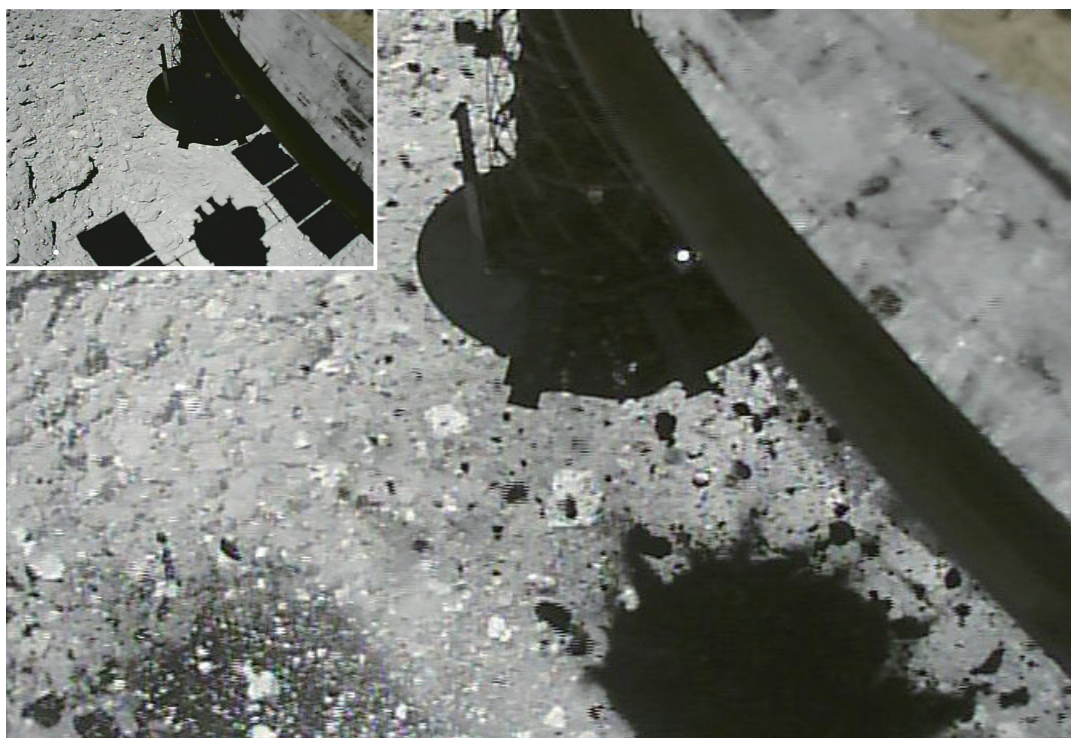




「はやぶさ2」が小惑星リュウグウにタッチダウンした直後の上昇中に撮影された画像

寄付金によって搭載された小型モニタカメラ(CAM-H)により、2019年2月22日、07:29(日本時間)に撮影された。探査機高度は約8m。探査機の影がきちんと見えないほど多数の砂礫が舞い上がっている。左上は、タッチダウン直前の07:26に高度8.5mから撮影された画像。(詳しくはp.4-5の記事を参照)

宇宙科学最前線

水を湛^{たた}えた小惑星たち —「あかり」による小惑星の含水鉱物探査

神戸大学大学院 理学研究科
惑星科学研究センター 特命助教

臼井 文彦 (うすい ふみひこ)

太陽系の水のルーツをたどって

私が神戸で暮らすようになってからもうすぐ3年がたちます。神戸の街は南を大阪湾、北を六甲山地に囲まれていて、方角を指すのにも「海側」「山側」と呼んだりしますが、私はその「海側」に住んでいます。自宅からも海の水面が輝いているのが間近に見られます。この海はとても穏やかで、海辺を歩くだけで心の落ち着きや癒やしを感じられます。

海も含めて、私たちにもっとも身近な物質である「水」ですが、この地球の水が、地球が形成されたときからあったものか、あるいは形成後に外部からもたらされたものかは、まだ完全には解明されていません。一方、近年の研究で、太陽系内の他の天体にも、現在、あるいは過去に何らかの形で水が存在していたことがわかってきました。その中で、地球に水をもたらした有力な候補の1つとして考えられているのが小惑星です。

小惑星に水を探す

小惑星とは、主に岩石からなる、直径が1,000 km 以下の小さい天体です。私たちの住む太陽系にこれまでに

79万個以上存在することが確認されています。これらは、太陽系が作られた約46億年前の姿をほぼそのまま残している「太陽系の化石」のような天体です。この小惑星に水があると考えられているのです。ただし、川や海のように表面に液体の水が流れているのではなく、天体の内部で起こった水と岩石の化学反応(水質変成作用)によって生成された、水を含む鉱物「含水鉱物」として水を湛えていると考えられています。含水鉱物は地球で採集される隕石に含まれていることが知られていて、そうであれば、その隕石のふるさと(母天体)である小惑星にも含水鉱物があるはずで、この含水鉱物は氷が昇華する温度より高温の環境でも比較的安定に存在する物質であるため、含水鉱物を探すことで、小惑星に水が存在しているかがわかります。

小惑星にどのような物質があるかは、望遠鏡を使った分光観測によって調べることができます。特に、赤外線領域の波長域には可視光では見られないような分子、氷、鉱物などさまざまな物質の特徴的なスペクトル成分が存在するので、太陽系天体の構成物質を捉えるには赤外線分光観測はとても重要になります。ここで着目する含水鉱

物が波長 2.7 μm 付近のスペクトルに特徴的なパターンを示すことは以前から知られていました。しかし、地上の望遠鏡からは地球大気中の水蒸気や二酸化炭素による吸収や放射の影響により、この波長帯を観測することが原理的にできません。ハワイ島には標高 4,200 m のマウナケア山があり、山頂では大気圧が平地の 60% 程度にまで減り、気候が比較的安定していて乾燥しているため、世界有数の天文観測に最適の地であり、日本のすばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡が並びますが、それでもこの大気の影響から逃れることはできません。そのため、大気の外、つまり宇宙空間から観測をすることが必要になります。しかし、人工衛星に搭載された望遠鏡での観測についても、検出感度が十分でなかったり、観測波長がカバーしていなかったりしたため、小惑星に水がどの程度含まれているかは、これまでほとんどわかっていませんでした。

「あかり」による小惑星の赤外線分光観測

2006 年 2 月に打ち上げられた日本の赤外線天文衛星「あかり」には、波長 2～5 μm の赤外線における分光観測を行う機能が搭載されていました。私たちは「あかり」のこの機能を用いて、2008 年 5 月から 2010 年 2 月にかけて小惑星の分光観測を行いました。「あかり」の主目的は全天を一様に観測して宇宙の地図を作る「全天サーベイ観測」だったため、分光観測のように特定の星を一定時間じっと見続ける「指向観測」には、必ずしも最適化されていませんでした。さらに、小惑星は太陽の周りを公転しているため、いつも同じ方向に位置しているわけではなく、天球面上を移動していきます。つまり、目的の小惑星を見ようと思っても、望遠鏡を向けるべき方向は時々刻々と変わっていくのです。他の星や銀河などの観測との競合を避けて小惑星の観測を行うのは至難の業でしたが（本誌 2009 年 4 月号・「すべては私の手の中に……！『あかり』観測スケジューリング」を参照）、2 年弱の限られた期間に小惑星 66 天体の分光観測を行うことができました。

