

「はやぶさ2」、 第2回タッチダウンに成功!!

7月11日、「はやぶさ2」は2回目のタッチダウンに成功しました。機上時刻で10:06（日本時間）、予定された地点内にサンプラーホーンが接地し、プロジェクトタイルを発射、そしてスラスタを噴いて上昇しました。上昇直後に撮影された写真を見ますと、非常に多くの石が舞い上がっています。タッチダウン地点は、人工クレーターから噴出した物質が降り積もっている場所です。リュウグウの地下物質の分析へ、期待が高まります。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

国際宇宙探査の枠組みで 検討されている月極域探査と科学

太陽系科学研究系 助教 大竹 真紀子 (おおたけまきこ)

月極域の水に関するこれまでの研究

近年、様々な月探査による観測データの解析により、月極域(本稿では緯度85度以上の領域を極域と表現します)で太陽光の直接の照射が無いような低温領域に、水が氷ないし霜のような形態で存在しているのではないかと、との報告が複数出ています(以下、水分子も水酸基もまとめて水と表現します)。月が誕生した頃から含まれている月本来の水の量は、地球などに比べて少ないと考えられていることや、月の水(氷にしる霜にしる)が月の極域に特に濃集しているという観測データがあるという理由から、月の極域で観測されている水は、彗星が月に衝突するなどの形で外部から月面にもたらされたものであると推定されています。ただし、月極域の水の証拠として報告されている観測データには課題もあり、これまでのところ科学者の誰もが認めるような確定的な結果は得られていません。また、水が本当に存在するとしても、その存在量(総量)については研究ごとの推定値に1桁以上のばらつきがあり、本当のところはよくわかっていないというのが現状です。

例えば、月周回衛星に搭載した観測機器を使って月面から中性子を観測する方法があります。月面に降り注ぐ銀河宇宙線と月面の物質が衝突して高いエネルギーを持つ中性子が生成されます。生成された中性子は月面を構成する物質の原

子核と何度も衝突して散乱され、その結果として減速しながら一部が月面から出てきます。この時、中性子の質量は陽子の質量とほぼ等しいため、質量数が小さい原子核と衝突する場合により減速され、衝突の相手が水素原子核(=陽子)の場合に中性子は最も効率的に減速します。そのため、中性子がどれだけ減速されたのか、月面から漏れ出てくる中性子を特定のエネルギー範囲について観測することによって、月面に減速に関与する元素(すなわち水素)がどれだけ存在していたかを知ることができます。これまでに、この原理を用いて月面の水素の分布が示されており、水素が極域に濃集していることまでは多くの研究者が認めています。測定原理上、この手法では水素が存在すると言えるだけで、それが水分子(H₂O)の形で存在するのか、水酸基(OH)として存在するのかまではわかりません[1]。

また、別な研究で物体を月面の高緯度領域に衝突させ、その放出物を観測した例では[2]、気体の水や他の分子が近赤外波長帯の分光観測によって同定されていますが、この結果は衝突を受けた特定の場所についてのみ有効な情報であり、他の場所のことはわからず、水が極域に全体としてどれだけの量存在しているのか、総量の推定は困難です。加えて、分光観測データから水の濃度を推定する場合は、誤差が大きいことも課題とされています。別の観測機器による月面全体の可

視・近赤外波長域の分光観測データの解析から、月表面に水氷の存在を示す3 μ m帯の反射スペクトルの吸収が見られたとする報告もあります[3]。ただし極域では太陽高度が低く、月面からの太陽光の反射信号強度が弱いので、ノイズの影響が無視できず水氷の吸収の有無の判別が困難であることや、月表面では水が氷として存在できないはずの温度が比較的高くなる領域にも水氷の吸収が分布してみえることなどから、観測データの信憑性については研究者の間でも意見がわかれています(月極域の水氷に関するこれまでの研究の詳細については[4]にまとめられています)。

月極域の水を調べる探査

これまでの研究では確定的な結果は得られていないと書きましたが、もし本当に月極域に水が氷として存在していて、その存在量がある程度高ければ、この水を採取したのちに月面上で電気分解することで、例えば月面から地球に帰還するためや、より遠方の火星を目指した探査を実施するための燃料資源として利用できる可能性があります。ただし、月面の水を利用することにメリットがあるのかどうかは、将来何回の月や火星探査を行うのか、またそこで必要な燃料はどれだけの量なのか、月面にどれだけの濃度・総量の水がどのような形で分布しているのか、それらの採取や水の抽出にどれだけのエネルギーや設備が必要か、などに依存しています。また、そもそも月極域に水が存在するかどうかについても、直接的で誰もが認める観測データを取得する必要があります。

これに対して、JAXAでは昨年7月に設立した国際宇宙探査センターを中心に、国際宇宙探査の枠組みで行うシリーズ探査の最初のミッションとして、月極域探査の実施を検討しています。具体的には、月極域の水の量や質(氷として存在するかどうかや不純物の有無など)を調べ、それを資源として利用することができるかどうかを決定づけるための観測データ取得を目指します。打上げは2020年代前半を目指し、打上

げロケットとローバをJAXAが、着陸機をインド宇宙研究機関(ISRO)が担当する計画です(図1)。

月極域探査の科学的な意義

国際宇宙探査センターで検討している月極域探査では、極域の水の資源利用可能性を評価することを主な目的にしています。月の起源や進化を解明するといった科学的な問題を解決するための探査とは位置付けが違っています。しかし、月極域探査を通じて月に外部由来の水が本当に存在しているとわかったならば、その起源や供給量などを知ることで、科学的に見ても重要な問題に迫れます。

