



水星磁気圏探査機「みお」の初期運用の様子

BepiColombo計画における「みお」の初期運用が2018年11月に行われた。多くの主要メンバーがドイツ・ダルムシュタットの欧州宇宙運用センター(ESOC)に滞在し、欧州宇宙機関(ESA)と連携して運用を進めた。(本文5ページ参照)

宇宙科学最前線

隕石に含まれる水素同位体に記録された火星の水の歴史

太陽系科学研究系 教授

臼井 寛裕 (うすいともひろ)

かつて海が存在し地球と似通った環境であったと考えられる火星。その火星がどのようにして水を失い、現在のような乾燥・寒冷化した惑星となったのか。ここでは、火星隕石に記録された火星の水の歴史を解説していく。

周回機探査による火星の水の探索および問題点

火星は地球から最も近い距離にある生命の存在条件を満たした惑星として、欧米を中心に数多くの探査研究が行われており、火星に関する我々の知見は近年、飛躍的に向上している。特に、Mars Express (ESA) や Mars Reconnaissance Orbiter (NASA) などによる可視・赤外分光観測により、約30億年より古い地質体*を中心に多くの流水地形や多種類の含水粘土鉱物が広範囲にわたり相次いで発見され、火星はかつてその表層に液体の水が存在するほど温暖で湿潤な環境であったことが示唆されている。一方で、現在の火星は極域に少量の水が発見されているのみである。液体の水の存在は惑星気候の指標である惑星表面温度や大気組成に制約を与える。そのため、火星のH₂Oの状態(氷・水・水蒸気)およびその総量が時代と共にどのように変化していったのかを

知ることは、火星の環境史を理解するためにも必要不可欠である。

火星にかつて存在した海(古海洋)の大きさに関しては、これまで地形データを基にした研究が精力的に行われてきた(図1)。特に、周回機探査から詳細な地形情報が得られるようになった2000年代以降、三角州などの地形情報を基に推定された海岸線の高度分布と、クレーター密度から得られた年代情報を組み合わせることで、古海洋の体積の時代変化を推定することが可能となった。しかしながら、このような地形学に基づいた推定は、地質記録が残されていない約40億年以前の海の情報や、固体として存在する氷に関する情報が得られないといった、手法上の限界が存在する。例えば、レーダーサウンダーを用いた地下構造探査により、古海洋に匹敵する量の水が現在でも氷として地下に存在している可能性が示唆されているにもかかわらず、この地下水の量に関しては全く制約が与えられていないのが現状である。

水(海洋・湖)および氷(極冠氷・地下水など)を含めた火星のH₂Oの総量の変遷を定量的に理解するためには、従来の地形学的研究とは独立したアプローチが必

*地質体とは地質学的な構造体のことを示し、一般的には、岩石や土壌、化石などを含む地層や岩体などから構成される。過去の海底に連続的に蓄積された堆積層(例えばカルスト台地)や、一連の火山活動で形成された火山堆積層(ローム層)などが例として挙げられる。ちなみに、相模原市古淵には関東ローム層の露頭が見学できる場所がある。

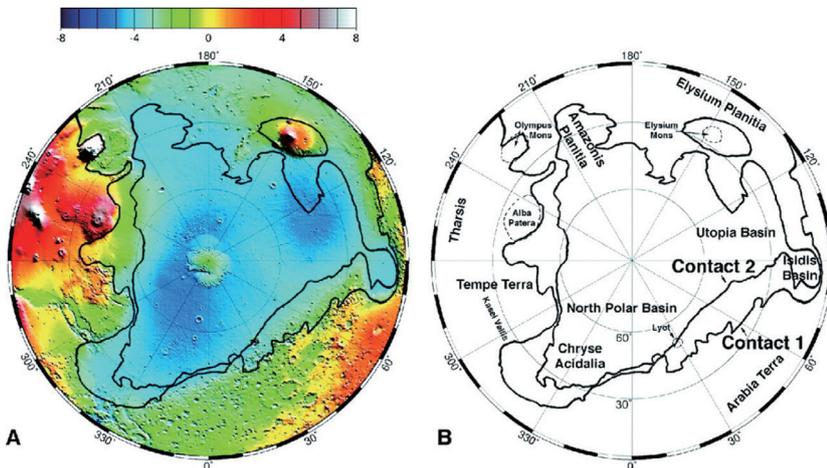


図1 火星の北極側からみた地形図。2つの黒線は、異なる時代に存在した古海洋の海岸線を表し、時代により海水量が異なっていたことを示唆する(Head et al. 1999)。

要であった。火星は、多くの探査研究に加え、隕石試料が存在する唯一の惑星であり、またその火星隕石の試料数は近年著しく増加している。隕石は火星上での産状が不明瞭であるという欠点があるものの、リモートセンシングに頼らざるを得ない探査研究と比較し、実験室での詳細な岩石記載・化学分析により高精度の地球化学的情報を得ることが可能である。本記事では、火星隕石に含まれる水の水素同位体(D/H比)分析から得られた、「火星の水の歴史」に関する最新の知見を紹介する。

