ISSN 0285-2861

ISASニュース

JAXA宇宙科学研究所

2018
2
No.443

相模原キャンパスを舞う「ひさき」

2月2日にオープンしたJAXA相模原キャンパス宇宙科学探査交流棟で、惑星分光観測衛星「ひさき」の実物大モデルが、地球周回軌道から惑星を観測している最中の姿をイメージして展示されています。小型科学衛星の範疇ではありますが、宇宙を翔んでいる姿を至近距離から眺める景色は壮観です。「ひさき」チームはこの衛星を利用した惑星観測を進めてきました。その研究成果をここに紹介いたします。

宇宙科学最前線・「ひさき」特集

1．巻頭言

山﨑 敦（ISAS 助教）

私たちの地球は、数多く発見されている惑星系のなかでどの程度普遍的な存在なのでしょうか？

ご存じのとおり太陽系には８つの惑星が存在しています。そのうち地球型惑星と称される惑星は４つ、その中で惑星表面に水が液体で存在しうる領域であるハビタブルゾーンに、安定して滞在できたと考えられている惑星が私たちの地球です。中心星たる太陽は、銀河系で主流の主系列星の一つで、最大の惑星である木星の約 10 倍の大きさです。昨年の今頃「Earth's seven sisters」※1と銘を打った宇宙科学ニュースが駆け巡りました。太陽系から約 39 光年離れた恒星「トラピスト１（TRAPPIST-1）」を公転する、地球に非常によく似た岩石惑星が発見されたのです。しかも７つ。ハビタブルゾーン内の惑星が３つもあります。生命環境の成立性確認に向けた、大気や液体の水の存在を確かめる観測が続くはずで、地球外生命・文明社会の存在への期待が高まっています。中心星のトラピスト１は太陽の約 10 分の１、木星サイズの小さな赤色矮星で、各惑星との距離が非常に近く、太陽系より木星の衛星系に似ていて、太陽系とはかなり異なる世界のようです。私たち「ひさき」チームは太陽系の惑星環境の現在を観測的に明らかにすることから地球の普遍性・特殊性を探ることを始めています。

太陽系内は太陽風と呼ばれる太陽から噴き出す荷電粒子（プラズマ）の流れで満たされ、惑星環境と物質・エネルギーのやりとり（相互作用）をしています。太陽風は電気と磁気を帯びているので、惑星の固有磁場の強度によって相互作用の影響力が変わってきます。固有磁場の弱い金星や火星の環境では、熱圏と呼ばれる大気圏の中でも外側に位置する領域で、太陽風が直接惑星大気と接触し、大気を宇宙空間に剥ぎ取る大気散逸という現象が引き起こされます。固有磁場が太陽系惑星最強の木星環境では、木星固有磁場の勢力範囲（磁気圏）内に入り込む太陽風の物質・エネルギーは最小限にとどまり、自立する磁気圏であると考えられてきました。現在の惑星環境を決定づけるのは、こうした固有磁場強度に依存する相互作用の、惑星誕生から現在までの積み重ねです。継続した連続観測により太陽風と惑星環境の相互作用が変化する条件を明らかにすることが、冒頭の命題をひも解くことにつながると考えています。

このような問題意識をもって私たちは惑星分光観測衛星「ひさき」を開発しました（1－図 1）。太陽系惑星の環境の維持と進化の理解を目標とした、惑星観測専用宇宙望遠鏡です。同一機器で木星・金星など複数の惑星を観測できること、長期間継続観測できることをコンセプトとする地球周回の小型科学衛星です（1－表 1）。開発着手から初観測まで５年という短期間でしたが、お陰さまでタイムリーに科学観測を開始することができまし

1-図1 「ひさき」望遠鏡部。写真は主要機器の極端紫外線分光器と視野ガイドカメラです。黄色線は、観測する光の通り道を示しています。上部から入り主鏡で集められた光はスリット部で2つに分かれ、透過光は極端紫外分光装置へ、反射光は視野ガイドカメラへ導入されます。

た。特に木星探査機ジュノーが木星に到着するまで太陽風を観測していた期間に「ひさき」が木星観測の成果を上げたことは、ジュノーチームの科学者にも評価され、現在も継続する国際研究グループを作る礎となっています。ちなみにジュノーは打上げ後木星到着までに5年という歳月が必要でした。