観測データの解析にも大きな困難が待ち受けていました。「あかり」の観測装置はプロジェクトチームの「手作り」なので、そのデータも、できあいのソフトウェアを使って処理できるものではなく、チームで独自にプログラムを開発しなければならませんでした。また、観測装置の特性を正しく評価するためには星や銀河のデータも必要であり、それには多くの研究者の協力がありました。さらに、観測した 2～5 μm の波長には、本研究で注目したい小惑星の太陽反射光の成分だけでなく、小惑星自身が発する熱放射の成分も含まれるため、それぞれの成分に分離することも骨の折れる作業でした。このような事情があって、小惑星のスペクトルが得られるまでには観測から 10 年の月日が流れてしまいました。

多くの困難の末に、ついに小惑星 64 天体の赤外線スペクトルが得られました（どうしても正しい評価のできなかった 2 天体を除きます）。これまでに波長 2.7 μm 付近の小惑星の含水鉱物のスペクトルが確実に得られていたのはアメリカの探査機 Dawn による 1 Ceres の一例だけだったので、この数は圧倒的な進歩です。

C 型小惑星の赤外線スペクトル

「あかり」で得られた小惑星のスペクトル、特に C 型小惑星 17 天体のスペクトルを見てみると、波長 2.7 μm 付近に含水鉱物に起因する特徴が明確に現れていました（図 1）。C 型小惑星は水や有機物に富むと考えられてきましたが、実際に多くの C 型小惑星に含水鉱物が含まれていることが、今回初めて明らかになったのです。さらに、観測された 2.7 μm 付近の吸収の深さは天体ごとに異なり、他に 3.1 μm 付近に氷やアンモニア化物など他の物質の特徴を示すもの、あるいはほとんど吸収を示さないもの、というように、スペクトルの特徴の現れ方にいくつかのパターンがあることもわかりました。

さらに詳しく調べてみると、波長 2.7 μm 付近の吸収の深さと、もっとも深くなるピーク波長との間に明確な傾向が見いだされました（図 2）。このような結果が出ることを、私たちはまったく予想していませんでした。吸収の深さは含水鉱物の量、すなわち水を含む割合を示します。ピーク波長は含水鉱物中の組成のわずかな違いが反映されています。C 型小惑星は地上の望遠鏡を使った観測から、B、C、Cb、Cg、Cgh、Ch などのサブグループに分類されます。含水鉱物の一種は可視光のスペクトルに特徴的なパターンを示すものがあり、それが検出された小惑星は Cgh 型や Ch 型に分類されています（“h” は hydrated ー含水の意ーの頭文字から付けられています）。確かに、Cgh 型や Ch 型に分類されている小惑星は波長 2.7 μm の吸収が深く、水を多く含むことがこの図から明確に示されます。それだけでなく、可視光の波長域ではその兆候が見られなかった他の C 型小惑星にも、広く水が存在し、さらに水を含む量と含水鉱物の組成の間には一定の傾向があるというわけです。この傾向は、水質変成作用によって生成された含水鉱物が、何らかのエネルギーによって加熱されて、徐々に水を失っていく加熱脱水の過程を示すものだと考えています。加熱のエネルギー源としては、太陽からのプラズマ（太陽風）、

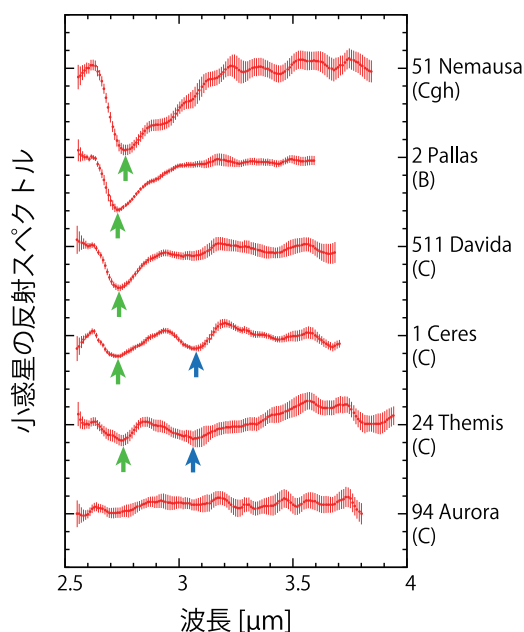


図 1 「あかり」で得られた C 型小惑星の赤外線反射スペクトル。波長 2.7 μm 付近（緑矢印の位置）に含水鉱物に起因する吸収の特徴が見られる。また、波長 3.1 μm 付近（青矢印の位置）には、氷やアンモニア化物など他の物質の存在の特徴が見られる。

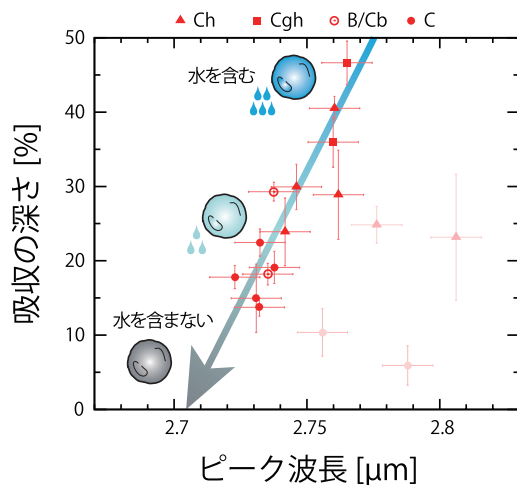


図2 C型小惑星の2.7 μm 付近の吸収のピーク波長と吸収の深さの関係。マークの違いはC型小惑星のサブグループの違いを表す(Bus-DeMeoスペクトル分類による)。含水鉱物に起因する吸収が検出された17天体のうち13天体は矢印で示されるように右上から左下にかけて分布しており、小惑星が形成された後に経験した二次的な加熱(加熱脱水作用)の痕跡を反映したものと考えられる。

微小隕石の衝突、岩石中の放射性同位体の崩壊熱などが候補として挙げられます。このような傾向が小惑星で確認されたのは初めてですが、多くのC型小惑星のスペクトルがこの傾向を示すことから、小惑星から徐々に水が失われていくという加熱脱水作用は、C型小惑星において普遍的に起こる現象であると考えられます。

今回の観測結果によって含水鉱物の存在が数多くのC型小惑星で確かめられたことから、C型小惑星の形成と進化の変遷が明らかになりました(図3)。すなわち、C型小惑星は、(a) 太陽系形成初期に岩石と氷が集まって作られた天体であり、(b) その天体内部で水質変成作用という化学反応によって含水鉱物が生成されており、(c) さらに小惑星が形成されたのちに二次的な加熱を経験している、ということになります。水の存在を手がかりに、小惑星を取り巻く温度環境の変遷を観測的にひもとくことができたというわけです。