隕石の水素同位体分析の課題と解決方法

水の主成分である水素の同位体は、海や氷床の蒸発および水蒸気を含む大気宇宙空間への散逸過程において顕著な同位体分別を生じることから、惑星表層水の歴史を知るうえで優れた化学的トレーサーである。一方、水素同位体は二次的変質や分析時の汚染の影響を受けやすいため、火星隕石をはじめとした地球外試料に関して信頼性の高い分析が行われてこなかったというのが現状であった。

我々は、NASA およびカーネギー研究所との共同研究に

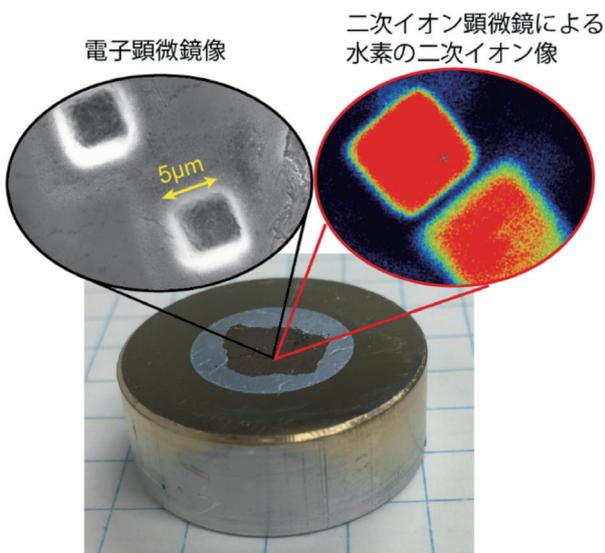


図2 インジウムメタルに包埋された火星隕石試料(低汚染分析用)。隕石の局所領域(<10 µm)から水素イオン(DおよびH)を検出する。

より、二次イオン質量分析計(SIMS)を用いた低汚染での水素同位体分析法を開発してきた(Usui et al. 2012, 2015)。SIMSは酸素やセシウムなどを収束一次イオン源として用いることにより、局所領域(一般的には10 µm以下)での高精度同位体分析が可能な装置である。このSIMSを用いることで、火星や地球上で生じた二次的変質部分を避け、未変質部分のみを局所分析することが可能となる。しかしながら、火星隕石は、火星から放出される際の衝撃(> 20 GPa)により生じた微細なクラックが無数に存在する。従来、SIMS分析で用いる研磨片を作成する際には、試料硬化剤として石油化学系の樹脂を使用する。この石油化学系の樹脂が微細なクラックに浸透し、SIMS分析の際の最も致命的な汚染源となった。そこで我々は、石油化学系樹脂の代わりに液体インジウムを用い、真空下で試料を固定することで、樹脂からの汚染の影響を取り除くことに成功した(図2)。

隕石に記録された火星の水の歴史

望遠鏡による分光観測や、火星探査車によるその場同位体分析により、現在の火星大気および表層水のD/H比は地球海水の約6倍という高い値が得られている。一方、我々によって開発された水素同位体分析法を始原的な火星隕石に適用することで、45億年前の火星誕生時に火星マントルに取り込まれた水(初生水)が、地球海水と同様(~1.3倍)なD/H比を示すことが明らかとなった(図3)(Usui et al. 2012)。このような火星史を通じたD/H比の大幅な上昇(地球海水の1.3倍から6倍)は、過去の大規模な海や大気の散逸の結果と考えられている。なぜなら、海水や大気中の水蒸気の散逸過程では、相対質量の重い重水素(D)よりも軽水素(H)が選択的に宇宙空間へ流出するからである。我々は、水