「ひさき」には、主要観測機器である極端紫外線分光撮像装置（EXCEED）※2, 3, 4と、惑星を高精度に追尾するための機能を持った視野ガイドカメラ（FOV）※5、そして将来の技術実証実験として次世代電源系要素技術実証システム（NESSIE）※6が搭載されています。FOVの取得データをもとに衛星の姿勢制御システムでリアルタイムに“手ブレ補正”を実施し、EXCEEDで惑星からの極端紫外放射を検出する衛星です。最大の特徴は、極端紫外のスペクトルを測定することと惑星観測専用であることです。極端紫外は、金星・火星の熱圏の大気や木星・土星の磁気圏のプラズマの分布とエネルギーを特定することを目的とする惑星環境測定にはとても重要な、酸素や炭素、硫黄などの発光輝線がふくまれる波長領域のひとつです。それにもかかわらず、これまでの宇宙科学の歴史のなかで極端紫外スペクトル観測は数例しかありません。「ひさき」は、この波長領域の観測機器としては世界最高の波長分解能と感度を有し、これまでにない時間分解能で太陽風と惑星環境との相互作用を観測します。また、惑星観測に特化したことで、継続した観測時間を確保することができます。いつ発生するか予測のつかない自然現象を観測するためには不可欠な要素です。さらに、宇宙空間では天候に左右されないことが、地上観測にはない強力な武器となります。私たち太陽系科学者にとって、のどから手が出るほど欲する観測衛星となりました。ただし、惑星観測に特化したことで、惑星公転面（黄道面）から視野を外すことはできません。ここは他の宇宙望遠鏡とは異なるところです。

早いものでイプシロンロケット試験機（1号機）で打ち上げられた衛星が「ひさき」と命名されてから4年が経ちました。現在まで無事に観測運用が継続され、観測成果をISASニュース特集号として紹介できることを光栄に思います。この場を借りて関係各所のご協力に改めて御礼申し上げます。後に続く12編の成果報告＋コラムを楽しんでいただけましたら幸甚です。

1-表1「ひさき」諸元※2

国際標識番号		2013-049A
打上げ情報	日時	2013年9月14日14時00分（日本時間）
	射場	JAXA内之浦宇宙空間観測所
	ロケット	イプシロンロケット試験機（1号機）
衛星情報	質量	348 kg
	寸法	高さ約4m×奥行き約1m×長さ約7m（太陽電池パドル展開時の両翼端）
軌道情報	投入軌道	高度近地点947 km, 遠地点1,157 km
	傾斜角	29.7度
	周期	106分
極端紫外線分光器（EXCEED）	観測波長	52-148nm
	波長分解能	0.4-1.0nm（使用スリット依存）
	視野角	360秒角
	角度分解能	10秒角

2.「ひさき」が明らかにした木星磁気圏の動的描像

土屋 史紀（東北大学 助教）

太陽系の惑星磁気圏は、地球に代表される「太陽風駆動型」と木星に代表される「自転駆動型」に大別できます。惑星周囲のプラズマが惑星の自転と同じ方向に回転している領域は、地球の磁気圏では地球半径のおよそ4倍程度より内側に限定されており、その外側では太陽風が駆動するプラズマ対流が発達しています。一方、木星では、この領域は磁気圏の広範囲に及び、磁気圏境界面付近（木星半径の50～100倍）にまで広がっています。パイオニア10号から始まった6回のフライバイ観測、ガリレオ探査機の周回観測、地球からの電波・光学観測から得られた知見から、磁気圏に自転駆動型の特徴を与える原因は、強い固有磁場と速い自転速度に加え、磁気圏内部の赤道面に衛星イオという定常的なプラズマ源が存在することだと考えられています。一方で、放射線帯や強いオーロラ現象など、多くの惑星磁気圏で共通に存在する領域・現象があります。惑星大気上層の電離圏と広大な空間構造をもつ磁気圏は磁力線によって結ばれており、磁力線に沿って流れる「結合電流」による電磁力を介したエネルギーの輸送は、双方のタイプの磁気圏で重要な役割を果たしていると考えられています。

