


 再使用ロケット実験機
RV-X第1次地上燃焼試験

8月より能代ロケット実験場にて再使用ロケット実験機 RV-X の地上燃焼試験に取り組んでいます。飛行実験に向けてエンジンの特性や音響振動などの環境データを取得すること、安全かつ効率的な繰り返し運用方法を習得することなどが主な目的です。9月上旬までに2回の燃焼試験を実施し、9月下旬からも引き続き試験を進めています。(5P 参照)

宇宙科学最前線

「あかつき」による金星の気象と大気力学の研究

北海道大学 地球環境科学研究所 准教授
宇宙科学研究所 客員准教授

堀之内 武 (ほりのうち たけし)

はじめに：「あかつき」

「あかつき」は2010年5月に打ち上げられた金星探査機です。同年12月の軌道投入失敗の後、生き残った姿勢制御エンジンを使って、2015年12月に軌道投入に成功し、以来金星を周期10日ほどで周回しながら、観測を続けています。紫外線から赤外線の様々な波長で撮影して大気や雲などを観測する、いわば金星の気象衛星です。

筆者は気象学者です。「あかつき」科学チーム内では、雲を追跡して風を推定し、それを使って金星大気力学を研究しています。探査機本体や搭載機器の開発には関わっていない身ですが、僭越ながら、「あかつき」のこれまでの科学成果を紹介します。

金星の気象と気候

大気をもつ太陽系の地球型惑星には、地球のほかに火星と金星があります。現在の地球の大気しか知らなければ、それに縛られた発想になりがちです。地球以外の惑星の気象とその仕組みを知ることは、地表面のある惑星の大気を広い枠組みで理解することに役立ちます。それ

は、地球大気の将来の可能性に対する知見にも、生命を育む惑星の大気のありようの可能性についての知見にも繋がります。

地球以外の2つの惑星のうち、火星の大気はより進んでいます。地球大気とは組成(CO₂が主)も地表気圧(地球の1%弱)も大きく違いますが、移動性高低気圧や低緯度から中緯度に向かう大規模な大気循環が存在し、大気潮汐や砂嵐があるなど、多くの面で地球の気象と本質的に同じ現象が、違った形やスケールで展開します(例えば火星の砂嵐は、時に火星全体に広がります)。

それに対して、金星にはそもそもどのような気象があるのか、あまりわかりません。図1は、後に「あかつき」として実現される金星探査機を提案した「金星探査計画提案書」(2001年)の中の図の一つです。「金星気象オービターからのグローバルな観測によって、果たしてどのような大気運動が姿を現すだろうか。」とありますが、さて、観測を始めたらどんなことがわかったか、まだ途中経過ですが、本稿で紹介します。

金星大気は地表面付近での気圧が高く(約90気圧)、気温も高い(約460℃)ことは、つとに知られていま



惑星波動
熱潮汐波
順圧・傾圧不安定
大規模水平乱流
子午面循環



鉛直・水平対流
電放電
対流圏・成層圏
物質交換

内部重力波
碎波乱流
シア不安定



雲粒の生成、輸送、
変質
雲クラスター
雲放射 - 大気力学
フィードバック



図1 「金星探査計画提案書」(2001年)中の図の一つ。同文書における見出しは「金星気象オービターからのグローバルな観測によって、果たしてどのような大気運動が姿を現すだろうか。」です。

すが、金星大気に関して近年有名になりつつあるのが、「スーパーローテーション」です。金星の自転は、一回転に243日かかるゆっくりしたのですが、大気は自転と同じ向き（ちなみに地球と反対で西向きです）に、より高速で回転しています。その速さは、地表付近から高くなるほど増し、高度70 km付近では約4日で金星を1周することが、20世紀に行われた突入観測などからわかっています。これがスーパーローテーションです（自転を「上回る回転」という意味です）。この現象がどのようなメカニズムで生じるか、説はあるもののまだ解明されていません。

「あかつき」の主な観測ターゲットは金星の大気と雲です。金星の雲は硫酸を主成分とし、高度45-70 kmに分布しています。この分厚い雲に覆われた金星にはどのような未知の気象があるか、それはどのような力学に支配されているか、そして、スーパーローテーションはどのように生じ、どのように維持されているかを明らかにすることが、「あかつき」プロジェクトの主な目標です。以下では、これまでの成果を駆け足で紹介します。

「弓状構造」の発見とそれがもたらしたもの

「あかつき」は2015年12月7日に金星周回軌道に投入され、それから数日間、金星の画像を何枚か撮りました。とくに、投入直後の撮影は、もしも再度投入に失敗しても金星のクローズアップ写真が撮れるようにと計画されたものです。2日後の12月9日に、最初に得られた画像を公開する記者会見が行われました。この日は、「あかつき」科学チーム内でも、記者会見でも取りあげられたひとつの画像（図2）についての話題で持ちきりでした。それは、LIRという、天気予報でおなじみの気象衛星「ひまわり」の赤外画像と同様に中間赤外線撮影するカメラがもたらしたものです。そこには、これまで誰も見たことのない弓型の模様がくっきり写っていました。LIRの観測からは雲頂の温度がわかりますが、それは雲の高さを反映するので、雲頂が弓なりの山脈のようになっていることを意味します（ちなみに、同様な観測による、「ひまわり」の画像では、温度の低いところ