天文観測と小惑星探査

現在、日本の小惑星探査機「はやぶさ2」とアメリカのOSIRIS-RExが、それぞれ小惑星リュウグウ(162173

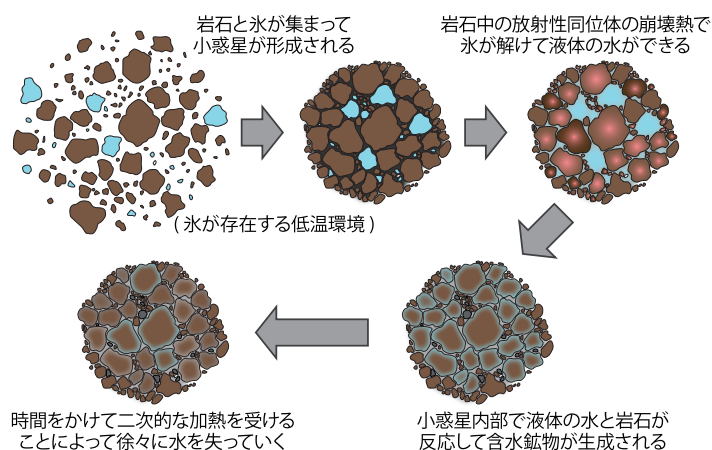


図3 本研究で明らかになったC型小惑星の形成と進化の過程。C型小惑星の多くに含水鉱物が存在することが観測的に明確になったことから、これらは岩石と氷が凝集して形成された天体であること、その氷が解けて天体内部で液体の水が存在していたことが示された。また、天体が形成されてから二次的な加熱(加熱脱水作用)を受けていることも明らかとなった。

Ryugu) とベヌー(101955 Bennu)の探査を行っています。どちらも波長2.7 μm 付近の分光観測によって含水鉱物の存在や分布を調べているところです。このような探査機による小惑星の「その場」観測では、地上の望遠鏡や地球周回の宇宙望遠鏡では見ることのできない天体表面の地形や表面物質の分布の地域差などを詳しく調べることができます。一方、私たちが「あかり」で行ったような多数の天体の網羅的な観測では、探査機が詳しく調べた天体の性質が一般的なもののなのか、あるいは例外的なのか、という太陽系の中での位置付けを示し、全体的な進化のシナリオを考えることができます。なにしろ、小惑星は79万個以上存在しているわけですから、小惑星リュウグウやベヌーがどういった天体であるかを理解し、またこれらの探査によって得られるデータの価値を一層高めるためにも、望遠鏡を使った天文観測はきわめて重要な意味を持つものです。このように、小惑星科学はいまや「木を見て、森も見る」必要があり、それこそが醍醐味の研究分野とも言えます。

水をめぐる旅は続く

今回は詳しく触れませんでした、「あかり」の観測では岩石質のS型小惑星について、ほとんど含水鉱物は検出されませんでした。例外的にわずかな含水鉱物の存在を示す天体がいくつか見つかりましたが、そのようなS型小惑星に発見されたわずかな水の兆候は、含水鉱物を含んだ別の小惑星の衝突によってもたらされた外因的なものだと考えられています。現在でも小惑星同士の衝突はまれに起こっていますが、太陽系形成初期には小惑星のような小さな天体の数は現在よりもっと多く、衝突現象はより頻繁だったと考えられます。地球も多くの小惑星との衝突を経験してきたであろうことから、地球に存在する水の少なくとも一部は、このような衝突によって小惑星からもたらされたことが示唆されます。

このような太陽系における「水」の存在の多様な姿を理解するには、より多くの小惑星の観測を続けていかなければいけません。「あかり」は2011年11月に運用を終了しているため、次の観測の機会は、アメリカが2021年に打ち上げる予定の口径6.5 mのJWST (James Webb Space Telescope) になります。しかし、JWSTのような大望遠鏡は、検出感度はきわめて高いものの、思った方向に望遠鏡を向ける融通は利きにくく、また他の星や銀河の観測プログラムとの観測時間の獲得競争も熾烈なものになります。一方、このような大望遠鏡でなくても観測できることはまだまだたくさんあるので、私たちは、口径はそこまで大きくなくとも小回りの利く新しい宇宙望遠鏡が実現できないかと検討を始めているところです。

今回の成果をまとめた論文*は、誰でも無料で読むことができます。ただし、英文で40ページを超えているので、書いた本人ですら読み返すのに数時間かかります。読み終わったときには映画を1本見終わったかのような充実感(疲労感?)を味わうことができますので、よろしければぜひご覧ください。

さて、一休みして、海岸通りを歩きましょうかー。

* <https://doi.org/10.1093/pasj/psy125> この掲載号の表紙には本研究の成果の画像が使われています。最近では学術誌を紙版の冊子で読むことはほとんどなくなりましたが……

「はやぶさ2」タッチダウン成功

2019年2月22日、「はやぶさ2」ミッションはこれまでの運用の中で最大の山場を迎えました。小惑星リュウグウへのタッチダウンです。タッチダウンは成功し、「はやぶさ」ではできなかったことを完璧に行うことができました。ここでは、「はやぶさ2」のタッチダウン運用についてご紹介します。

■タッチダウン地点

2018年6月27日に小惑星リュウグウに到着して以来、リュウグウの詳細な観測を行い、タッチダウンの場所の絞り込みをやってきました。場所の絞り込みの経緯については、先月号のISAS ニュースをご覧くださいことにして*、最終的に決まった場所は直径がたった6mの場所でした(図1)。

リュウグウ表面は大小無数の岩塊に覆われており、ほとんど平坦なところがありません。図1の場所は、岩塊が比較的少ない場所で、また、2018年10月25日に分離したターゲットマーカが着地している場所の近くです。ターゲットマーカを使うことによって、この小さな場所に「はやぶさ2」をタッチダウンさせることにしたわけです。

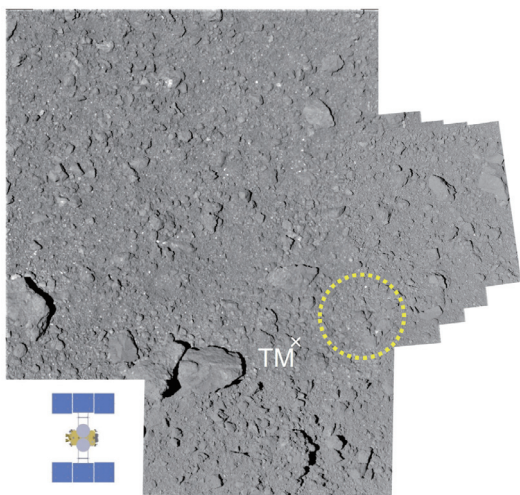


図1 タッチダウンを行う場所。タッチダウンは円(直径約6m)の中を狙う。×印は、ターゲットマークが着地している位置を示す。左下の探査機のイラストは写真と同じスケールで描いたものである。(画像クレジット: JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所)

