、と考えていました。私がつくった月面望遠鏡が故障したとき、直せるのは私だけだったら、私が月に行くしかない、となるでしょう。だから、宇宙に持っていく装置をつくり、それを使って研究する道に進みました。特に、自分の代わりに宇宙に行き、目になってくれるカメラの開発に取り組んでいます。自分が宇宙に行くことは、今でも諦めていません。

水星の次は、地球外生命探査へ

——今後は？

宇宙には、人をわくわくさせる力があります。でも、いろいろな探査機が飛ぶようになって、少しらしいことでは感動しなくなってきました。自分もみんなも感動することをやりたい。今考えているのは、地球外生命探査です。私は、地球以外にも生命はいると思っています。地球外生命探査には何十年もかかるので、若い人たちにつないでいかなければいけません。それには、若い人に興味を持ってもらえるように情報を発信していくことが必要です。YouTuberになろうかな。

——研究開発において大切にしていることは？

楽しいチームにすることを心掛けています。惑星探査はよく航海にたとえられますが、クルーを楽しませるには、船長が一番楽しんでいることが大切。ふざけているように見えるかもしれませんが、自分のポリシーに従って真剣に楽しんでいるのです。



ISASニュース No.471 2020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 生田 ちさと
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

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