が白く表現されています。上空は気温が低いので、雲があるとそこが白くなるという仕組みです）。この「弓」は、南北両半球にまたがり、長さは約1万 kmに及びます。

その後の数日間の観測により、この模様は金星の風に流されず動かないことがわかりました。動かない雲模様は、はるかに小規模なものなら地球でもよく発生します。それは、山岳波と呼ばれ、浮力を復元力とする「大気重力波」と呼ばれる波の一形態です（一般相対性理論による重力波とは全く別物です）。金星の弓状構造も、地球では観測されたことのない巨大なものながら、山岳波であることが明らかになりました^{*1}。実際、弓の中央の下、赤道あたりに、アフロディーテ（ビーナスのギリシャ名です）高地という4,000 m級の広い高地があります。

しかし、このような山岳波の存在は、かなり考えるににくいことでした。山岳波は、山越え気流の上下動によって生じますが、過去数回の突入観測からは大気下層にほとんど風がないという結果が得られており、それをもとにシミュレーションを行うと、やはり山岳波はほとんどできなくて観測が説明できません。また、スーパーローテーションの長期安定性を考えると、低緯度の風は、（弱いながらも）基本的には地球の貿易風と同様に自転と逆向

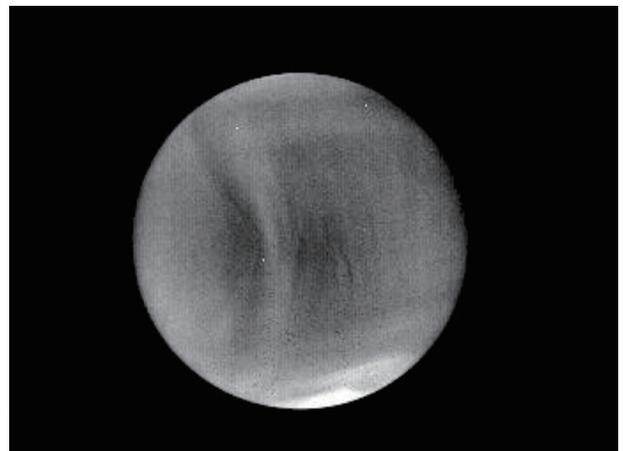


図2 「あかつき」の軌道投入直後にLIRによって撮影された中間赤外画像（速報に使われた画像）。自転軸が少し傾いた状態で写っています（画面下の白っぽいところは南極付近）。

きが卓越すると考えられますが、それは金星で山岳波が上空に到達できる条件とは反対です。

このような困難があるということは、裏を返せば、今までの知見が不十分であったことを示唆します。つまり、弓状構造の存在は、下層大気についての知見と、スーパーローテーションの長期安定性の理論にとって、満たすべき制約条件として活用できることがわかったのです。その後の観測から、弓状構造は、金星の高地上に、太陽との位置関係がある条件を満たすときによく現れることがわかりました^{※2}。そして、最近それを、金星の大気大循環モデル（地球の気象・気候の予測に使われるのと同じつくりの計算機プログラム）によるシミュレーションで見事に再現した研究が現れました^{※3}。これにより、山地の上で風速が強化される「目からうろこ」的なメカニズムが示されました。ただ、そのシミュレーションは設定が特殊で、山地の存在によってスーパーローテーションの維持が難しくなることも示され、まだまだ課題があります。

ベールを脱いだ、雲の中で展開するダイナミックな運動

金星の厚い雲は光や赤外線を散乱し観測を阻みますが、赤外線の特定の波長帯では下層からの赤外線が雲によって減衰されつつも直接宇宙空間に届きます。「窓領域」と呼ばれるこの波長帯を使って、「あかつき」では、雲の「影絵」を観測できます。残念ながら、この観測が行える IR2、IR1 という観測装置は、現在は不具合により観測できませんが、投入後1年の間に素晴らしいデータをもたらしました。

影絵は主に、比較的濃い中・下層の雲によって生じることがわかっています。その運動を追跡することで流れがわかります。窓領域での観測は、「あかつき」の前に金星を観測した Venus Express（欧州の金星探査機）などで行われていますが、観測機会が限られていました。「あかつき」以前の研究からは、中・下層雲域での流れは、極域以外では変化に乏しく、単純に東から西に流れていると考えられてきました。しかし、「あかつき」により、これまで見られたことのなかったジェット様の気流が赤道上に現れる時期があることが見つかり^{※4}、さらに流れの様々な乱れが生ずることが明らかになりました。図3はその一つです。渦巻きのような模様がいくつか東西に連なっています。これは、コーヒーにクリームを浮かべてスプーンで回したときにできる模様と成因は同じで、シアと呼ばれる局所的な流れの差が一定以上に大きくなると生じます。上記の「赤道ジェット」においても、その脇でシアが強まり、直径1,000 km以上の渦の列が生じた現象も観測されました。その他に、今のところ成因が全くわからない筋状の大規模構造が形成されることなどがわかっています。シミュレーションからは、地球の移動性高低気圧と似たメカニズムで大規模な流れが生ずる可能性も示されています。それはまだ見つかりませんが、データ処理の工夫で今後見つかる可能性があります。