■降下開始

「はやぶさ2」のタッチダウン運用は、2019年2月20日から始まりました。初日は、降下運用のために探査機に情報を送ったり設定を変えたりする作業を行い、実際の降下は2月21日に開始されました。

2月21日の午前6:30（日本時間）、全体ブリーフィングを行い、いよいよ降下運用に入りました。ところが、運用が始まってみるとすぐ、探査機が認識している位置情報が実際と異なっていることが分かりました。早急に原因を調べてみると、探査機は正常なのですが、降下誘導プログラムの動作タイミングの影響で起こっている事象であることが判明しました。津田プロジェクトマネージャの指揮の下で大急ぎで検討したところ、降下を5時

間遅らせることで対応が可能であることが確認できました。

そこで降下開始を5時間遅らせた運用が始まりました。ただし、タッチダウンの時刻は遅らせることはできませんので、降下速度を速めることで当初の計画に追いつくことにしました。当初は40 cm/sで降下する予定でしたが、90 cm/sで降下することにしたのです。探査機の高度の変化を図2に示します。夕方には当初の運用予定に戻りました。そして最終的には10 cm/sでリュウグウに接近していったのです。

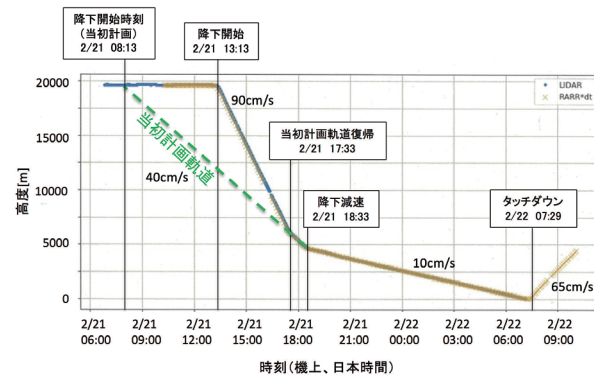


図2 探査機の高度変化の履歴。

■タッチダウン

2月22日、午前5時、タッチダウン運用のシフトが始まりました。6時を過ぎる頃には、探査機高度は500mを切っていました。そして、06:14、自律降下フェーズへの移行を行うか止めるかの判断であるGO/NOGO判断が行われ、“GO”となりました。実際のGOコマンドは06:32に送信され、これ以降はすべてを探査機に任せることになりました。

低軌道での探査機の動きは図3のようになります。まず、高度45 mまで降下し、いったんホバリングをしました。このときに、アンテナが高利得アンテナ（HGA）から低利得アンテナ（LGA）に切り替わりました。そうすると、テレメトリ（探査機からの情報）は受け取ることができなくなり、これ以降は電波のドップラーデータを受けるのみです。

高度 45 m のホバリングの間にターゲットマーカを画像
の中で捕捉し、捕捉されると探査機はさらに降下を開始し、

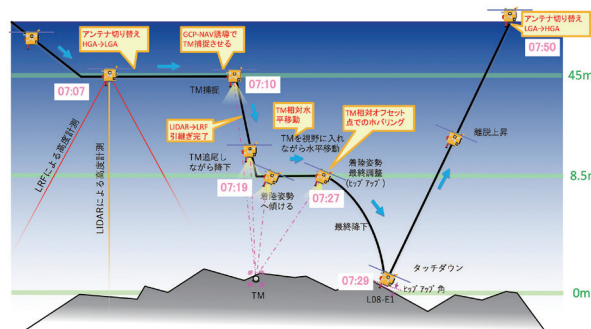


図3 低高度における探査機の運用。2月22日の機上での時刻（日本時間）が記載してある。

高度 8.5 m で再びホバリングに入りました。この降下の間に、小惑星表面からの距離（高度）を計測する装置が LIDAR（レーザ高度計）から LRF（レーザ・レンジ・ファインダ）に切り替わりました。高度 8.5 m では、探査機の姿勢がリュウグウ表面と平行になるように制御し、少し水平移動して、さらに着陸姿勢の最終調整をしました。

そして最終降下をし、表面に触るとプロジェクティルを打つとともにスラスタを噴いてすぐに上昇しました。これがタッチダウンの瞬間ですが、機上時刻で 07:29:10 でした。タッチダウンは、管制室では 07:48:10 に確認されました。リュウグウから地球までの電波の伝搬時間が 19 分あるためです。

先ほど、テレメトリは受け取れずにドップラーデータのみ受けると書きましたが、ドップラーデータとは電波の周波数から計算できる探査機の視線方向の速度のことです。探査機はリュウグウに接近していったタッチダウンをするとリュウグウから遠ざかっていくわけですから、速度の変化を見ていれば探査機がいつタッチダウンをしたのか分かります。それで、07:48:10 にドップラーの値が大きく変化して、タッチダウンがなされたことが分かったわけです。

■そして上昇

ドップラーデータは、途切れることなくずっと受信されていました。このことは、探査機が動作していることを保証することになります。ですが、探査機の状態が正常なのか、タッチダウンのときにプロジェクティルが発射されたのか、などはドップラーデータでは分かりません。低利得アンテナから高利得アンテナに切り替わって、テレメトリを受ける必要があるわけです。

地上時間で 08:09 に、待望のテレメトリが届きました。大急ぎで確認してみると、探査機の状態はすべて正常、そしてプロジェクティルが発射されたという情報もありました。この時点で大きな拍手があり、タッチダウン成

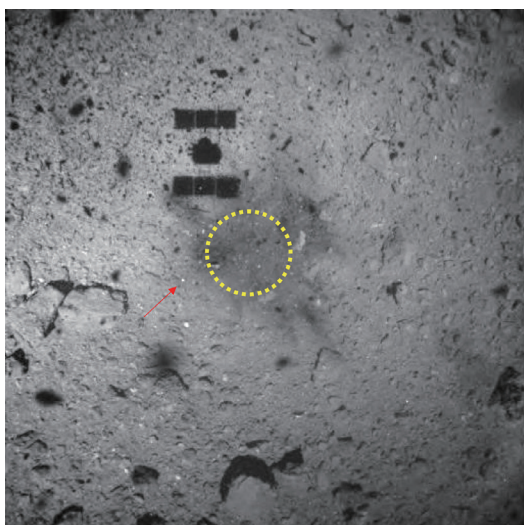


図4 タッチダウン直後にタッチダウン地点付近を撮影した画像。広角の光学航法カメラ（ONC-W1）によって、機上時刻で2019年2月22日07:30頃（日本時間）に撮影された。探査機の高度は25m前後。円は、タッチダウン予定地点を示す。矢印の先の白い点がターゲットマーカである。（画像クレジット：JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所）