例えば、水の起源が彗星や小惑星などの天体であることがわかった場合には、その供給量や供給速度をモデル計算などにより推定することで、現在の地球や月の周辺に外部からもたらされる水の量を推定することにつながります。また、その供給量や供給速度が地球や月ができた頃と現在でどう変わったのかを考えることで、地球の水の起源を理解することにつながられる可能性があります。一方で、月極域の水氷の起源が太陽風である場合には、月のようなほとんど大気を持たない天体表面において、太陽風と岩石、あるいは岩石が粉碎されたレゴリス粒子との反応により、水もしくは水酸基が形成されることの証拠になるかも知れません。さらに、もしこのような太陽風と月面物質の反応速度が、彗星や小惑星による水氷の供給速度に比べて大きい場合には、太陽系内での水の起源としても太陽風の寄与を考える必要があるということになるかも知れません。

月極域探査で行う観測(例)

実際にどのように水の起源を知ることができるのでしょうか。月極域探査では水が本当に存在するのか、またその起源などを知るために、まずこれまでの観測データをもとに、水氷が存在すると考えられる領域に着陸します。これまでの中

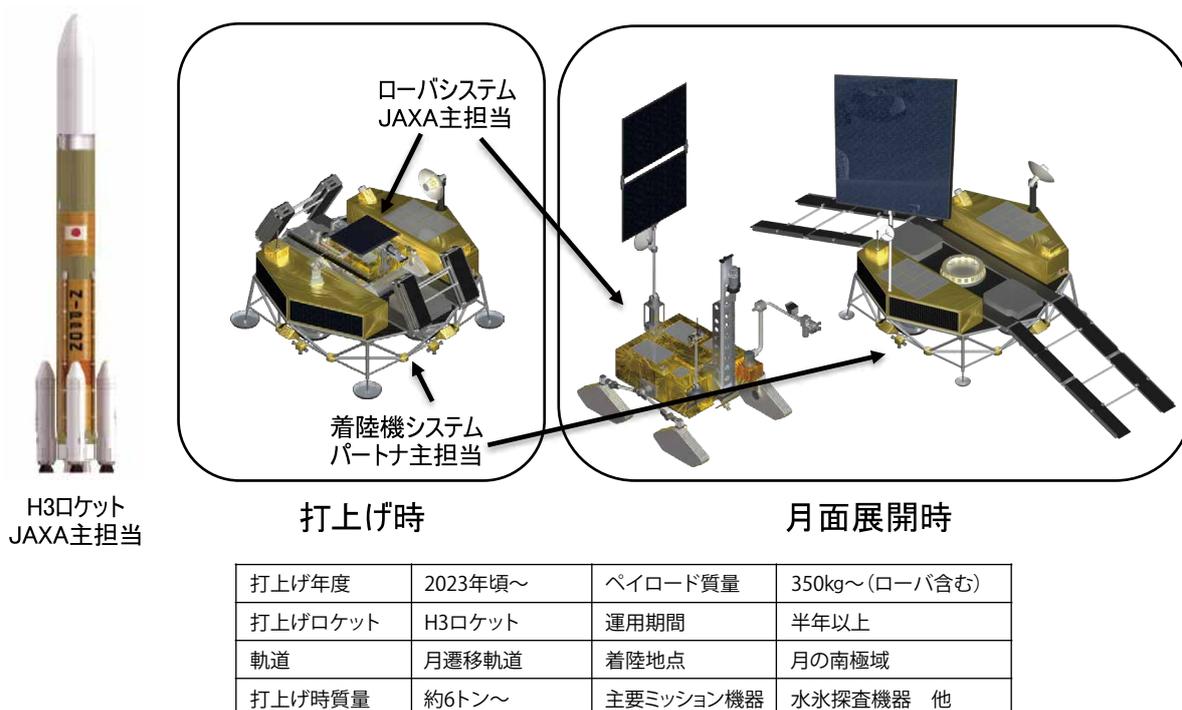


図1 月極域探査機の構成・主要諸元と開発担当

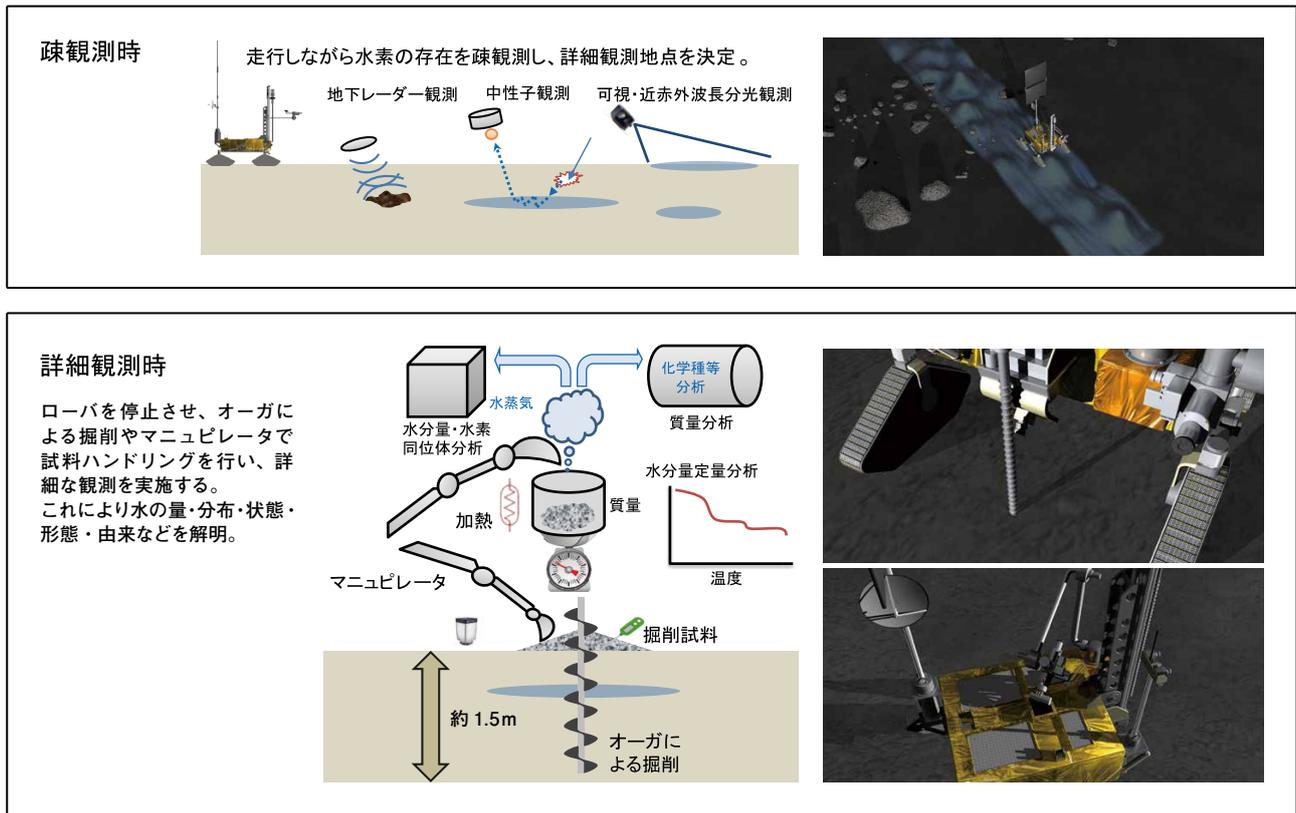


図2 月極域探査における観測コンセプト

まずローバで走行しながら疎観測を行い、水氷の存在が推定される場所で走行を停止し、詳細観測を行う。ここで示すのは観測の例であり、搭載する観測機器は決まっていない。

中性子観測データや熱赤外波長域での観測による月面の温度データなどからは、水氷は表面でなく地下数10cm～1.5m程度の領域に存在している可能性が高いと推定されています(表面でも非常に温度が低い永久影の領域では、水氷が表面に存在している可能性もあります)。中性子観測データによると、極域ならば大体どこに着陸しても(多少の濃度の差はあるにしても)水素が存在しているようです(ただし、中性子観測データの空間分解能が低いためにそのように見えるだけで、実際に月面上に降りてみると場所による差がある可能性もあります)。着陸後はローバで移動しながら中性子観測や分光観測、地下レーダー観測などを行い、水氷が存在する可能性が高そうであるという場所を特定します。次にその場所でアースオーガ(ローバに取り付けられたドリルのようなものです)を使ってレゴリスを掘削し、マニピレータなどを使ってサンプルの採取を行います。その後でサンプルを加熱して水氷を気化させ、水素同位体の分析を行う予定です。彗星や小惑星起源の物質であれば、水素同位体比(D/H比)は太陽風のそれに比べて約2桁高いことが知られており、その分析により、採取された水が太陽風起源もしくは彗星や小惑星起源なのかを切り分けることができると考えています。また、加熱して水氷を気化させる間に、サンプルの質量と温度を継続的に測定することによって、水の含有量を測定することも考えています。