「あかつき」がもたらした画像は、静かで面白みのない中下層雲域の流れという従来の描像を大きく覆しました。さらに、紫外線による雲頂の観測からも様々な発見

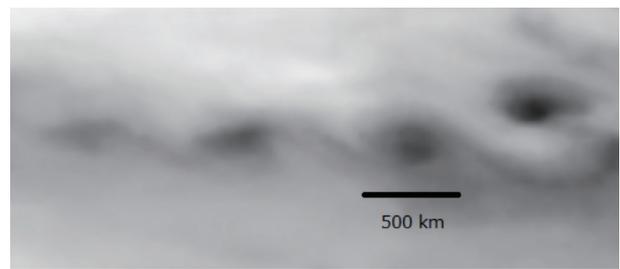


図3 IR2によって捉えられた中下層領域の渦列の例。経度-緯度座標で表示してクローズアップ。雲の濃いところがより白くなるよう、明暗を反転。

がありました。「あかつき」の計画時に挙げられた知識の空白（図1）は、（まだ大きいものの）埋められつつあります。

スーパーローテーションの維持機構

スーパーローテーションの維持機構を調べるには、金星大気において角運動量の流れがどのようになっているかを知る必要があります。かなり精度の高い観測が必要のため、過去の探査機では実現していなかった挑戦的な課題です。「あかつき」の「雲追跡」チームは、このため新しい雲追跡法と精度評価法を開発しました。私の研究室では、2010年の打上げの年に入学した大学院生が雲追跡法の開発に取りかかりました。その年の軌道投入には失敗したものの、Venus Expressのデータを使って一緒に開発を進めました^{※5}。2015年からは、「あかつき」用にそれまでに開発されてきたプログラムに統合し、さらに開発を進めました。これを「あかつき」のデータに適用すると、データが高品質なことと相まって、過去の金星探査にもとづく研究を大きく上回る精度の風速推定が、広範囲に行えることが明らかになりました。上記の赤道ジェットの発見も、この技術に支えられています。

スーパーローテーションの維持機構の研究は、現在進行中です。これまでに、雲頂付近での角運動量収支がかなり制約できることが明らかになりました。その結果は、最近の日本のグループの数値モデリングの結果と整合的です。そこで、観測と数値モデリングの結果を両輪として研究を進めています。その内容は、今後論文として発表することになります。

おわりに

本稿では、「あかつき」によってこれまでに得られた成果の一部を紹介してきました（学術的なインパクトが大きいけれど紹介しきれなかった成果がいくつかあります）。「あかつき」を機に、観測だけでなく理論やモデリングでも、日本の金星大気研究が盛り上がってきています。ISAS ニュース 2017年9月号（No.438）もご覧ください。これからも金星の気象と大気力学の解明が進むよう、そしてより広い見地で「地球流体力学」が深まるよう、貢献していきたいと考えています。

※1 Fukuhara et al., 2017, Nature Geoscience, 10, 85-88.
 ※2 Kouyama et al., 2017, Geophys. Res. Lett., 44, 12,098-12,105
 ※3 Navarro et al., 2018, Nature Geoscience, 11, 487-491.
 ※4 Horinouchi et al., 2017, Nature Geoscience, 10, 646-651.
 ※5 Ikegawa and Horinouchi, 2016, Icarus, 271, 98-119.

「はやぶさ2」：タッチダウン運用リハーサルとMINERVA-II1分離運用

9月になり「はやぶさ2」の運用が最初の山場に入ってきました。まず、9月10日から12日にかけて、最初のタッチダウンに向けた1回目の降下リハーサルを行いました。小惑星リュウグウに高度40m以下まで接近して戻ってくるという運用です。

探査機は、9月11日の15:27(日本時間)よりホームポジション(高度20km)から0.4m/sの速度で降下を開始しました。降下は順調に進み、高度が約5kmになった9月12日の02:05に降下速度を0.1m/sに減速しました。その後も順調に降下していきましたが、同日12:57に高度約600mで探査機は自律判断で降下を中止し、上昇に転じてしまいました。その理由は、探査機と小惑星表面の間の距離を測っているLIDAR(レーザ高度計)の計測ができなくなったためです。翌日、探査機は正常にホームポジションに戻りました。

LIDARの距離計測ができなくなった理由は、すぐに判明しました。LIDARは、遠距離モードと近距離モードがあり、600m付近でモードを切り替えることになっていました。ところが小惑星からのレーザ反射光の強度が弱く、近距離モードでの計測が上手くいかず、結果としてモードを切り替えることができなかったのです。近距離モードはこのリハーサルで初めて使うモードだったので、設定条件がこの目的に適切でなかったのが原因でした。つまり、LIDARの設定値を適切に調整すればよいということになり、深刻なトラブルではないと判明しました。