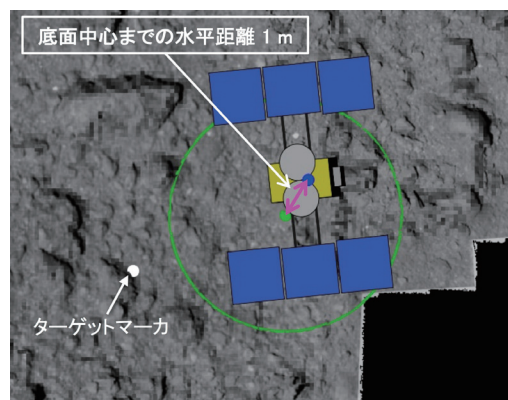


図5 「はやぶさ2」の着地点。タッチダウン予定地点が緑色の円内であり、探査機はこの円の中心に探査機の底面の中心が重なるように自律的に降下していったが、最終的には約1mずれたところにタッチダウンした。探査機の姿勢も分かっているため、サンブラホーンがどこに接地したのかも分かる。背景の小惑星表面は形状モデルより。

功となりました。その後、スムーズに画像データも探査機から降ろすことができました。その画像の1枚（図4）には、タッチダウンが行われた位置がくっきりと写っていたのです。この画像を図1と比較してみると、タッチダウン位置の付近の表面の色が変色しているように見えます。その原因はまだ分かっていませんが、スラスタの噴射や弾丸（プロジェクティル）の衝突によって舞い上がった砂によるという可能性も考えられます。この画像は、2月22日のお昼には速報として公開することができました。

■タッチダウン大成功

その後、さらに小型モニタカメラ（CAM-H）を含む多くの画像が探査機から降ろされました。CAM-Hでは、タッチダウンの前から連続的に画像が取得されており、タッチダウンの瞬間も見ることができています。タッチダウン後には多数の破片が上空に舞い上がっており（表紙）、プロジェクティルの威力がこんなに大きいとは全くの想定外でした。サンプルもたくさん採取できていることを期待させる映像となっています。

CAM-Hの画像に加えて広角の光学航法カメラ（ONC-W1）でもタッチダウン地点の様子が撮影できていますが、これらのデータに基づいてタッチダウン地点も正確にもとめることができました。タッチダウン地点は、図5に示されていますように、目標の領域の円内で、探査機の底面の中心が円の中心から約1m離れたところでした。これは探査機を1mの精度で誘導できたということになります。当初は、最初のタッチダウンは誤差50mくらいを見込んでいたので、これは格段に高精度で探査機のナビゲーションができたということを意味しています。サンブラホーンがリュウグウ表面のどこに接触したかも分かる驚異的な精度を達成し、これも「はやぶさ2」の大きな成果となりました。

「はやぶさ2」の運用はこれからも続きます。次の大きな運用は、衝突装置（SCI）を使った人工クレーター形成実験になります。さらに可能ならばその人工的に作ったクレーターの内部または周辺へのタッチダウンを試みます。そして、2019年末にはリュウグウから出発し、2020年末に地球帰還の予定です。（吉川 真）

OKEANOSのミッションと最新状況

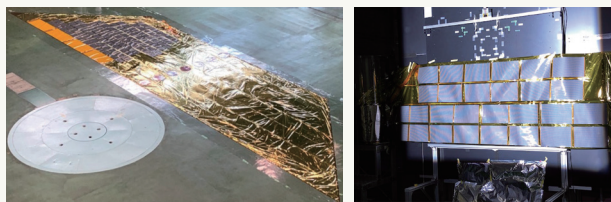
2018年10月18日にOKEANOSチームの全体会を開催した。目的は、戦略型中型計画のコスト制約（総資金300億円）の条件を満たすために「ソーラー電力セイル探査機OKEANOSによる外惑星領域探査ミッション」のコストダウン案について合意することである。

打上げ費、運用費も含めて300億円以下の条件を満たすことがいかに厳しいかは、欧米の探査ミッションを見れば明らかである。例えば、NASAの木星探査機ジュノーは1,100億円、ESAの彗星探査機ロゼッタは1,800億円、土星探査機カッシーニは4,300億円であり、桁が違う。しかも日本は外惑星領域探査の経験がなく、技術力でも大きな格差があると言わざるを得ない。

これらのハンディを克服するため、私たちは「はやぶさ」と同じ工学ミッションとしてOKEANOSを提案した。工学ミッションは実験機とは異なり、技術実証だけではなく理学観測も確実に行う。ただし、理学成果までは問わない。過去に例のない新しい探査では技術・環境の不確定を伴うため、理学成果を追求すると、必要なリソースが大きく膨らんでしまう。そこでまずは、理学観測を含む探査シナリオを実証し、次号機以降で確実に理学成果を得られるようにするのが工学ミッションの戦略である。実際に「はやぶさ」では多数の不具合が発生したが、「はやぶさ2」ではこれらを修正することで十分に理学成果が期待できるミッションに成長した。

私たちはこの工学ミッションで外惑星領域探査を切り拓くことを目指している。外惑星領域では、太陽光発電量が小さくなり、かつ、必要 ΔV も大きくなる。そのためフライバイやランデブーは実施できても、着陸やサンプルリターンといった直接探査は困難である。この解になり得るのがソーラー電力セイルである。大面積の薄膜太陽電池で十分な電力を確保し、これを用いて高比推力のイオンエンジンを駆動することで木星圏・土星圏の直接探査が可能となる。私たちは本計画で提案するソーラー電力セイル探査機に海神OKEANOSの名を付け、外惑星領域を自由に行き来できるようにするという決意を込めた。

OKEANOSのミッション案としてPlan-A、B、A'の3つがある。Plan-Aは着陸ミッションであり、高比推力イオンエンジンと地球スイングバイ、木星スイングバイを併用して、木星トロヤ群小惑星へ世界で初めてランデブーする。そこで、小惑星のリモート観測を行った後、着陸機を小惑星表面に着地させ、試料採取、その場分析を行う。小惑星到着前には、クルージング環境を利用したさまざまな理学観測も行う。Plan-Bは着陸&サンプルリターンミッションである。Plan-Aを実施後、着陸機が小惑星表面から離陸し、母船とランデブードッキングを行い、採取した試料を母船に搬送する。その後、母船は着陸機を再度分離し、木星スイングバイを経て試料を持ち帰る。Plan-A'は着陸&マルチランデブーミッションである。Plan-Aを実施後、別の木星トロヤ群小惑星



IKAROSと同じ一辺14mの電力セイルを試作し（左）、電気性能を評価している様子（右）。

にランデブーする。

OKEANOSは2015年2月に中型計画として提案されて有力候補となり、2016年10月から2年間プリフェーズA2として、システムおよびキー技術の検討を深めた（写真参照）。その結果、Plan-A、B、A'についていずれも技術的には成立する見通しを得た。しかし、一番の課題はコストである。プリフェーズA2終了確認会をパスしてプリプロジェクトに移行するには、300億円の制約の条件を満たさなくてはならない。そこで、冒頭の全体会で思い切ったスリム化について議論し、以下の方策について合意した。

- ① コンフィギュレーションはPlan-Aを選択し、サンプルリターンは実施しない。
- ② 着陸機は大幅に簡易化・軽量化する。具体的には、姿勢軌道制御系、化学推進系、着陸脚を排し、自律制御は実施しない。「はやぶさ2」の小型着陸機MASCOTと同様、自由落下をして、着陸後に姿勢反転装置を用いて姿勢を整える。試料採取は表面サンプラーのみとし、地下サンプラーは搭載しない。その場分析（質量分析）は、段階加熱法と熱分解法のみとし、ガスクロマトグラフィーは搭載しない。これらにより約100kgの質量を40kg以下とする。
- ③ 探査機はイオンエンジン台数を減らすなど可能な限り簡易化・軽量化する。