なお、水氷が彗星や小惑星起源である場合には、水だけでなくメタンなど他の揮発性成分も同時に月面に供給された可能性が高いと考えられることから、それら揮発性成分の有無やそれらの量比を質量分析計により測定することも合わせて重要な情報です。この情報は科学的な意義だけでなく、水を

資源的に利用することを考えた場合に、どの程度の不純物の除去が必要なのかを把握するのにも役立ちます。現在、国際宇宙探査センターで検討している月極域探査では、図2で示すような観測を行うことを検討しています(ここで示しているのは観測の例であって、実際に搭載する観測機器は決まっていません)。

最後に

月極域探査は、将来の月・火星探査や有人宇宙探査を見据えて国際宇宙探査の枠組みで行う探査として検討されています。従来の科学探査とは異なる点もありますが、一方で国際宇宙探査の枠組みで行うシリーズ探査の1つとして検討されているということは、長期的な視点で継続的な観測機器の開発ができる可能性がある点など、プラスの面もあるのではないのでしょうか。月や火星など惑星探査に深く関わっている日本惑星科学会は、今年5月に今後の月惑星探査計画について記述した文書(JAXAからの情報提供依頼(RFI)への回答文書の改訂版。日本惑星科学会のホームページ[5]で公開されています)をまとめました。その中では、国際宇宙探査の枠組みで行う探査についても新しく記述が追加され(今回紹介している月極域探査と、その次に実施することが検討されている月からのサンプルリターンミッションHERACLESが追加されました)、新しい枠組みによる探査を考える議論は始まっています。

引用文献

- [1] Sanin, A. B. et al., 2017, Icarus 283, 20.
- [2] Colaprete, A. et al., 2010, Science 80, 463.
- [3] Li, S. et al., Proc. 2018, Natl. Acad. Sci. 201802345.
- [4] 特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」, 2019, 日本惑星科学会学会誌, 28, 4.
- [5] https://www.wakusei.jp/~RFI_kaitei2018/for_all/

「はやぶさ2」、2回目のタッチダウンに挑戦!