40m以下まで降下するという目的は果たせませんが、このリハーサル降下でタッチダウン候補地を約3km上空から撮影できました(図1)。これまでよりも詳しく候補地が確認でき、タッチダウンの検討にとって重要なデータが取得できたこととなります。

LIDARの設定値を変更すれば問題ないという判断がなされましたので、小型探査ロボットであるMINERVA-II1(ミネルバ・ツー・ワン)をリュウグウ表面に届ける運用は予定どおりに行うことになりました。降下のための準備運用は9月19日から始まり、9月20日の14:08から探査機は降下

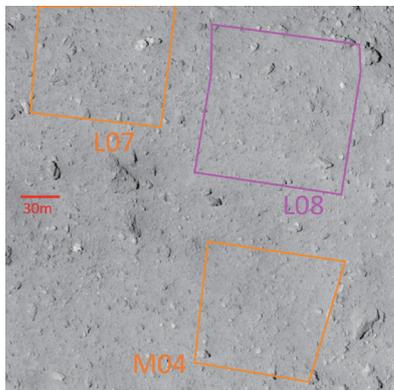


図1 望遠の光学航法カメラ(ONC-T)で約3km上空から撮影したタッチダウン候補地点付近の画像。2018年9月12日6:00(日本時間)頃の撮影。L08がタッチダウン候補地点であり、L07とM04はバックアップの地点を示す。
(©JAXA、東京大学、高知大学、立教大学、名古屋大学、千葉工業大学、明治大学、会津大学、産業技術総合研究所)

を開始しました。リハーサルの時と同様に、最初は0.4m/sの速度で、そして高度5kmからは0.1km/sの速度で降下しました。そして、リハーサルでは降下を中止してしまった高度600mも無事に通過し、9月21日の13:04、ついに高度60mに達しました。ここで

探査機は3cm/sに減速し、約2分後の13:06に、MINERVA-II1を切り離しました。その1分後、探査機は上昇のためのスラスター噴射をし、順調に上昇を続けて、9月22日の15:00にはホームポジションに戻りました。MINERVA-II1分離は成功です。

分離されたMINERVA-II1ですが、分離直後に探査機との通信ができ、21日の夜の運用では画像データを取得、着地したことも分かりました。最初に送られてきたいくつかの画像の中で非常に印象的だったものが図2です。世界で初めて至近距離で見た小惑星表面ということだけでなく、太陽光のいたすらで全く予想していなかった芸術的とも言える写真となっています。

MINERVA-II1には1Aと1Bの2機がありますが、両方ともホップして移動していることも確認されました。また着陸後の数日(と言っても、リュウグウ時間では10日以上)にわたって2機のMINERVA-II1からは情報が送られてきています。

「はやぶさ」初号機では2005年11月に「ミネルバ」を放出しましたが、小惑星イトカワの表面に届けることができませんでした。「ミネルバ」は、「はやぶさ」の太陽電池のパドルを撮影しただけで、太陽系空間のどこかに飛んでいってしまいました。それから約13年、今度は小型探査ロボットを小さな小惑星に届けることができ、その小型ロボットが小惑星の表面を飛び跳ねながら探査をしているわけで、感慨深いと同時に想像しただけで楽しくなってきます。MINERVA-II1は、新たな探査スタイルを実証したと言ってよいでしょう。

「はやぶさ2」は、まず一つの挑戦に成功しました。これからMASCOT(マスコット)分離運用、タッチダウン運用、衝突装置運用とさらに高度な運用が控えています。プロジェクトメンバー一同、気を引き締めて運用に取り組んでいます。

(吉川 真)

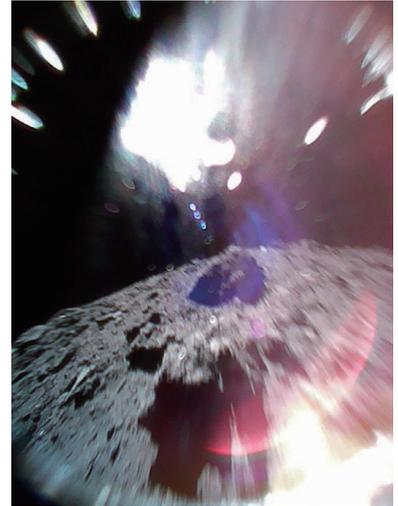


図2 2018年9月22日11:44(日本時間)にRover-1Aが撮影。カラー画像。リュウグウ表面において移動中(ホップ中)に撮影されたもの。下がリュウグウの表面。上の白い部分は太陽光によるもの。