ずいぶんと思い切った変更をしたように見えるかもしれないが、実はミッションの根幹には影響しない。コストを下げることでミッションの意義・価値が失われることが無いよう細心の注意を払った。しかし、それは今回の変更の決定が容易であったことを意味しない。例えばサンプルリターンをやめることは、ランデブードッキングや試料搬送、カプセル、地上での試料分析などをなくすことにつながり、これらの担当者の活躍の場を奪うことになる。今回の合意はミッションとして生き残りをはかるため苦渋の決断であったと言える。

OKEANOSは、2018年11-12月にプリフェーズA2終了確認会を受けた。コスト見積りは別途確認が必要であるが、それ以外は妥当という評価を得た。

先日実施された「はやぶさ2」の着陸は見事であった。この成功は「はやぶさ」の経験を存分に活かした結果でもある。これに続く工学ミッションとしてOKEANOSを実施することが太陽系探査をさらに面白くすることになると強く信じている。（森 治）

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

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。

参上
「はやぶさ2」

HAYABUSA2

参上
「はやぶさ2」

HAYABUSA2



「はやぶさ2」探査のサイエンス意義

小惑星・彗星・カイパーベルト天体などの太陽系小天体探査が、飛躍的に進展をみせている。そのサイエンス意義は、小天体に刻まれた太陽系形成過程の記録を獲得することにある。この文脈の中で「はやぶさ2」は、内外太陽系の水の有無を分ける境界であるスノーライン（2-3天文単位）付近にあったリュウグウの母天体の姿を、リモートセンシング観測、着陸機その場観測、人工衝突実験、帰還試料の分析を駆使して、総合的に解明することにある。

地球表層の水や有機物は、地球形成最終期になって集積した微惑星（～100 kmのサイズの惑星材料天体）あるいはその破片によって、スノーライン付近からもたらされた可能性が高い。地上に落下する炭素質隕石は水・有機物を含んでいるが、隕石よりもはるかに多くの量の物質が、より細かな微粒子（惑星間塵）として地球に降下していることが、近年明らかになっている。惑星間塵は破壊された小天体の破片粒子である。つまり、地球への供給物質の量と内訳は、単に起源天体の組成だけではなく、その壊れやすさ（力学強度）や構成粒子サイズ分布に強く影響されるはずである。

「はやぶさ2」の探査で、リュウグウはより大きな小惑星の破片が集積したラブルパイル天体で、過去の高速自転によってコマ（独楽）型の形状になったことが明らかになっ

た。近赤外分光計（NIRS3）の観測から、表面にはほぼ一様に含水鉱物が存在していることがわかり、また反射率の低さから有機物含有量が高いと予測されている。リュウグウの平均密度（バルク密度）は1.2 g/cm³と低く、空隙率は50%を超える。表面には多くの岩塊がほぼ一様に分布して

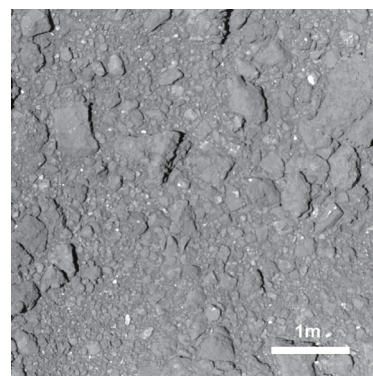


図 リュウグウ表面の高解像度画像。2018年10月15日撮像。数センチから1m程度の角張った岩塊に被われている。（クレジット：JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所）

いるが（図）、中間赤外カメラ（TIR）の観測から、岩塊も空隙の高いものが多いと推定される。これらは力学強度の弱さを暗示するが、今後行われる衝突実験によって、より直接的な強度推定を目指している。これは、帰還試料分析とあわせて、地球への物質供給過程解明の鍵となるだろう。

「はやぶさ2」プロジェクトサイエンティスト 名古屋大学大学院環境学研究科教授

渡邊 誠一郎（わたなべ せいいちろう）

エピローグ

2018年4月号から始まった「はやぶさ2」についての2回目の連載ですが（1回目の連載は2014年2月号～2015年2月号）、今回で終了となります。今回の連載では、最初に津田 雄一プロジェクトマネージャが「プロローグ」というタイトルで書いていますので、最後は「エピローグ」としました。もちろん、「はやぶさ2」ミッションはこれからも続きますので、ミッションのエピローグではありません。

連載が始まってからのこの1年間、「はやぶさ2」プロジェクトとしては、激動の1年でした。連載が始まった頃、小惑星リュウグウは約130万km彼方から眺めた“点”でした。そして、2019年2月22日、「はやぶさ2」探査機はついにリュウグウへのタッチダウンに成功したのです。リュウグウからの距離はまさにゼロ（図）、リュウグウ表面の様子がミリメートル単位で把握できるまでになりました。

これまで、小型ローバ MINERVA-II1 の2機や小型着陸機 MASCOT をリュウグウに着陸させることに成功するなど「はやぶさ」で達成できなかったことを実現してきましたが、「はやぶさ」では思うようにできなかったタッチダウンにも成功しました。「はやぶさ」でできなかったプロ

ジェクタイル発射にも今回は成功しました。これで、13年越しの“宿題”に回答できたことになります。

またミッションは、今後、衝突装置（SCI）を使って人工クレーターを作る実験を行ったり、可能ならばその人工クレーター（付近）にタッチダウンをしたり、

3機目の小型ローバ MINERVA-II2 を分離したりと、まだまだやることがたくさんあります。そして、2019年末にはリュウグウから出発し、2020年末に地球帰還となります。「はやぶさ2」の激動の時間はまだ続きます。

リュウグウの乙姫殿、お宝はいただきました。お宝は大切にリエントリカプセル（“たまてばこ”）の中に入っています。この“たまてばこ”を開ける日を楽しみにして、この2回目の連載を終わりにすることにします。温かい応援を多数いただきまして、本当にありがとうございました。

「はやぶさ2」ミッションマネージャ 吉川 真（よしかわ まこと）

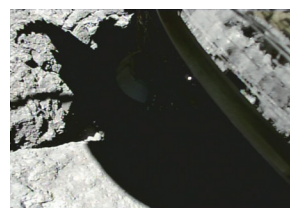


図 タッチダウンの瞬間。2019年2月22日07:29に小型モニタカメラ（CAM-H）で撮影。明るい点はLRF-S2による光。

四方山話 ―地球外生命を求めて―

人間が天空を目指して飛んだのは、正式な記録としては、1783年フランスのモンゴルフィエ兄弟の熱気球に始まり、120年後の1903年ライト兄弟の飛行機による有人飛行、それからたったの60年ほどでガガーリン（1961年）やテレシコワ（1963年）の有人宇宙飛行、アポロ計画（1961年～1972年）による月面着陸、そしてスペースシャトルの時代（1981年～2011年）を経て国際宇宙ステーションの時代（1988年～）になり、今や、惑星間飛行を目指し、火星に行こうとしています。また月の周回軌道に深宇宙探査ゲートウェイを建設してそこから月や火星へ行ったり来たりしようと構想されています。人類の活動領域はどんどん広がりとつあり、それと並行して宇宙の神秘が少しずつ解き明かされていくにつれ、宇宙探査の目的の一つとして地球生命の起源や地球外生命の存在がこれまで以上に議論されるようになってきました。