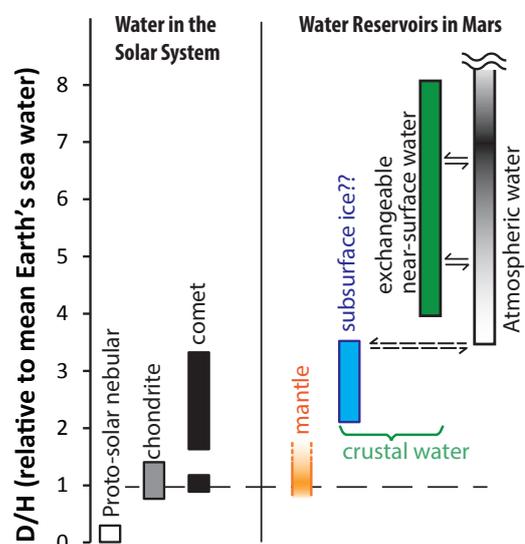


図3 水素同位体プロット。(左)太陽系に存在する水と、(右)火星に存在する水の同位体組成の比較(Usui et al. 2015)。

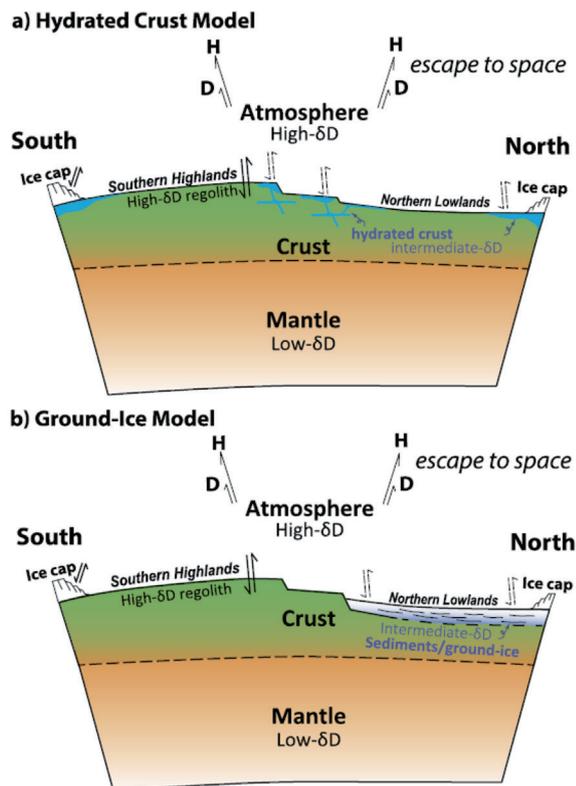


図4 水素の地下貯蔵層の場所を表した火星の模式断面図 (Usui et al. 2015)。過去に海洋があったとされる北半球の低地(図1)に(上)含水地殻、あるいは(下)凍土層として存在している可能性が高い。

素同位体分別効果を組み込んだ火星大気進化モデルを構築し、火星隕石から得られた約45億年前から近過去までの様々な時代における水素同位体データの解析を行った。その結果、火星の初期水量の半分以上が火星誕生後4億年間で宇宙空間へ流出したことが明らかとなった (Kurokawa et al. 2014)。また、我々の解析結果と、地形学から得られている古海洋の規模とを比較した結果、極域で確認されている氷の量をはるかに上回る量の水素が火星の地下に現存している可能性を示した。

火星の水の貯蔵層

火星地下の水素貯蔵層の検出を目指し我々が新たに着目したのは、火星隕石中に含まれる衝撃ガラスである。衝撃ガラスとは、火星への小天体の衝突により形成されたものであり、その衝撃により火星大気・表土成分が混入していることが示唆されている。SIMSを用いた衝撃ガラス分析の結果、火星表層水成分が、マントルに保持されている初生水とも火星大気中の水蒸気とも異なる、中間的な水素同位体比(地球海水の2-3倍)を保持することが明らかになった(図3) (Usui et al. 2015)。また、我々の発表の約1カ月後、火星表層で探査を行っていたキュリオシティローバーにより、過去の湖底粘土堆積物からも同様な中間的な水素同位体比(地球海水の3倍)が報告された (Mahaffy et al. 2015)。この中間的な水素同位体は、表層水(海・湖)や地下水からなる液体水の循環が活発であった頃(約40億年前)の表層水の水素同位体比を反映していると考えられる。このことから、我々は、当時の水循環により形成された含水層が現在においても地下に水素貯蔵層として存在しているとい

う結論に至った(図4)。近年(2015年以降)、地下帯水(氷)層からの季節的な塩水の浸出で形成されたと解釈されている地質現象 (Ojha et al. 2015) や、層厚100mを超える地下水そのものの露出が多数確認されるようになり (Dundas et al. 2018)、我々の予想した地下の水素貯蔵層の存在に関する地質学的な証拠が積み上げられつつある。

今後の展開

我々の研究により、一見すると乾燥した砂漠のような惑星である火星に、現在でも大量の水素が水(H₂O)あるいは含水鉱物(OH基)として地下に存在していることが示された。水素は重要な生命必須元素のひとつであるため、この地下の水素を利用した火星生命が、紫外線や宇宙線の影響を逃れるかたちで存在している可能性が示唆される。

一方、今回のような隕石研究では、地下水素の分布を厳密に特定することはできず、レーダーなどを用いたグローバルな地下リモートセンシング観測が必要となる。今後は火星サンプルリターンや火星有人探査といった、火星生命(あるいはその痕跡)の検出を第一目的とした探査が国際的に数多く計画されており、この研究成果がこれら探査計画の策定に強く反映されることが予想される。日本においても、現在、本格的な火星探査プログラムが検討されており、2024年の打上げを目指すMMX (Martian Moons eXploration)、そして2030年代の火星地下水圏・生命圏探査を今後20年のマイルストーンに見据えた検討が行われている(2017 Request for Information、惑星科学会)。

注記1: 本記事は筆者が『Isotope News』(2015年10月号、出版: 日本アイソトープ協会)に寄稿した解説論文(白井、2015)をもとに、2018年10月時点での最新の知見をもとに改定を加えたものである。

注記2: 火星の水の歴史に関しては『Volatiles in the Martian Crust』(Elsevier出版)のChapter 4 (Hydrogen Reservoirs in Mars as Revealed by Martian Meteorites, by Usui 2019)に詳しい内容が書かれているので、ご興味がある方はご参考いただきたい。

文献情報

Dundas C. M., et al. (2018). Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes. *Science*, 359(6372): 199-201.

Head J. W., et al. (1999). Possible ancient oceans on Mars: evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter data. *Science*, 286(5447): 2134-2137.

Ojha L., et al. (2015). Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, 8(11): 829.

Usui, T. (2019) Hydrogen reservoirs in Mars as revealed by Martian meteorites, in "Volatiles In The Martian Crust" (Eds. Filiberoto J. and Schwenger S. P.), Elsevier.

Usui T., Alexander C. M.O'D., Wang J., Simon J. I., and Jones J. H. (2015) Meteoritic evidence for a previously unrecognized hydrogen reservoir on Mars. *Earth and Planetary Science Letters* 410, 140-151.