2018年10月3日に、MASCOT分離運用を行い、無事にMASCOTをリュウグウ表面に届けることができました。MASCOTからデータも取得できています。

再使用ロケット実験機RV-X・第1次地上燃焼試験の状況

能代ロケット実験場で実施している再使用ロケット実験機RV-Xの第1次地上燃焼試験についてご紹介します。RV-Xは2003年まで飛行実験を繰り返したRVTよりも一回り大きく、より将来に向けたロケットの再使用技術を飛行実験などにより獲得するための実験機です。昨年度から今年6月まで相模原キャンパスにて実験機の構築を進め、タンクやバルブ、配管などの推進系とそれらを支える構造系を組み立てました。組み上がった機体を6月末に能代ロケット実験場に移動し、専用のテストスタンドに据え付けて試験に向けた準備を開始しました。

RV-Xは推進剤として液体水素と液体酸素を用います。これらの液体推進剤を機体に搭載されたタンクに充填し、タンクの加圧の特性や推進剤の蒸発率、エンジンへの供給能力など、燃焼試験に向けた推進系の特性を取得するための機能試験を7月に実施しました。これと並行して、機体に搭載するエンジン、機体を操作するアビオニクスや計測系など、燃焼試験に必要な機器の準備を進め、7月末までに各機器を能代に集結して、8月からいよいよ地上燃焼試験RV-X-1の準備作業に入りました。飛行実験に向けてエンジンの特性や音響振動などの環境データを取得すること、効率的な繰り返し運用方法を習得することなどが燃焼試験の主な目的です。これがRV-Xとしては初めてエンジンに火をつける試験となります。

機体の周りには足場が組まれ、そこで各実験班の準備作業が行われるのですが、この夏の能代は18年間能代に通う私も経験したことがないような猛暑がつづき、皆さん汗だくになって作業を進めました（私だけ涼しい本部でごめんなさい…）。また8月後半は大雨や雷が続き、挙句の果てには台風まで近づいてきまして一部作業に遅れが生じましたが、9月1日に漸くエンジンの燃焼試験を行うことができました。9月後半からはエンジン推力を最大の約4トンまで上げる試験を実施し、今回の目的であるエンジンの作動点を定めるためのバルブの開度データや燃焼中の振動などの環境データを取得していません（表紙参照）。安全かつ効率的な再使用運用を実現するため、燃焼試験を繰り返し行う中で運用手順を改善しつつ取り組んでいます。

今回の実験には相模原のメンバーだけでなく、この研究活動と一緒に取り組む角田やつくば、調布の皆さん、共同研究先のメーカーさんなども参加し、再使用型宇宙輸送システムの開発を加速すべくチーム一丸となって頑張っているところです。能代の皆さんも毎日サポートありがとうございます。スタンドのRV-Xを見上げるとやっとならなうロケットっぽくなってきたかなと思いましたが、まだまだこれからです。引き続き応援よろしく申し上げます。

(野中 聡)

BepiColombo 燃料注液とスタック状態への結合

「みお」は8月末にMPOと結合されミニスタックと呼ばれる状態になりました。ミニスタックおよびMTMは作業場所を燃料の注液を行う場所（S5Bと呼ばれるクリーンルームです）に移動し、9月4日から12日にかけてMPO・MTMへの酸化剤（MON）の注液、MTMへの燃料（MMH）の注液、MPOへの燃料（ヒドラジン）の注液を順次行いました。

作業は順調に進み、9月19日にはミニスタックとMTMが機械的に結合され、打上げおよび巡航軌道での形態となるスタック状態へと移行しました。この結合作業はミニスタックへの結合作業と同様にThales Alenia Space Italiaのチームにより実施されました。この作業は既に推進薬が衛星に充填されているため危険作業であり、人数制限（JAXAからは1名）をした上で実施されました。この後その週末にかけて電氣的な結合作業が行われました。

翌週の9月24日から25日にはスタック状態での電気試験が行われました。この電気試験により「みお」とMPOとの間の電氣的チェックおよび「みお」の動作確認が行われ健全性が確認されました。この試験が打上げ前の最後の電気試験であり、地上で「みお」に火が入るのはこれが最後です。次に「みお」に火が入るのは打上げ後の宇宙空間となります。

この間にBepiColomboの一つ前の打上げであるVA-243（Ariane-5として100機目！VA-245であるBepiColombo

は101機目となります）の打上げが行われました。当初の予定よりも3週間ほど遅延して、9月25日（現地時間）となった為に、射場側の準備作業の制約からBepiColomboの打上げ予定日は当初の10月18日夜（現地時間）から1日遅れの10月19日夜（現地時間）となりました。

10月4日からはPOC（英語表記では、Combined Operations Planning）と呼ばれるロケット側との共同作業が開始されます。長かった射場作業もいよいよ大詰めを迎え、打上げが目前となってきました。

最新情報は「みお」プロジェクトホームページに掲載されています。

<http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/index-j.html>

(早川 基)



ミニスタックとMTMの結合作業の様子。
(©CSG)

第12回「ひので」科学会議

「ひので」は、打上げから今年で12年が経過し、日本で最も“長生き”な太陽観測衛星となりました。この12周年を祝う場所として、アラブと西洋の文化が融合した建築物が数多くあるスペイン・グラナダが選ばれました。この地にて、太陽研究の最新成果を議論する第12回「ひので」科学会議（Hinode12）が9月10～13日に開催されました。