地球外の文明があるかもしれないとして、それを地球上から探そうという試みは古く、1960年代から電波望遠鏡や光学望遠鏡、赤外望遠鏡などによる観測と解析が盛んに行われてきました。また、一方で地球からメッセージを送り宇宙人と交信する試み「CETI: Communication with Extra-Terrestrial Intelligence（地球外知性との交信）」も行われました。現在は交信ではなく電波を探査し受信するだけのプロジェクト「SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence（地球外知性の探査）」として、世界で進行していますが、未だ地球外知性の発見には至っていません。1977年に打ち上げられたVoyager 2号が2018年11月5日に太陽圏を脱出したとNASAが発表しました。同じく1977年に打ち上げられ2012年8月に太陽圏を脱出したVoyager 1号に続いて、旅立ちから41年、Voyager 2号は人類4番目の恒星間空間に飛び出した人工物体となりました。Voyager 1号、2号には未知の知的生命体に向けて、音楽や画像、自然音や様々な国の言葉での挨拶などが録音されたゴールデンレコードが積まれています。地球外知的生命体の手に届く日は来るのでしょうか？

NASAは、みずがめ座の方角に約40光年離れた恒星「トラピスト1」の周りに、大きさが地球の0.76～1.13倍の惑星7つを発見したと2017年2月に発表しました。このうち6つは地球に似た質量で、岩石できているとみられ、少なくともその内3つの惑星には地表に水が液体のまま存在する可能性があるようです。このように恒星からの距離が程よく、水が蒸発するほど暑すぎたり、凍るほど寒すぎたりすることのない環境は、「ハビタブル（生命が住むのに適した）ゾーン」と呼ばれ、生命が存在するかもしれません。

人類は今、火星に行こうとしています。火星に生物がいた、あるいは今もそこにいるかもしれない、地球生命の母なる星ではないか、など生命の謎に1960年代から挑んできました。2012年NASAは火星に探査ローバー「Curiosity」を着陸させて観測を開始しました。Curiosityの大きな目的の一つは、火星に生命が存在するのがあるいは存在していた痕跡があるのか、また火星は、生命が存在しうる環境であるのがあるいはあったのか、その疑問に対する答えを見つけることです。そして、今回、2018年6月にNASAは、Curiosityが探査している「ゲ



Voyagerとゴールデンレコード（上）とゲイル・クレーターを探索するCuriosityの「自撮り」写真（下） by NASA。

イル・クレーター」と呼ばれる場所で、30億年以上前にかつては湖だった底に溜まった泥から形成された堆積岩から、有機分子を検出したと発表しました。かつて水の在った場所からの発見であることから俄然生物由来では？との期待が高まっています。さらに、Curiosityは生物活動によっても発生するメタンがこのクレーター上でも存在し、季節変動することも発見しました。今現在、生物（微生物）がいるのかもしれませんが。さらに欧州宇宙機関（ESA）は、火星探査機「マーズ・エクスプレス」が、火星に液体の水が存在している証拠を見つけたと、2018年7月に発表しました。Curiosityは2018年夏に吹き荒れた長期間の砂嵐にもめげず今も元気？に火星の地表を走り回っており、今後も興味深いデータを送ってくれることを期待しています。

「はやぶさ2」が、2019年2月22日に「リュウグウ」へのタッチダウンに成功しましたが、このミッションの目的の一つが生命の起源の探査です。「はやぶさ2」が持ち帰る試料に有機分子が見つかるかどうかに興味を持っています。リュウグウは地球と同じような起源の小惑星だからです。有機分子が見つかったからと言って、それが直ぐに「生命の起源」に結びつく訳ではありませんが、見つければどんな有機分子なのか興味は尽きません。

地球の構造や環境はかなり特殊で、我々地球上の生物にとっては奇跡の惑星かもしれませんが、宇宙には観測可能な範囲で2,000億近い銀河が在り、1つの銀河には少なくとも1,000万から100兆個もの星々（恒星）が輝き存在しています。惑星の数を考えたら無数と言っても良いでしょう。その中で地球にしか生物はいないと思える方に無理があるように思うのですが。もちろんたとえ地球のような惑星が見つかったとしても、進化の過程も違うでしょうから地球の生物と必ずしも同じ姿かたちをしているとは思えません。

学際科学研究系 専任教授
石岡 憲昭（いしおか のりあき）

青年よ、世界を目指せ

36 年間に在職した宇宙科学研究所（以下、宇宙研と略す）をいよいよ退職することになりましたので、ここでお別れと感謝のための言葉を述べさせていただきます。

36 年間の在職中は、多くのプロジェクトで通信系、データ処理系、地上系などの担当をさせていただき、宇宙研だけでなく大学、メーカ、海外の宇宙機関などに在籍する多くの優秀な研究者や技術者とともに楽しく有意義な仕事をさせていただきました。ちなみに、私が宇宙研に就職して最初に担当した仕事は、ハレー彗星探査機「さきがけ」と「すいせい」のための NASA/DSN

との間の技術的調整でした。「さきがけ」と「すいせい」は、日本で最初の深宇宙探査機ですが、これらの追跡支援のために NASA が保有する深宇宙用の追跡アンテナネットワークである Deep Space Network (DSN) に支援を依頼することになり、そのための技術的な調整が私が担当することになったのです。私の初めての海外出張も、DSN を管理している NASA ジェット推進研究所 (JPL) を訪問し、これらのプロジェクトのために調整を行うことが目的でした。DSN との調整の仕事は退職間際まで続けることになり、私の最後の海外出張でも JPL を訪問し、幾つかのプロジェクトのために DSN との調整を行いました。

私が就職直後に担当したもう一つの仕事が、その当時発足したばかりの国際委員会である宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) の委員でした。この委員会は、NASA 等の世界の宇宙機関が集まって結成されたものであり、宇宙データに関する国際的な基準を作り、宇宙機関が追跡設備などの設備を相互に利用しやすくすることを目的としています。この委員会の仕事は、DSN との調整にも役に立つ上に、国際的な技術動向を学ぶためにも大いに役に立ちました。しかし、日本と世界との間の技術のギャップは大きく、最初の数年間は学ぶだけで精一杯でした。

ところが、何年か経つうちに、自分でも「こうした良いのではないか」というアイデアを出せるようになり、積極的に提案を行うようになりました。この委員会の人たちは、良いアイデアはどんどん取り上げてくださり、私が出したアイデアもほとんどのものが CCSDS の公式文書に反映され、世界中の衛星や探査機で使われるようになりました。さらに、作業部会長などの役職にも就くことになり、委員会のマネジメントにも深く関わりました。ついには、この委員会における NASA の代表の方から「NASA に来て一緒にやってくれないか」とのお招きを受け、JPL において半年間、NASA の人たちと仕事をさせていただきました。この時は、DSN の技術者とも