白井 寛裕 (2015) Isotope news
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201510_TENBO_USUI.pdf

Usui T., Alexander C. M.O'D., Wang J., Simon J. I., and Jones J. H. (2012) Origin of water and mantle-crust interactions on Mars inferred from hydrogen isotopes and volatile element abundances of olivine-hosted melt inclusions of primitive shergottites. *Earth and Planetary Science Letters* 357-358, 119-129.

嵐(?)の前も忙しい…

MINERVA-II1 分離、MASCOT 分離、タッチダウンリハーサル、ターゲットマーカ投下と9月～10月は非常に慌ただしい運用が続いていましたが、11月になり運用は少し落ち着いたものになってきました。

10月末、ターゲットマーカを投下した3回目のタッチダウンリハーサル(TD1-R3)の直後から、BOX-C運用という探査機の高度を下げる運用を行いました。探査機は、高度20kmのホームポジションにいるときにはホバリング運用をしていますが、ホバリングの状態のままその高度を下げていく運用がBOX-C運用です。リュウグウに到着して最初に行った降下運用(7月17日～25日)がBOX-C運用でしたので、今回は、2回目のBOX-C運用となります。一方、ローバ、ランダ分離やタッチダウンのときの降下運用では、ホバリングではなくてより高度なナビゲーションの手法を用いています。

10月27日より、「はやぶさ2」は降下を始めました。前回のBOX-C運用では、約6kmの高度まで降下しましたが、今回は高度約5.1kmまで降りる「BOX-C1」と、高度約2.2kmまで降りる「BOX-C2」の2段階の運用を行いました。

10月30日、BOX-C1運用としてレーザ高度計や光学カメラを用いた観測をしました。そして、更に高度を下げてBOX-C2運用を行いました。BOX-C2運用の目的はTD1-R3で投下に成功したターゲットマーカを撮影して、その位置を正確に知ることです。ターゲットマーカ・探査機・太陽が一直線に並び位置めがけて探査機を降下させ、タイミングよくカメラをターゲットマーカの方に向けて撮影をしました。撮影は成功し、白く輝くターゲットマーカを撮影することができました。ターゲットマーカは確かに探査機を導いてくれそうです。その後、高度約2.2kmまで降下したあと探査機は燃料節約のためゆっくりと上昇し、11月5日にホームポジションに戻りました。

11月下旬から12月末までは「合運用」になります。合とは惑星の配置で使われる「合」と同様に、地球から見て探査機が太陽に重なることを指します。探査機が太陽に完全に重ならなくても、太陽からの離角(探査機-地球-太陽がなす角)が3度以下になると、探査機との通信に影響が生じます。これは、太陽自体が強い電波源ですし、太陽の周りにはプラズマがあるためです。そこで合前後の期間は、探査機との通信ができないことを想定して探査機を安全な状態で放置しておくことにします。これを合運用と呼んでいます。

11月23日、「はやぶさ2」はスラスタを噴射し、ホームポジションから秒速約12cmでリュウグウから離れる方向(太陽方向)に移動を開始しました。リュウグウから遠ざかる運用は今回が初めてです。「はやぶさ2」は、最大で100kmほどリュウグウから離れて戻ってくる軌道に乗りました。この軌道は、太陽の光の圧力(太陽輻射圧)、リュウグウの引力、そして太陽の潮汐力(太陽

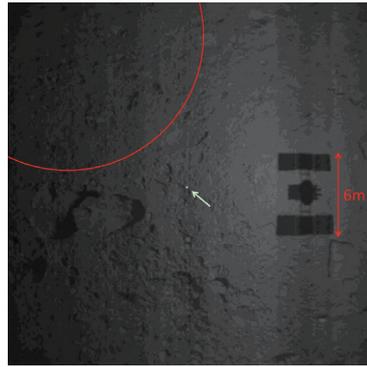


図1 3回目のタッチダウンリハーサルTD1-R3実施時に広角の光学航法カメラ(ONC-W1)で撮影されたリュウグウ表面の画像。矢印の先の白い点がターゲットマーカであり、赤い丸はタッチダウンの最有力候補地であるLOB-Bの領域(直径約20m)を示す。撮影日時は10月25日11:47(日本時間)で、撮影高度は約20mである。

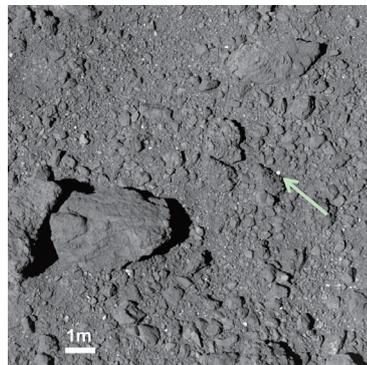


図2 望遠の光学航法カメラ(ONC-T)で撮影したターゲットマーカ(矢印の先)とその周辺。2018年10月25日、11:50頃(日本時間)に高度100m付近から撮影。(画像クレジット: JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所)