140人以上の研究者が集まり、4日間にわたって毎日20件以上の口頭講演とポスター発表を通して、活発な議論が交わされました。なかでも、宇宙天気の前報能力改善に向け取り組まれている“太陽噴出”に関する研究や、数値シミュレーションと協力して進められている「ひので」偏光観測データに基づいた“磁場構造のモデリング”は、特に注目を集めました。また、太陽観測を開始したALMAなどの地上望遠鏡や最近実験が行われた観測ロケット「Hi-C 2.1」・「FOXSI-3」の報告では、「ひので」との連携観測研究が重要な役割を果たすことがわかりました。結果として、最も重要なトピックと私が感じたのは、多岐にわたる将来宇宙ミッション・大口径地上望遠鏡に対し、「ひので」が如何にそれらと研究連携するのか、という点です。例えば、今年打ち上げられたNASAの探査機Parker Solar Probeは、「ひので」との共同観測が迫っています。この探査機は、太陽に接近して“その場”観測を行います。観測点と磁気的に結びつく太陽の微細磁場構造の診断は、現状「ひので」でしか成し得ません。



第12回「ひので」科学会議の参加者。

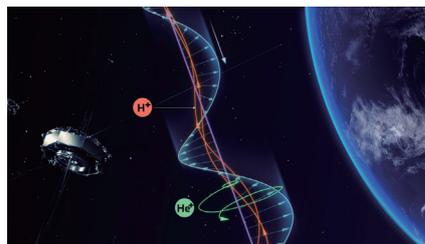
また、太陽観測で最大口径となる地上望遠鏡「DKIST」は来年ファーストライトが予定され、「ひので」との共同観測が強く求められています。さらに、日本主導で開発が進められている小規模プロジェクト「CLASP 2」・「SUNRISE-3」でも、「ひので」による支援が必須です。このように「ひので」による高精度な宇宙観測は、連携して物理現象の解明に必須な情報を提供しているのです。

さらなる太陽の理解を目指し、「ひので」の次の衛星が計画されています。それは「Solar-C_EUVST」です。この衛星は、太陽の活動が極大となる2024-2026年の打上げを目指しており、最近JAXAの“ミッション候補”として採択されました。我々は、今まさに日本が牽引する太陽物理学の黄金時代に立っています。「太陽活動の変遷」や「噴出現象の物理背景」を理解できれば、それらが地球へ及ぼす影響への理解も大きく深まるに違いありません。（カルロス キンテロ・ノダ、(訳) 大場 崇義）

MMS衛星による最新成果～宇宙空間でプラズマ波動を介したエネルギー輸送を直接捉えた～

2015年3月に打ち上げられたNASAのMagnetospheric Multiscale (MMS) 衛星編隊4機には、JAXAと明星電気が開発に大きく貢献した、かつてない高時間分解能で全方向から来たイオンを計測できるデュアル・イオンエネルギー分析器（FPI-DIS）が搭載されています。

宇宙空間はプラズマと呼ばれる荷電粒子で満たされており、高度が数千km以上では、密度が非常に低いため粒子同士がほとんど衝突しない無衝突状態となっています。このような無衝突状態は、天体の近傍を除けば宇宙空間の普遍的な状態です。無衝突で荷電粒子同士がエネルギーをやり取りするには電場や磁場の力を介する必要がある。その中で、プラズマ波動を介するものが、効率的な過程の1つとして宇宙空間の様々な領域で有効に働いていると考えられています。今回は、地球近傍の宇宙空間で取得されたデータを詳細に解析した結果、水素イオンの一部がエネルギーを失って、同時に観測された電磁イオンサイクロトロン波動というプラズマ波動（電磁波の一種でもある）にエネルギーを渡す一方、ヘリウムイオンはその波動からエネルギーを受け取って加速中であることを示す、一連の特徴的な運動を明らかにしました。プラズマ波動を介した粒子群間（今回は水素イオンとヘリウムイオン）でのエネルギー輸送は、多くの間接的証



波動粒子相互作用を観測するMMS衛星のイメージ。（©東京大学）

拠が積み重ねられてきていたものの、一連の過程全てを観測によって一度に実証したのは世界初の成果^{*1}^{*2}となりました。このエネルギー輸送を観測するための解析手法は、「あらせ」に向けて開発されてきた技術（参照：ISAS ニュース 2018年2月号「ERGプロジェクトリレートーク」）を応用したもので、今回の研究には「あらせ」に関連している研究者が多く参加しました。

今回のMMSミッションでの経験・成果を基盤として、日本の研究グループが、「あらせ」や将来ミッションを通じ、詳細観測が可能である地球近傍を中心として様々な波動粒子相互作用の研究を進展させ、さらに、その知見を他天体にも応用し、より普遍的な高エネルギー粒子加速や惑星大気散逸過程（イオン加速による大気の宇宙空間への流出）等の理解に広く貢献していくことが期待されます。（東京大学 北村 成寿）