CCSDS に設置されている 6 つの技術領域の一つであるシステム工学領域の副代表として筆者が参加していた CCSDS 技術諮問委員会にて (2009 年 4 月、米国コロラド州)。左端が筆者。

一緒に仕事をさせていただき、この仕事を通じて得られた人脈は、その後の宇宙研のプロジェクトでも大いに活かすことができました。

この JPL 滞在は、私にとっては天地がひっくり返るような体験でした。日本とアメリカでは、仕事のスタイルが全く違うのです。日本が集団主義とすれば、アメリカは個人主義。日本が平等主義とすれば、アメリカは実力主義。例えば、アメリカでは、個人ごとに業務の責任範囲がはっきりと定義され、自分の責任範囲内のことは自分に決定権があり、自分の好きなように勝手に進めて良いのです。個々人の責任範囲は、その人の得意なことに基づいて定められます。自分の得意なことを好き勝手にやれば、ますます得意になり、ついには世界のトップに立つことも可能です。実際に、JPL の研究者や技術者のかなりの割合の人が世界のトップレベルの研究や開発を行っていました。

上で述べたような私の体験に基づいて後輩の研究者や技術者に私がアドバイスさせていただけるとしたら、「世界を目指せ」と言わせていただきます。宇宙科学の世界では今後ますます国際共同プロジェクトが増えると思いますが、世界の様々な人たちと仕事を行い、交流を深めることは、国際共同プロジェクトに役立つだけでなく、自分の視野を広げるのに大いに役立ちます。さらに、自分の得意なことを好き勝手にやり、世界のトップを目指してもらいたいと思います。

宇宙研の研究者および技術者としての私の旅は終わりを迎えるつつありますが、4 月からは情報や言語に関する理科系の学問と文科系の学問を統合するという新しい旅を始める予定です。この旅は、今までの旅よりもはるかに困難なものになると思われますが、老骨に鞭を打って旅を続けるつもりですので、温かく見守ってくださればと思います。最後になりましたが、今までにお世話になった宇宙研内外の方々に心からお礼を申し上げます。

宇宙機応用工学研究系研究主幹 教授
山田 隆弘 (やまだ たかひろ)

宇宙科学研究所図書室と井上桜

宇宙研に着任したのは、筑波大学図書館から異動した昭和63年でした。研究管理棟前はまだ工事中でしたが、正面に植えられた桜の木があまりにも細く、成長できるのかを自分と重ね合わせ、「井上桜」と命名し励まし合ってきました。

宇宙科学研究所図書室という専門図書室へ異動して一番驚いたのは図書の貸出方法で、利用者が「貸出カード」を自分で書いて控えを置いていくことでした。現在のレポートの貸出と同じということに、遅まきながら今、気がつきました。着任初期の業務は図書目録の担当で、その後、雑誌も担当することになりました。2007年から発行を担当している年次要覧の平成元年版では、417種の外国雑誌を購読していることが記載されています。今では誰もが利用している「CiNii Books」の元である学術雑誌総合目録への所蔵データを提出していました。そのおかげで、所蔵タイトルはほぼ記憶しています。

いちばん苦労した思い出は、2007年に1階の集密書架を新しく入替えた作業です。まず業者さんをお願いして、配架されている製本雑誌を段ボールに詰めてもらい研究管理棟の1、2階の廊下壁伝いに4箱重ねて積み、古い書架を解体し、新しい集密書架が設置されたら、廊下の段ボール箱から台車に製本雑誌を乗せて、書架まで戻すという作業を繰り返しました。配架した雑誌の冊数は、約3万5,000冊（段ボール箱数約2,800）でした。配架は図書室員のみの作業で長時間がかかってしまったため、利用者にご迷惑をお掛けしました。段ボールは製本雑誌の重みに耐えられず変形してしまうし、なかなか数が減らない段ボールに急かされながらも体力勝負で乗り越えました。

図書の業務は、2000年問題後に全てがシステム化され、図書の貸出は自動貸出機にまかされ、窓口時間と切り離され24時間利用可能となりました。その後、JAXA統合となり、調布の本社図書館と角田図書室が採用していた図書館システムに筑波図書室のデータを統合し、その後、宇宙研の図書室も統合して、ONE JAXAを実現、2回のシステム換装を経て、現在の「JAXA Library Portal」となりました。

働き始めた時から図書館、図書室の仕事を続けてきましたが、事務機器は和文タイプ、英文タイプ、ワープロ、そしてパソコン、電子媒体は「フロッピーディスク」それも8インチ、5インチそして3.5インチ、「CD-ROM」「DVD」「USBメモリ」などなど、いろいろな物が通っていきました。NASAのテクニカルレポートもマイクロフィッシュ（MF）からのコピー取り寄せが、ホームページからのダウンロードが可能となり、AIAA Meeting



1997年



2002年



2009年



2013年



2016年



2018年

Papersの所蔵も、MFからCD-ROMそしてオンラインと形態が変わりました。413種の外国雑誌の購入も電子ジャーナルが当たり前となり、現在は、13種の冊子の購読と5,000タイトル以上の電子ジャーナルへのアクセスが可能となり、図書も電子ブックを利用する時代となりました。

仕事以外では、宇宙研内のテニスコートでウッドのラケットにてデビュー。皆様にご指導いただき、昼休みには毎日師匠と対戦していた頃もありました。業務での関わりがあまりない先生や大学院生の皆様とご一緒することができ、また、外国からの研究者の皆様と交流することで大変楽しい日々を過ごすことができました。

井上桜は芽吹き始め、一つ二つと花が咲くと誰もが足を止めます。やがて桜色が濃くなり満開になる頃には、みんなが写真を撮る光景を図書室の窓から一人眺め、人気あるなど密かに喜んでいました。一番の見頃に、正門から、研究管理棟入口から、2階からいろいろな角度から写真を撮ることが、3月半ばから1カ月ほどの年中行事となっていました。

着任した時、宇宙航空工学分野の雑誌から二次資料（NASA、ESA）等々、初めて目にするものばかりで右も左もわかりませんでしたが、長期にわたりいろいろなことに触れ、利用者の質問に回答する毎に学ばせていただき、現在に至ることができました。心から感謝いたします。

まもなく井上桜も満開を迎えます。相模原での31年間を、井上桜とともに杯を上げながら振り返ってみましょうか。

科学推進部 井上 喜美子（いのうえ きみこ）



ISASニュース No.456 2019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 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

「はやぶさ2」のタッチダウンは見事でしたね。うまくいかなかった「はやぶさ」の時から実に13年後の快挙だそうです。その間の地道な日々の努力が実を結んだのです。目が離せないミッションが続く日本の宇宙探査に乞うご期待。（竹前 俊昭）

*本誌は再生紙（古70%）、
植物油インキを使用して
います。

R70
古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

VEGETABLE
OIL INK