の引力と言ってもよい)を検討して、燃料消費量が最小になるように工夫されたものになっています。合運用中は軌道をモニターしながら必要に応じて軌道修正を行います。

このように探査機の運用は落ち着いたものになってきましたが、プロジェクトメンバーの頭にあることは、タッチダウンそして衝突装置(インパクト)の運用です。図1に示されているように、ターゲットマーカはタッチダウンの最有力候補地から5mほど離れたところに着地しています。このターゲットマーカを目印にしてタッチダウンできるのか、さらにもう1つのターゲットマーカをより近くに降ろす必要があるのか、検討が続いています。さらには、図2のようにターゲットマーカ周辺にも岩塊は多く存在していますから、そもそもこの候補地点に着地できるのかという問題もあります。そして、タッチダウンの後には、衝突装置の運用という世界初の運用が待っています。これはタッチダウン以上にリスクのある運用と言ってもよいでしょう。

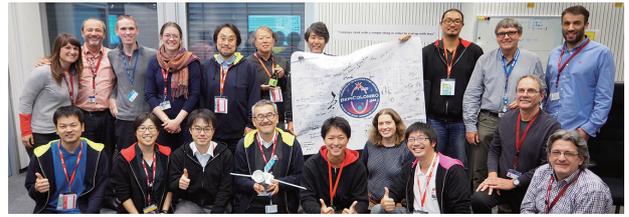
現在(12月)は、タッチダウンや衝突装置の運用という大変な運用の前の合運用ということで、「嵐の前の静けさ」かと思いきや、プロジェクトメンバーは相変わらず忙しく活動を続けています。2019年の新たな挑戦成功を願いつつ…。(吉川 真)

水星磁気圏探査機「みお」の初期チェックアウト、無事終了！

国際水星探査計画 BepiColombo の水星磁気圏探査機「みお」、水星表面探査機 MPO および電気推進モジュール MTM は 2018 年 10 月 20 日の打上げ後、58 時間にわたるクリティカルな初期フェーズを経て、NECP (Near Earth Commissioning Phase) とよばれる近地球チェックアウトフェーズに移行しました。このフェーズでは、MPO・MTM のサブシステム、MPO の観測機器、そして「みお」の初期チェックアウトを行います。

「みお」、MPO、MTM は結合した状態で水星軌道まで巡行しますが、この間「みお」が生成するデータは MPO のテレメトリの一部として地上に送信されます。MPO との通信には、ESA が所有するマラルグエ局(アルゼンチン)が主に使われます。MPO テレメトリは、BepiColombo の運用を行うドイツの ESOC (欧州宇宙運用センター) に送られ、その中から「みお」のデータを抽出して JAXA の地上系システムに配信しています。ISAS の運用室はもちろんのこと、ESOC の一室にも必要な機器を設置しテレメトリを確認できるようにしました(表紙写真)。

コマンドは ESOC の管制室から送信します(筆者の持ち場はこの管制室です)。ISAS の運用室と連絡を取りつつ、ESOC のオペレータにコマンドの送信指示を出していきます。11 月 6 日に「みお」に電源を投入し、慎重に各機器のチェックを進めました。日本/ドイツの 2 拠点にメンバーを配置し連携して進めるこの方法は、地上



バス部のチェックアウトが一段落し、ESOC の管制室で記念写真(JAXA、NEC、ESA、Airbus DS の運用関係者)。一緒に水星を目指す頼もしい仲間たちです(前列左から 2 番目が筆者)。

試験や運用訓練で何度も練習したかきがあり、手順を非常に順調に進めることができました。

「みお」は 2015 年 4 月に日本を出発して以来、打上げまで実に 3 年半を海外で過ごしています。この間、何度も電気試験を実施しましたが、関係者全員がその都度現地に行けないため、海を越えて伝送されるテレメトリを日本で確認していました。「海外」が「宇宙」になっただけで、どこか遠くから届くデータを淡々と確認することには変わりはないのですが、 -110°C を示す温度データや日々長くなる伝搬遅延時間が、「みお」は確かに宇宙にいてしかもずいぶん遠くにいるんだなあ実感させてくれます。

「みお」の初期チェックアウトは 11 月 26 日に完了し、探査機に異常がないことが確認できました。次回は 2019 年春~夏(予定)の観測機器詳細チェックアウトです。それまで「みお」の運用はしばしお休みとなります。(関 妙子)

火星衛星探査計画(MMX)の検討状況

火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration: MMX)は、世界初の火星衛星からのサンプルリターンミッションです。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、宇宙工学を先導する航行・探査技術の獲得をミッションの目的として掲げ、2024 年度の打上げを目指し検討を進めています。

今年度に入り、MMX ミッション特有の新規性の高い技術課題(着地ダイナミクス、誘導制御、画像航法、運用など)の克服を目的とした探査機システムの検討を、システムメーカー 2 社による同時並行で実施しています。毎週 1 回の各社の全体進捗確認会、新規性の高い項目の分科会、メーカーと JAXA 間での各種要求仕様書のすり合わせを定期的に行い、11 月末にシステム検討結果の最終報告を行う予定です。この後に、探査機システムメーカーの競争的選定プロセスを開始する予定です。

MMX は国際協力プロジェクトであり、多くの海外機関と協力してプロジェクトを進めています。その一環として 10 月 3 日に、フランス国立宇宙研究センター(CNES)、ドイツ航空宇宙センター(DLR)とともに「MMX における協力に関する共同声明」を発表しました。「はやぶさ 2」に搭載した小型着陸機「MASCOT」の次のステップとして、MMX 探査機に搭載する小型ローバについて