*1 論文掲載 URL : <http://science.sciencemag.org/content/361/6406/1000>

*2 記者会見 URL : <https://www.youtube.com/watch?v=jQvdQwa88sw>

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



小型探査ローバMINERVA-II1、いよいよ小惑星へ着陸

小型探査ローバMINERVA-II1は、Rover-1AとRover-1Bの2機から構成されています。小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載され、リュウグウ近傍に滞在しています。MINERVA-II1は、地球からのコマンドで時々電源をONにして、「はやぶさ2」母船との無線通信により、健康状態をチェック、すこぶる良好です。

MINERVA-II1は、初代「はやぶさ」に搭載した「ミネルバ」を継ぐ第二世代の探査ロボットです。小天体のような微小重力環境下での移動メカニズムの実証と自律探査行動技術の確立を目的としています。重力の小さい環境で移動するためには、従来の車輪型ロボットは、うまく動くことができません。そこで内部モータによる新しいトルカ移動方式を考案しました。

地球との往復通信時間に数十分かかる惑星探査では、地球からの遠隔操作は難しい。また、小惑星の表面状態、温度環境、重力環境もよくわからない天体表面で、環境に適応しながら自律的に探査することが求められています。MINERVA-II1には人工知能が搭載され、暑い昼間には昼寝をし、夜も寝て、朝と夕方に活動します。未知の環境で、電力が限られている中、どのような行動を行うか、自分で判断するロボットです。また、カメラと温度セン

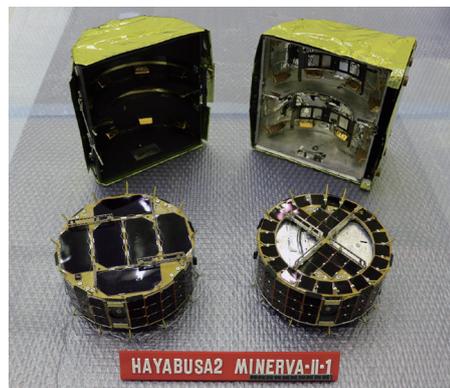


図 MINERVA-II1 探査ローバシステム（フライトモデル）。
左上：分離装置 OME-B、右上：分離装置カバー OME-C
左下：Rover-1A、右下：Rover-1B

サを搭載し、小惑星の表面の微細な写真を撮像し、また表面温度を計測します。科学的な知見が得られれば幸いです。

「はやぶさ2」MINERVA-II1 担当 久保田 孝（くぼた たかし）

2018年9月21日、MINERVA-II1が探査機から分離され、無事にリュウグウ表面に到達しました（4P参照）。2機ともリュウグウ表面でホップし、その表面の写真を送ってきました。これは、世界初の成功です。

リュウグウを表面で探査する—小型着陸機MASCOT

「はやぶさ2」には、小型ローバMINERVA-II1が2機とMINERVA-II2が1機に加えて、小型着陸機であるMASCOTが搭載されています。MASCOTは、Mobile Asteroid Surface Scoutを短く呼んだ名称です。DLR（ドイツ航空宇宙センター）とCNES（フランス国立宇宙研究センター）によって製作されました。したがってMASCOTチームは、主にヨーロッパの技術者・科学者からなっています。「はやぶさ」の後継機を検討していたときに、本格的な観測装置を組み込んだ着陸機を搭載したらどうかという議論があり、着陸機の部分はヨーロッパが協力するという方向で議論が進められました。最終的には探査機の規模が「はやぶさ」と同等程度になりましたので、着陸機の規模も縮小され、約10kgの機体を開発することになりました。

MASCOTは4つの科学観測機器を搭載しています。1つはMASCAM（マスカム）と呼ばれている広角のカメラで、リュウグウ表面の写真を撮影します。2つ目は、MicrOmega（マイクロオメガ）と呼ばれている近赤外の分光顕微鏡で、表面の鉱物組成を調べます。3つ目は、MARA（マラ）と呼ばれている熱放射計で、リュウグウの表面温度を測定します。そして4つ目はMASMAG（マスマグ）と呼ばれている磁力計でリュウグウ表面の磁場を計



図 MASCOTフライトモデル（探査機に搭載したもの）。

測します。MASCOTは、MINERVA-IIと同様にジャンプして移動できます。ただし、ジャンプするのは1回だけです。太陽電池は搭載せずにバッテリーだけで動作するために、寿命は16時間くらいです。これはリュウグウでの一昼夜を1日としたときの約2日分です。この間にリュウグウ表面を観測し、「はやぶさ2」に無線でデータを送り届けます。データがきちんと取得されることを期待しています。

DLR MASCOT プロジェクトマネージャ Tra-Mi Ho（トラミ ホー）
（日本語訳 吉川 真）

2018年10月3日に、MASCOTは探査機から分離され、無事にリュウグウ表面に到達しました。4つの科学観測機器からのデータも取得しています

モスクワ川のほとりで

宇宙科学研究所 地球外物質研究グループ 主任研究開発員

矢田 達 (やだ とおる)