「はやぶさ2」は、今年の4月5日に衝突装置（SCI）によって人工クレーターを小惑星リュウグウ表面に生成することに成功しました。その後、その人工クレーター付近に降下する運用を4回行い、3回目の降下運用（ISAS ニュース6月号参照）では、ターゲットマーカをタッチダウン候補地点に投下することにも成功しました。ここまで来ますと、最終的に、タッチダウンを、「行すべきか、行わざるべきか、それが問題」ということとなります。1回目のタッチダウンが成功しているのに「それが問題」であるのは、やはりタッチダウンはリスクが大きいからです。特に、リュウグウの場合、広い平らな場所がないわけで、岩だらけの場所に探査機を衝突させないように制御して降りる必要があります。これは1度成功したからと言って、楽にできるというわけではありません。

また、探査機は、宇宙の遙か遠方で、厳しい環境の中、我々が触れることもできない状態で動作しています。常に不具合や故障というリスク（危険性）と隣り合わせです。タッチダウンを実行することは、プロジェクトメンバーにとっても不安です。ですが、漠然と不安がたついても埒が明きません。科学的・技術的にリスクを検証する必要があります。

実際、プロジェクトでは、2回目のタッチダウンについて、科学的また技術的な検討を続けてきました。まずは、2回目のタッチダウンを行うことが理学的そして工学的に価値があるかどうかです。観測により2回目のタッチダウンを行おうとしている場所には、クレーターからのイジェクタ（噴出物）があることは明らかになりました。つまり、タッチダウンを行えばリュウグウの地下物質を確実に採取できるわけですから、これは理学的に非常に価値が高いこととなります。また、複数箇所からのサンプル採取にもなります。このことも、理学的な価値を高めることとなります。なぜならば、リュウグウについて、より普遍的な情報を得ることができるからです。工学的にも、複数箇所からのサンプル採取や地下からのサンプル採取は世界初のことですから、当然、価値は高いものとなります。以上から、まずは理学的・工学的な価値が高いことは確認されました。

次に、運用のリスクです。運用のリスクが高いということで、敢えて危険を冒すことはすべきではない、という議論にもなります。そこで、まずは、人工クレーター付近でタッチダウン出来そうな場所をいくつか選び、降下運用によって、タッチダウン候補地点の地形の詳細な情報を得ました。そして、上述のようにそのうちの1つの地点にターゲットマーカを着地させることができたのです。そこが、最終的にタッチダウン予定地点となりました。

タッチダウン予定地点は、SCIによって生成されたクレーターから北の方向に約20m離れたところで、プロジェクトではC01-Cbと名付けた、半径が約3.5mの領域になります（図1）。周辺には、危険な岩塊（ボルダー）がありますし、C01-Cbの中にも岩塊があります（図2）。それらの岩塊の高さなども推定し、3次元的な地図も作ってタッチダウンを行う場合の危険性を確認した結果、探査機がタッチダウンしても問題ないと判断されました。

残る問題は、1回目のタッチダウンで光学系（広角の光学航法カメラやレーザレンジファインダ）の受光量が減少したことです。これは、タッチダウンの時に舞い上がった塵（ダスト）が

装置に付着したためだと思われます。この問題への対応については、影響があった光学系に切り替える高度を下げるなどして、受光量が減少したことを補うこととしました。実際、低高度運用をして、このやり方がうまくいくことを確認しています。

以上の検討の結果、2回目のタッチダウンのリスクは、1回目のタッチダウンのリスクと同等かそれ以下になるということが確認され、プロジェクトとしては2回目のタッチダウンを実行できると判断しました。そして、6月21日には宇宙研において承認、6月25日にはJAXAとしても了承され、2回目のタッチダウンを行うことが決定されました。

2回目のタッチダウンは、予定では7月11日に試みることになっています。* とにかく慎重に、しかし、勇気を持って大胆に、ミッションを進めていきます。（吉川 真）

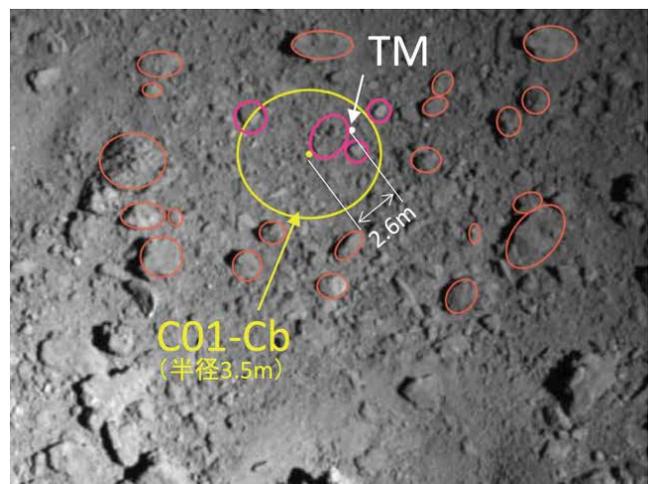


図1 第2回タッチダウンを試みる領域C01-Cb。ターゲットマーカ（TM）はこの領域の中心から2.6mのところを位置する。下の方に見える窪地がSCIによって生成されたクレーター。（画像のクレジット：JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研）