NASA MEGANE チームと JAXA MMX チームとの議論の様子。

CNES と DLR が共同で開発することが合意されました。この発表は 10 月 1 日~5 日にドイツ・ブレーメンにて開催された International Astronautical Congress(IAC) において行われ、主要な欧米宇宙関連メディアでも取り上げられました。また、11 月 6、7 日には NASA の MEGANE (Mars-moon Exploration with GAMMA rays and NEUTRONS) チームが相模原キャンパスを訪れ、MMX チームとの間で搭載予定の観測機器についての深い議論が行われました(写真)。

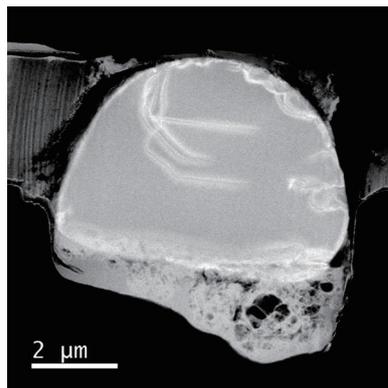
ミッション機器は概念設計を完了し、要求仕様の策定が行われました。その後、競争契約が必要ないいくつかのミッション機器は技術評価専門部に評価内容を附議し、了解されました。それを受けて、メーカー選定プロセスを開始して開発メーカーを順次決定しています。今後は開発メーカーが主体となって予備設計を進めていくことになっています。(川勝 康弘)

「たんぽぽ」3年間の曝露実験を終了、捕集実験では小惑星起源の塵を同定

小惑星リュウグウに関する新発見が「はやぶさ2」から次々に報告されている昨今ですが、もう一つのサンプルリターンが国際宇宙ステーション（ISS）にて進行中です。予算規模は「はやぶさ2」の1%にも遠く及ばないですが、日本初のアストロバイオロジー宇宙実験である「たんぽぽ」計画です。極限環境微生物や有機物試料を宇宙環境に曝して、その生存率や化学変化を調べる10 cm角の曝露パネル3枚と、宇宙塵などの固体微粒子を捕らえる同サイズの捕集パネル3ダースが、2016年以来毎年地球へ持ち帰られ、全国の共同研究者によって分析が進められています。

曝露実験では、2015年5月から曝露パネル3枚を同時に宇宙に曝しました。そして2016年6月には384日間曝露した初年度試料を、2017年7月には769日間曝露した二年度試料を、2018年7月には1,126日間曝露した三年度試料を、それぞれ無事回収しました。初年度試料では1年間の宇宙曝露後の微生物の生存が確認され、成功基準のミニマムサクセスを達成しました。3年間の試料全てが地上に戻った今後は、最高・最低温度、紫外線照射量、放射線照射量の変化データを指標として、ISS与圧部内および地上に保管された対照試料と比較することで、地球低軌道での極限環境微生物の死滅曲線や有機物の経年変化を解明し、フルサクセスを達成します。

一方の捕集実験では、初年度捕集パネル11枚が2015年5月から384日間（一部は2015年11月か



「たんぽぽ」捕集パネルで捕まった小惑星起源宇宙塵の断面画像。
提供：野口 高明（九州大学）、矢野 創（JAXA / ISAS）

ら486日間）、三軸制御のISSの進行面、常に地球と反対を向く宇宙面、ISS進行面から見て与圧部と反対の面の三方向に曝露されました。続く二年度試料の12枚は2016年6月からの385日間、三年度試料の12枚は2017年7月からの357日間、共に同一条件で曝露されました。最後の四年度試料は進行面に1枚だけですが、2018年7月以来、現在も曝露中です。初年度試料の初期分析では、衝突痕の立体形状の解析からISS構体による二次衝突放出物と遮蔽の効果を補正することで、宇宙塵による衝突の一部が識別されました。二年度試料の初期分析では元素・鉱物分析から小惑星起源の宇宙塵が同定され、成功基準のミニマムサクセスを達成しました。今後、宇宙塵の地球降下量の経年変化を導出して、この課題でもフルサクセスを達成する見込みです。（矢野 創）

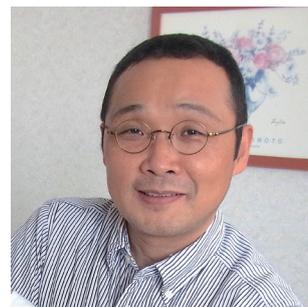
川田 光伸さんの思い出

川田 光伸さん（宇宙物理学研究系・准教授）が、約2年に及ぶ闘病の末、2018年9月5日に54歳の若さでこの世を去られました。私が川田さんと出会ったのはもう30年前、名古屋大学U研赤外線グループの大学院生だった彼と、観測ロケット実験と一緒に関わった時でした。そのときからこれまで、IRTS、「あかり」、そしてSPICAと、私はずっと川田さんと共に仕事をしてきました。川田さんの緻密かつ精巧な技術力や文章力に随分と助けられてきました。今は喪失感に呆然とする日々です。