2018年7月22日から27日にかけて、第81回国際隕石学会に参加する為、モスクワを訪れました。国際隕石学会は今年で81回目を数え、年1回、7~9月頃に世界に点在するいずれかの隕石の研究拠点をホストとして年會が開催されています。隕石研究の拠点は米国に多いため、だいたい米国のどこかと、米国外のいずれかの交替で開催され、昨年は米国ニューメキシコ州のサンタフェ、来年は日本の札幌で開催される予定になっています。今年は参加者が250名ほど、中日のエクスカッションを挟んで4日間にわたり3つのセッションが並行して開催される、中規模の学会です。学会がカバーする研究分野としては、従来の隕石・宇宙塵研究に留まらず、サンプルリターンミッションによる帰還試料などの研究成果も含まれます。

私は、2010年に帰還した「はやぶさ」帰還試料の初期記載・研究配布状況の報告と、2020年に帰還する予定の「はやぶさ2」帰還試料に対する準備状況を報告しました。私の所属する地球外物質研究グループでは、「はやぶさ」帰還試料から、粒子(大きさ0.01~0.3mm)の拾い出しと電子顕微鏡観察・分析による記載を行っており、最初の報道で公表された、テフロンへらに付着した1,500個の微粒子の他に、個別に拾い出して記載をした粒子も700個を超えています。今年、試料キャッチャーからの最後の叩き出しを行い、その拾い出し・記載を今後2年を目処に終わらせる予定です。一方で、それらの粒子を対象とした研究の国際公募を2012年から行っており、これまでに50件以上の研究テーマに対して延べ200個以上の粒子を配布しました。これらの国際公募研究の結果、例えば、大気を持たない天体表層における宇宙風化の初期過程が初めて明らかになった事、イトカワの形成史など、多くの重要な科学的成果が挙がっています(ISASニュース2016年9月号ミニ特集参照)。

私が発表したセッションでは、イトカワ粒子中の硫化鉄表層の宇宙風化層の観察から宇宙風化による硫黄の喪失過程の発表、「はやぶさ2」の近赤外分光計チームメンバーによる小惑星リュウグウに対する観測計画や関連する観測・実験室実験結果についての発表、中国による新たな小惑星探査計画に関する発表などがあり、小惑星サンプルリターン探査の成果と、それに対する関心と期待を感じられました。その他の



セッションでは隕石・宇宙塵・帰還試料の分析研究だけに留まらず、初期太陽系における物質進化モデルなどの最新の研究成果発表もあり、大いに刺激を受けました。また、学会期間中は普段お会いできない先生方と共にロシア料理を楽しんで親交を深める事が出来ました(写真1)。

さて、今回の学会はモスクワの中心(赤の広場)から南西に数km離れた、モスクワ川のほとりに立つロシア科学アカデミー本部ビルで行われました。建物(写真2)はソビエト時代に計画され、建設が始まったのがソビエト崩壊直前、完成がロシア連邦成立後という歴史の転換点に造営されたものです。建物のてっぺん全体に金色の複雑なオブジェが象られていて、Golden Brain(金色の頭脳)と呼ばれているそうです。この科学アカデミーより更に少し郊外に向かったところに、今年のサッカーW杯の決勝が行われたルジニキスタジアムがあります。学会が行われたのが、決勝が行われた丁度1週間後で、まだその興奮が残滓がそこそこに見られました(写真3)。そのW杯を現地で見物に来た日本人の間でも言われていたようですが、私の印象でもモスクワは想像していたより安全で、交通などのインフラもよく整備されて機能していました。交通網については、私のホテルから会場までは毎日バスで通っていたのですが、磁気カード1枚で地下鉄・バスを乗り継ぐことが出来るなど市街地の移動には不便を感じませんでした。治安に関しては、国内外に紛争の火種を抱え、その結果としてテロ対策が行き届いているのが総じて犯罪率を下げている感があり、例えば、学会会場のロシア科学アカデミー本部に入る為にも手荷物検査・金属探知ゲートをくぐる必要があり、同様のシステムが地下鉄の入り口でも運用されていました。4年前のソチ冬季オリンピック、今年のサッカーW杯と世界の耳目を集めるイベントが立て続けに行われ、国家の威信をかけて治安対策・交通網の整備を行った結果なのかも知れません。

帰りの飛行機は7月27日。丁度、皆既月食と大接近した火星(矢印の先をじっくり見てください)を同時に見られる当日で、ロシアのタイガの上空で天体ショーを楽しみました(写真4)。旅の最後に素晴らしい贈り物もらった気分でした。



ISASニュース No.451 2018年10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

再使用ロケット、「はやぶさ2」、MMOとISASの熱い日々は続きます。地震や豪雨、台風といった自然の力には畏怖を感じざるを得ませんが、ISASの挑戦は、その自然に対するあこがれ、好奇心に突き動かされています。(戸田 知朗)

*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