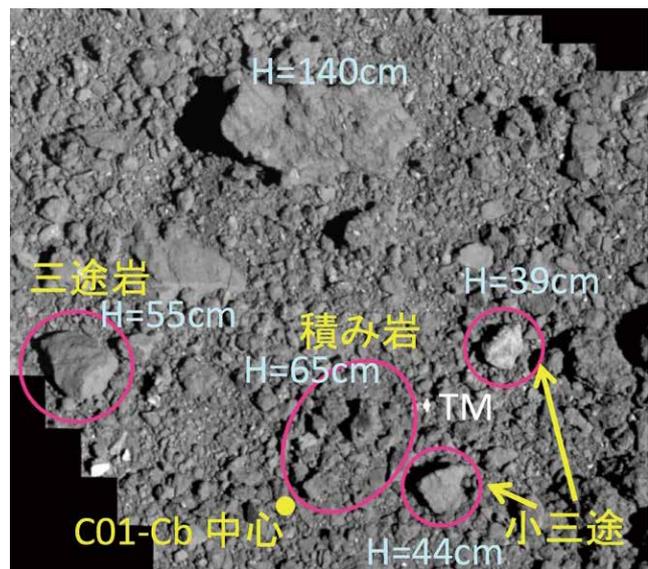


図2 C01-Cb領域の拡大写真。図中の数字は岩の高さの推定値を示す。図1でピンク色の線で囲んだ岩がこの図でも示されている。これらの岩は高さ65cm以下であるため、この領域にタッチダウンを行うことができる。岩の名称は、プロジェクト内でのニックネームである。（画像のクレジット：JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研）

* 7月11日に予定通りに第2回タッチダウンが実行され成功しました（表紙参照）。

「みお」のクルーズチェックアウト、あるいは定期健康診断

BepiColombo探査機は、昨年12月中旬に1回目のイオンエンジン連続運転を開始し、今年3月上旬に無事終了しました。イオンエンジン稼働中は探査機とのコンタクトを週1~2回に削減した省エネ運用でしたが、3月中旬以降は運用機会も増え各種チェックアウトを再開しています。

水星へ向かう7年間のうち大部分は、「みお (MMO)」本体は電源を入れず、必要最低限のヒータで温度を保ちながら過ごします。しかし、定期的な「健康診断」は必要です。BepiColomboでは6~8カ月おきに各探査機の搭載機器の状態をチェックする機会を設けています。これをクルーズチェックアウトと呼んでいます。

5月15日に「みお」の初めてのクルーズチェックアウトを実施しました。内容は搭載リチウムイオンバッテリーの電圧確認、そして観測機器の簡単な動作確認です。バッテリーは劣化を抑えるために低いSoC (State of Charge) で打ち上げています。自己放電が進みすぎないように定期的に電圧をモニタし、低下していれば充電を行う必要があります。過去の保管実績から、-10℃以下の環境ではほとんどSoCに変化がないだろうと予想しており、今回はその通りの結果が得られました。今後2年、3年…と経過すると少しずつ放電が進むかもしれませんが、クルーズチェックアウトで変化をしっかりとキャッチできるでしょう。ESAが担当するMPO、MTMは、太陽電池パネルのメンテナンスを中心にチェックアウトを行っていました。

クルーズチェックアウトは、「みお」プロジェクトメンバーに

とつても運用の段取りや緊張感を思い出す意味でとても重要です。初期チェックアウトからまだ半年ですが、「あの時はどうやったかな?」と思い出さなければいけないこともすでに幾つかありました。今年の夏は「みお」観測機器の高圧チェックアウト、金星フライバイ観測に向けた準備運用も計画しています。準備を整え緊張感を維持して臨みたいと思います。(関 妙子)



クルーズチェックアウト時(2019年5月15日)のBepiColomboの位置。緑の線は、打上げからの軌道を示している。(c) ESAC/ESA "Where is BepiColombo?"

小規模計画の進捗とCLASP2打上げ成功

宇宙科学研究所は、戦略的中型、公募型小型とならび、小規模プロジェクトを三本柱の一つと位置づけています。小規模プロジェクトには、国際プロジェクトに参加する「戦略的海外協同計画」と、多様な飛翔機会を用いた「小規模計画」の2つがあります。



CLASP2 打上げの様子。
US Army Photo, White Sands Missile Range.

このうち「小規模計画」では、海外プロジェクトへの機器やサブペイロードの提供、海外の観測ロケット・大気球、国際宇宙ステーション(ISS)などの飛翔機会を利用して、科学成果を創出します。

小規模計画は公募による選定を経て推進されていますが、日欧と日米、それぞれの協力による無重力ロケット材料実験(DUST)、日米伊協力の南極周回長時間気球による宇宙線反粒子の

観測実験(GAPS)、ISSから放出して大気圏再突入・エアロキャプチャ技術実証を行う超小型衛星(BEAK)など、特徴ある計画が進行中です。

現在実施中の計画は上記含め6件ありますが、このうち小規模太陽観測プログラムでは、すでに飛翔実験が成功しています。同プログラムは、観測ロケット実験と大気球観測実験を組み合わせ実施しますが、このうち日米欧国際共同観測ロケット実験(CLASP2)が、2019年4月12日01時51分(日本時間)に米国で打ち上げられ、最高高度274 km・飛行時間6分に渡って観測データの取得に成功しました。* 将来の太陽観測衛星計画に繋がる技術実証でもありました。このCLASP2には、前身となる初代CLASP実験があり、同様に観測ロケットに太陽観測装置を搭載していました。この初代装置は実験後に無事に回収されていたため、それを改造することで、期間と費用を抑制してCLASP2実験が実現されました。

小規模であることは、比較的短期間で成果を得ることに繋がり、また成果を得るために最適な手段を幅広く考えることが出来るという多様性が、この枠組みの特徴です。小規模計画で得られる成果は、後続のミッションや実験に繋げられ、成果創出の循環と継続を生み出します。そのため、将来の中型・小型ミッションのプリアーサとしての技術実証にも有効です。