11月10日に、「川田光伸さんを語る会」を開催しました。全国各地から川田さんを慕う80名以上の方が集まり、川田さんの業績を偲ぶと共に、たくさんの思い出を語り合いました。川田さんは、「あかり」の観測装置の一つ「遠赤外サーベイヤー（FIS）」開発の取りまとめ役として、チームの進むべき・やるべき方向を示し、その中でメンバーそれぞれの出来ることをさせるよう計らっていました。FISが観測装置として形になり、全天サーベイを成し遂げることが出来たのも、川田さんの存在があったことでした。当時の若手メンバーによると、開発は連日深夜に及ぶこともあって大変だったものの、川田さんのおかげで全く辛く感じた記憶がなかったのだそうです。川田さん自身は一見おっとり飄々とした雰囲気、チームの皆を癒やしてくれるような人柄ですが、実はしっかりとした信念を持っていて、特にものづくりについて妥協を許さないところが尊敬を受けていました。

川田さんは、学生をとっても大切にしていました。名古屋大学講師時代には多くの学生の指導を行い、その誠実な優しい人柄から大変慕われていました。そして奥様によると「未来を担う子どもが大事だ」が口癖だったとのこと。私たちは、川田さんの遺志を未来につなげていきたいと思えます。

（松原 英雄）



リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。

近日参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2



サンプラホーンを見守る眼

10月に実施したタッチダウン（TD）リハーサルは大成功を収め、ターゲットマーカ―も無事にリュウグウ表面に置いておくことができました。

この機会に小型モニタカメラ（CAM-H）の連続撮像リハーサルも実施し、こちらも大成功、カッコイイ連続画像を取得することができました。本来は、タッチダウン直前の自由落下開始時に撮像をスタートし、TDの瞬間を1秒に1枚の頻度で撮像する計画ですが、リハーサルでは本番とは異なり、上昇△V実施直後から撮像をスタートしました。

結果は「はやぶさ2」ホームページにて公開しております^{*1}。サンプラホーンと共にリュウグウの石などがはっきり写っている画像を見たときには、本当に興奮しました（図）。

さて、ここにきて悩んでいることがあります。CAM-Hは本体の影の中にあるホーンを綺麗に撮るためにLEDの照明を備え、カメラの設定も決めていました。この条件で撮るとホーンがはっきりと写るし、人の目では見えないLRF-S2^{*2}のレーザー光も写すことができます。ただ、非常に暗いものを撮ろうとしているので背景にあるリュウグウ表面は真っ白になってしまいます。

*1 http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181030_TD1R3_CAMH/

*2 <http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180905/>

リュウグウの声を聴くために

「はやぶさ2」が小惑星リュウグウに到着して、5カ月あまり経過しました。年が改まったら、いよいよ着地しての試料採取です。これまでの観測から、リュウグウは全球的に水を含んだ鉱物が少ないこと、地球上の多くの隕石より黒いことなどがわかってきました。着陸機MASCOTの表面観測・分析データももうすぐ全容が見えてくることでしょう。採取されるリュウグウ表面の試料の分析は、リュウグウの声を聴いて、観測から得られる地質情報を、物質科学の観点から理解するためのインタビュアーの役割を担います。また、試料分析を通じて、太陽系の歴史をその起源まで遡ることや、地球の海や生命の材料の供給源として、水や有機物を含む可能性のあるC型小惑星が果たした役割を明らかにすることをめざします。

リュウグウの声をよりよく聴くために、試料を可能な限り多く、綺麗な状態で持ち帰ることをめざして、先月も紹介されたように、「はやぶさ2」サンプラには、理学の観点から検討・開発した新たな要素が加わっています。リュウグウ表面試料に出会うことは当然楽しみです。多くの議論や試験の末にできあがったサンプルコンテナに再会するのも楽しみにしています。

リュウグウの表面は岩塊だらけで、イトカワのミュージーアの海のように細かな粒子に覆われているというわけで

今回はリハーサルということもあり、リュウグウ表面が撮れる設定にしたのでホーンは影絵のように写っています。これはこれでカッコイイのですが、これではTDの瞬間のホーンの様子がわかりま



図 TDリハーサル(2018年10月25日)で撮像した高度20mからの画像。

せん。当初の計画通り、ホーンが写る設定にして表面を諦めるか、それとも表面に合わせた設定にするか、得られたデータをよく解析してから決定し、本番に臨みたいと思います。

下の橘さんの記事でも触れられていますが、この夏、サンプラと一緒に開発した岡本さんがご逝去されました。自分が携わった装置の出番を待ち望んでいたことと思います。この場を借りてご冥福をお祈りいたします。

CAM-Hはサンプラホーンを見守り、TDの瞬間を捉えるのがその役目です。彼女の想いと共にTD本番、サンプラの晴れ舞台を見守りたいと思います。

「はやぶさ2」CAM-H担当 澤田 弘崇（さわだ ひろたか）

はなさそうです。とはいえ、弾丸発射型の「はやぶさ2」サンプラはあらゆる表面状態に対応できる設計になっており、試料採取は問題なく行われると期待しています。弾丸発射部の開発のための基礎実験も数多く行いました。その実験を中心になって進めてくださった岡本 千里さんが今夏ご逝去されたことを、この誌面をお借りして、お伝えしたいと思います。衝突の専門家である彼女のおかげで様々な実験が進み、サンプラは完成しました。試料採取をともし守ることができないのが残念で仕方ありません。開発のなかで彼女が得たデータは、衝突の科学としても、「はやぶさ2」探査としても重要なものです。彼女に代わって、それを世に出すことをひとつの供養したいと思います。岡本さん、これまで本当にありがとう。サンプラの出番はもうすぐだよ。