このように、宇宙を目指す取り組みは、実に多様なのです。

(三保 和之)

* <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/clasp2-launch-20190422/>

日欧でミッション検討が進むSPICA

日欧協力を軸に推進する次世代赤外線天文衛星SPICAは、2018年5月にESA中型クラス5号機の候補として選抜され、本格的なミッション概念検討活動がスタートしました。2019年初頭からは、ESA側は先行してフェーズA（概念設計フェーズ）に入っています。

日本側では、極低温冷却システムPLM（Payload Module、冷凍機を含む）、中間赤外線観測装置SMI（SPICA Mid-infrared Instrument）、H3ロケットによる打上げなどの検討を進め、ESAへの情報提供を行っています。システム全体設計に関しては、PLM熱構造の詳細な検討を進め、複数の方式の間でトレードオフを行いました。冷凍機については、搭載時の形態を模擬した直線型熱交換器の性能評価試験を進めるとともに、振動擾乱対策の検討を行っています。一方、ESA側では、PLM以外のシステムおよび望



ギリシャ、クレタ島で開催されたSPICA国際会議での集合写真。

遠鏡に関して、複数の企業による検討が7月から始まります。

また、SPICAによるサイエンスをより深く、組織的に検討するため、ESA主導の科学検討チーム、JAXA主導の研究推進委員会、さらにそれぞれのもとで銀河進化、近傍銀河、星間物質/星生成、惑星形成、太陽系天体の5つの科学分野のワーキンググループを立ち上げ、活動を開始しました。

これらの活動の中で、観測装置の性能・仕様の見積りの精密化が進み、これを受けて科学面でも観測計画の詳細な議論が進んでいます。2019年5月20～23日にはギリシャ、クレタ島でSPICA国際会議が開催されました。160名を超える参加者が集まり、太陽系天体から遠方銀河にわたる広い天文学の分野で最後まで熱い議論が交わされました。Spitzer、Herschelなど、これまでの衛星観測や、最近のALMA、SOFIA等による地上や航空機観測による研究結果が次々と紹介され、次のステップとしてSPICAの重要性・必要性が繰り返し示されました。SPICAへの国際コミュニティの期待の大きさを改めて認識したところです。遠方銀河から星生成領域の分野の研究における、日本側が担当するSMIの重要性も大きく取り上げられました。4名の日本人が招待講演を行ったことに加え、日本からも20人以上の参加者があり、研究会の成功に大きく貢献しました。4日間の会議中を通じて、昼食後には、上記の5つの科学分野のワーキンググループの集まりがあり、日本からの参加者も加わって、熱心にそれぞれのサイエンスについての具体的な議論が行われました。（松原 英雄、尾中 敬）

栗木恭一名誉教授が瑞宝中綬章を叙勲

栗木恭一先生は、東京大学工学部航空学科大学院において博士号を取得され、東京大学航空研究所に助手として配属となり、層流から乱流への変化を研究されました。谷一郎先生や佐藤浩先生からの薦めで、その次にプラズマ乱流の研究から電磁プラズマ加速装置、MPD（Magnetoplasma Dynamic）アークジェットの研究開発を進められました。

1981年に文部省宇宙科学研究所への所属変更と相前後して、1980年に打ち上げられた「たんせい4号」に搭載された10W級MPDアークジェット、1983年スペースシャトル上の人工オーロラ実験SEPAC（Space Experiment with Particle Accelerators）にて100W級プラズマ発生実験と、着実に技術を進歩されました。

私が1983年に門下生となった頃は、より大型の推進器を目指し100万回パルス噴射地上作動試験に明け暮れ、とうとう1995年のSFU（宇宙実験・観測フリーフライヤ）衛星における1kW級MPDスラスト実証試験として実現させました。特にSFUプロジェクトでは栗木先生が実施責任者として、国内外を統率されミッションを成功に導かれました。同じ頃、宇宙研ではM-Vロケットを完成させて、いよいよ地球周りを離れ深宇宙に本格的に進出しようという気運が高まります。しかし、地球周りに2t、深宇宙にはたった500kgを投入する能力しかなく、欧米口に対峙するには非力を認めません。ロケットのさらなる大型化に頼らず到達距離を伸ばし地球帰還を果たすには、探査機搭載推進器を電気ロケットに替え高性能化する他ありません。

栗木先生はここに照準を合わせ、MPDアークジェットに加えイオンエンジンなど各種電気ロケットを全ラインナップするという未来を設定されました。鼓舞された後進らが努力し、小惑星探査機「はやぶさ」・「はやぶさ2」の主推進マイクロ波放電式イオンエンジンとして結実し、その効果は説明を要しないでしょう。

ご退官後は、国の中枢機関たる宇宙開発委員会で委員として要職を務められ、米国航空宇宙学会AIAA Fellow会員の地位にあられました。この度の叙勲を、門下生として光栄を感じつつ、栗木先生の長年にわたる労をねぎらうとともに、これまでのご功績を皆様にお伝えします。（國中 均）

参考：「エンジニアリングとは人間がものを創る行為である。学問とは真理をめぐる人間関係である。」後編、(ISASニュース 2016年1月 No.418掲載)



2016年11月27日に国立科学博物館で開催された「SFU打上げ20周年記念パーティ」にて。前列右から3番目が栗木先生。筆者は後列右から3番目。

「みお」つくし

第3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



水星表面探査機 Mercury Planetary Orbiter (MPO)

MPOは欧州宇宙機関ESAが開発した水星周回探査機である(図1)。ESAはMPOに加え、MPOと「みお(MMO)」を水星まで輸送するための電気推進システムを搭載するMercury Transfer Module (MTM) と、クルーズ中に「みお」を太陽光から熱防護し、MPOとの電氣的・機械的インターフェースも提供するMMO Sunshield and Interface (MOSIF) も合わせて開発した。水星到着まではMMO、MOSIF、MPO、MTMを結合したMercury Composite Spacecraft (MCS) となって一体で運用される。BepiColombo全体のミッションデザイン、MCSの組立・試験、打上げもESAの担当である。

MPOは水星の表面地形、鉱物・化学組成、重力場の精密計測を目的としており、表1に並ぶ科学観測機器が搭載されている。MPOは3軸姿勢制御衛星で、水星表面を観測する科学機器を搭載する面を常に水星表面へ向け、ラジエータ(放熱面)には直接太陽光が入射しないように制御される。ラジエータは1面だけで、ラジエータ以外の面は耐熱高性能断熱材(HT-MLI)で覆われている。MPOは近水点高度480km、遠水点高度1,500kmの極軌道を周回するため、水星表面からの赤外線(水星赤外)による熱入力が極めて大きい。このため、MPOのラジエータは、MPO内部の熱を宇宙空間に放熱し、水星赤外は反射して熱入力を抑える特殊な構造を有しており、アリアン5型ロケットのフェアリングに入る最大の大きさになっている。MPOの内部搭載機器からラジエータまでの熱輸送には、約100本ものアンモニアヒートパイプが用いられている。HT-MLIは水星周回における厳しい熱環境(最大で地球の11倍にも達する太陽光、水星による反射光、最大で地球の54倍にも達する水星赤外)から熱防護する特別仕様である。HT-MLIの最外層はセラミック繊維の布とチタン箔でできていて、熱がMPOの内部に入らないように最終的に手縫いで隙間無く仕上げられる。また、多層断熱材の4層構造になっていて、断熱性能が最大限高められている。MOSIFやMTMの分離に伴って生じる開口部にはシャッターが設けられ、細部まで極限環境からの熱入力を排するよう設計されている。

MPOの太陽電池パネルも水星の極限環境に耐えるよう特別に開発されたものである。215℃もの高温にも耐えるように設計されているが、水星周回軌道上では必要な電力を発電しつつ、この許容温度を超えないよう太陽電池パネルの方向をオンボードで制御する。水星到着までのクルーズ中の電力はMTMから供給されるようになっており、MPOの太陽電池パネルは、MPOがMTMから切り離されるまでの間は、太陽電池としての性能劣化が最小限で済むようにほぼ太陽光に平行に制御される。

MPOと地球との通信は高利得アンテナ(HGA)、中利得アンテナ(MGA)、低利得アンテナ(LGA)を用いて、X-band(Uplink/

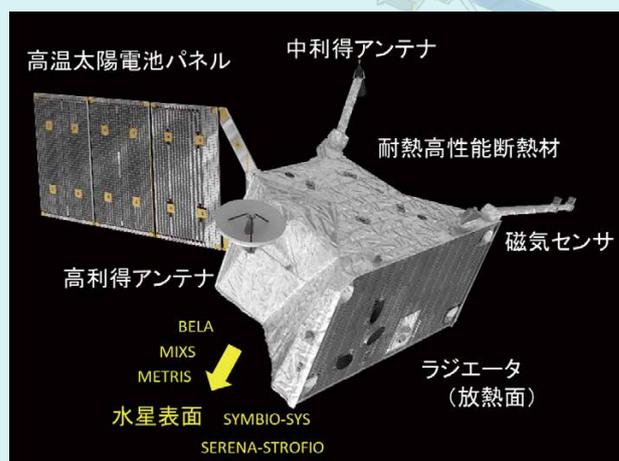


図1 水星表面探査機(Mercury Planetary Orbiter: MPO)
(©ESA/ATG medialab)

装置名称	観測内容
レーザー高度計:BELA	地形図取得、アルベド測定による表面物質調査、潮汐変形を測定。
加速度計:ISA	水星全球の重力場測定、自転状態の測定。
磁力計MPO-MAG	磁場の大きさを測定。
赤外線分光撮像器:MERTIS	鉱物組成の調査。
ガンマ線・中性子線検出器:MGNS	全球表面の元素組成調査、極域の揮発性堆積物の分布を調査。
X線分光器:MIXS	岩石を構成する重要元素の含有量調査とその全球分布調査。
Ka帯送信機:MORE	重力場測定。通信を利用したMPOの精密軌道決定による。
紫外線分光撮像器:PHEBUS	波長55~330nmで、水星外気圏の組成、構造と運動、水星表面と外気圏の関係を調査。
中性粒子・イオン観測装置:SERENA SERENA-STROFIO / SERENA-MIPA / SERENA-PICAM	外気圏における中性粒子の組成と密度測定、水星表面から放出される中性粒子の分光観測、太陽風のモニター、イオンを測定。
分光・撮像複合カメラ:SIMBIO-SYS	広角用、高分解能、可視光・赤外線用の装置を含む。
太陽風モニター:SIXS	太陽からのX線、陽子、電子のスペクトルを高い時間分解能で取得する。

表1 水星表面探査機の観測機器

Downlink) と Ka-band (Downlink) で行われる。アンテナも厳しい熱環境に晒されるが、特別に開発された白色セラミックコーティングにより、最高温度は550℃に抑えられる設計である。