「はやぶさ2」サンプラ・試料分析担当 橘 省吾（たちばな しょうご）



プレーメン大学ZARM微小重力実験施設落下塔でのサンプラ試験の準備をする岡本 千里さん(2011年7月19日撮影)。



「はるか」搭載の大型展開アンテナが、電子情報通信学会マイルストーンに認定

宇宙科学研究所 名誉教授

三浦 公亮 (みうら こうりょう)

JAXA 名誉教授

高野 忠 (たかの ただし)

電波天文衛星「はるか」に搭載され、スペースVLBI*に供された大型展開アンテナが、電子情報通信学会マイルストーン第1号の一つに認定されました。これは、我々の社会や生活、産業、科学技術の発展に大きな影響を与えた研究開発の偉業を選定するために、2017年に制定されたものです。この事実は、皆様に余り知られていないようなので、ここに紹介したいと思います。なお顕彰板は、研究所内の展示棚に飾られています。

「はるか」は工学試験衛星であり、その目的の一つが大型搭載アンテナの開発でした。そのスペックは、(1)展開時最大直径10m、収納時は直径2m以下、(2)周波数1.7~22GHzと厳しい。

その時代、世界で最大級のアンテナの代表は、ATS-6搭載のWrap-Rib Antennaで、メッシュ面を、放射状の48本のリブで支える、傘のようなデザインでした。この種のデザインでの問題は、リブで支えられる膜面のやせ馬のあばら骨の形状です。その結果は、ガウスの曲率正のパラボラ面を、ガウスの曲率負のメッシュ面で構成するという矛盾を含みます。それを避けるにはさらに多数のリブを必要とします。

筆者の一人(三浦)は、この問題について、「ガウスの曲率ゼロの平面で近似した方がまし」とし、それを可能とする、テンショントラスという新しい展開アンテナ構造のコンセプトを提案しました。このパラボラ鏡面は、6本の伸展マストで5,800本のケーブルに張力を与えて形を作ります。その上に金属線メッシュの三角形平面を構成し、電波反射面とします。これを折りたたんだ状態では、縮めたマストで大きさがほぼ決まりますから、収納から展開の効率が良いのが特長です。テンション(ケーブル)トラスのコンセプトは、ETS-8や、AstroMeshアンテナに受け継がれています。

勿論、新しいコンセプトの実現には多くの新しい問題を解決しなければなりません。最大の問題は多数のケーブルの、打上げ時、展開時の挙動です。そこで、所内外の専門家に知恵を出していただき、解決していただきました。この時点で皆さんに見ていただきましたが、「本当に開くのか?」という意見が多かったのは、絡み防止がいかに難しいか認識されていたためだと思います。

電気特性から見ると、三角形面素で近似したパラボラ反射鏡面からの放射波計算や、極細の金属線を日本古来の



(a) 収納状態



(b) 展開状態

図 「はるか」搭載の大型展開アンテナの外観と展開の様子。

織物技術で織ったメッシュ反射面の反射率測定法などで、工夫しました。アンテナの放射特性確認では、アンテナ近傍の電界を測定し、それから遠方パターンに変換する方法を採りました。そのため専用の測定設備と解析ソフトを構築しました。

このようにして、アンテナを搭載した「はるか」は、1997年2月12日にM-V型ロケット1号機で内之浦から打ち上げられました。最初のアンテナ展開では、ロックが確認できませんでした。どうも金属メッシュに、折りたたみ癖がついてしまったためのようなのです。そこで1日太陽光で甲羅干しをして、しわを伸ばしたところ、ロックの信号が返ってきました。2月28日のことです。

それから天体を電波源として、アンテナ特性を測定しました。22GHzを除いて、1.7GHzと4.8GHzについては予定通りの特性を確認でき、以後貴重なスペースVLBIのデータが取れたことは、工学担当の誇りとするところです。そして、「はるか」は2005年まで運用を続けました。

振り返ってみると、大型アンテナ開発には機械技術と電気技術の融合が必要です。研究所内の両担当者の協力は、不可欠であることが実感されました。反面各分野の基礎研究が、比較的長い時間をかけて行われたことも重要です。

またこのアンテナは、ニーズ(理学系)とシーズ(工学系)の協力がうまくいった好例とも言えます。ニーズだけでは絵空事になるし、シーズだけだと役に立たない研究ということになります。このような様々な協力関係ができることが、宇宙科学研究所の強みでしょう。

*スペースVLBI: 複数の大型アンテナの一方を宇宙に打ち上げて、アンテナ間の距離すなわち観測の分解能を上げるVLBI技術。



ISASニュース No.453 2018年12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

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

本ニュースは、インターネット(<http://www.isas.jaxa.jp/>)でもご覧になれます。

デザイン制作協力/株式会社アドマス

編集後記

今月号も8ページの限られた紙面に火星、小惑星、水星など話題が満載でした。記事を読んでも初めて知ることたくさんある。今月号からは、昨今どのミッションも国際的に展開され実現されていることを強く感じた。(清水 敏文)

*本誌は再生紙(古70%)、植物油インキを使用しています。



古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