MPOは打上げ後からMCSの制御を司っている。水星到着後、MTMを切り離れた後は、2液22ニュートン級化学推進系でまず「みお」の観測軌道に入り、「みお」を切り離れた後にMOSIFを切り離し、次いでMPOの観測軌道に入る。観測期間は1地球年+オプション1地球年を予定している。

「みお」プロジェクトエンジニア 小川博之(おがわひろゆき)



国立天文台教授

阪本 成一 (さかもと せいいち)

青空と赤ワインの国に来て 思ったこと

個人的なことになりますが、7年半勤めた宇宙研を離れて国立天文台に異動したのが2014年の8月で、それからもう5年になります。2016年4月からは望遠鏡のあるチリに赴任し、チリ人の同僚に囲まれて仕事をしています。チリに初めて来たのが1994年なので、この国との付き合いは四半世紀になります。スペイン語は相変わらずたどたどしいのですが、心持ちだけはチリの人間になったような気がします。

電波天文学を専門にする私にとってのチリのよさは、第一義的にはその環境にあります。

チリは南米大陸の西岸にあり、特に中緯度帯の沿岸部では、南極からの冷たいフンボルト海流の影響で、空気の下側が冷やされることで大気が安定し、上昇気流が発生しにくくなります。このため、雲はかかるとは雨が降ることはめったにありません。このようにしてできたのが、チリ北部に広がるアタカマ砂漠です。また、東側のアルゼンチンとの国境をなすアンデスは標高5,000m級の山脈で、アマゾンからの湿った空気を遮ります。高地に行けば空気そのものも乾燥します。このアンデス山脈とアタカマ砂漠の交点に位置するのがアタカマ高地で、水蒸気を嫌うミリ波サブミリ波や中間赤外線観測には特に適しているのです。ここには芋焼酎はありませんが良質のワインがあります。これも研究のためには重要な要素です。

実際、世界最先端の望遠鏡の半数以上がここに集中しています。例えばアタカマ高地にはALMA（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）をはじめ、私がいまプロマネを務める国立天文台のASTE（口径10mのサブミリ波望遠鏡）や、名古屋大学のNANTEN2（口径4mのサブミリ波望遠鏡）、ACTやCLASSやPOLARBEARなどの宇宙マイクロ波背景放射観測実験、そして東京大学が建設中のTAO（口径6.5mの中間赤外線望遠鏡）などが、わずか20km四方の範囲に集中しています。また、やや離れたところには口径8.1mの光学望遠鏡4基を擁するVLTや口径8mのGemini-Sなどがあり、E-ELT（口径39mの光学望遠鏡）など超大型望遠鏡計画の3つのうち2つがチリを建設地として選んでいます。

もちろんこの環境は地上局の設置にも適しており、日本の反対側にあるというのも大きなメリットです。実は白田後継局のサイト選定の検討を少しお手伝いした際にチリ局の拡充を別案として提案したことがあるのですが、組上にはあがりませんで

した。宇宙研出身の朝木・阪本がいまチリにいることを思うと、チリ局の拡充であればなにかお手伝いできたのではないかと思ったりもします。

チリは日本との時差が12ないし13時間あり、また首都サンティアゴから成田までは最短でも28時間かかるので、日本とこまめに相談しながら物事を進めるにはハンデがあります。それでも卓越した条件はそれを補って余りありますし、住み始めてみれば生活面での苦労もある程度は克服できるようになります。

なじみの薄い国ゆえに発展途上国というイメージがあるかもしれませんが、新市街のビルの7階に位置する国立天文台サンティアゴ事務所は、1階には本屋とスターバックスも備え、皮肉なことに国立天文台の中でもっとも都会にあり洗練された施設です。チリでは宇宙開発への参画はおろか産業の育成もまだまだですが、自前の人工衛星を持つことには高い関心を示しているようです。ちなみに当地ではゲートレスETC(世界初導入)も当たり前ですし、公共交通機関も完全キャッシュレスで、街なかには乗り捨て可能な電動キックボードが走り、タクシーもUBERもスマホで配車するとすぐに来ます。銀行送金も簡単なので、飲み会の割り勘もオンライン送金です。

南米というラテン気質で時間にルーズという先入観もあるかもしれませんが、打ち合わせはオンタイムで始まります。現場では「責任者でてこーい」というようなトラブルも起きるのですが、前もって覚悟していればあまり腹も立たないものです。横断歩道では車は必ず一時停止して歩行者を通してくれますし、地下鉄やバスでは高齢者や女性以外はあまり席に座りません。満員（というほどでもない混み具合）の電車には乗りませんし、駆け込み乗車もありません。エレベーターでは見知らぬ人も必ず乗るときと降りるときに挨拶をします。行動の一つ一つに上品さと余裕があります。研究者もワークライフバランスを適切に保って人生を楽しんでいるようです。

日本では外国人に日本のことをほめさせる番組が流行っているようで、飛行機の中でそういう番組を目にすることもありますが、国それぞれによさがあります。自己肯定と過去の振り返りに満足していると、チリのように元気な国の人々にはあつという間に置いていかれるのではないかと、54歳の誕生日の夜、ひとり赤ワインを飲みながら思いました。



国立天文台サンティアゴ事務所から望む山並み。

編集後記

「はやぶさ2」が、リュウグウに向けた最後の難局に挑んでいます。本誌でも、その活躍をお伝えてしてきましたが、順調であればあるほど、その道程や挑戦が困難なものであることを忘れてしまおうです。でも、どうぞお忘れなく、それは周到な用意があつてこそ、狙い澄ました文字通りの離れ業であることを。（戸田 知朗）



ISASニュース No.460 2019年7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/>