「ひさき」は、時々刻々と変化する惑星電離圏・磁気圏の姿を連続観測により明らかにすることを目的として開発が進められました。「ひさき」に搭載された極端紫外線分光撮像装置（EXCEED）で捉えた木星磁気圏の様相は、我々の期待を裏切らないものでした。イオ起源のプラズマが蓄積されることによる磁気圏の不安定化が突発的に発生し、そこで解放されたエネルギーは外部磁気圏から内部磁気圏にわたる広範囲に急速に分配されること［記事3、6］、イオの火山活動の活発化［記事7］によって、エネルギーの分配過程が活発化することが観測により同定され［記事3、10］、衛星起源のプラズマが磁気圏を特徴づけていることが明らかになりました（2-図1）。太陽風が自転駆動型の磁気圏に及ぼす影響［記事8、9］と、木星磁気圏の結合電流の特徴［記事10］についても新しい知見が得られまし

1-※1 I. A. G. Snellen, *Nature*, **542**, 421-423, doi:10.1038/542421a (2017).
1-※2 「ひさき」プロジェクトサイト (http://www.isas.jaxa.jp/home/sprint-a/)
1-※3 K. Yoshioka et al., *Planet. Space Sci.*, **85**, 250-260, doi:10.1016/j.pss.2013.06.021 (2013).
1-※4 I. Yoshikawa et al., *Space Sci. Rev.*, **184**, 237-258, doi:10.1007/s11214-014-0077-z (2014).
1-※5 A. Yamazaki et al., *Space Sci. Rev.*, **184**, 259-274, doi:10.1007/s11214-014-0106-y (2014).
1-※6 A. Kukita et al., Proceeding of 33rd ISAS Space Energy Symposium (2014).

た。地球では主役を担っていない物理過程が木星では重要な役割を果たしていることが明らかになってきており、木星磁気圏の観測結果が地球の研究に演繹されることが予感されます。変動する惑星の姿を捉えるモニタリング観測の重要性は、国内外で提案され実現が熱望されていたものでした。本号に掲載された成果は、「ひさき」が太陽系惑星の「モニタリングプラットフォーム」として設計され、長期連続観測を実行できたことによるものと言ってよいでしょう。

2-図1　イオから流出したプラズマに満たされた木星磁気圏。磁気圏に蓄積されたエネルギーが解放され、明るいオーロラを引き起こします。※1

コラム❶　「きょくたん」誕生秘話

吉岡 和夫（東京大学 講師）

「ひさき」は“極端紫外”という一般にはあまり耳慣れない波長帯の光を使って惑星を観測しています。いわゆるお肌の大敵である“紫外線”よりも波長は短く、レントゲン撮影に使われるX線よりは波長が長い、微妙な領域の光です。そんなマイナーな存在の極端紫外光を少しでも身近に感じていただくという使命を抱いて（？）誕生したのが、「ひさき」のゆるキャラ（非公認）の「きょくたん」です。もともとはプロジェクト室のホワイトボードの落書きからうまれたキャラクターですが、「きょくたん」を通して少しでも「きょくたん紫外」について皆さんに興味を持っていただけたら幸いです。

ホワイトボードに描かれた誕生初期の「きょくたん」

3．イオの火山爆発とイオプラズマトーラス、オーロラの関係

吉川 一朗（東京大学 教授）

約15年前、土星探査機カッシーニが木星の近傍を通過しました。このときの観測から、イオプラズマトーラスと木星の極に現れるオーロラは、ある時間差をもちながら突然明るさを増すことが知られるようになりました。3-図1の横軸は1999年10月からの通算日を示しており、縦軸はEUV波長領域で測定したオーロラとトーラスの発光強度を表しています。この当時から、両者に見える突発的な増光の時間差の示唆する物理プロセスが議論となっていました。「ひさき」の解決すべき課題の一つです。

これに対し、2013年末から木星の観測を開始した「ひさき」でしたが、当初の観測データを見たチーム内には一抹の不安が残っていました。我々は、イオプラズマトーラスとオーロラの増光の時間差を測った成果（Yoshikawa et al., 2015, GRL）を発表してきましたが、どちらの発光強度もカッシーニで観測した明るさよりも非常に小さかったのです（例えば、3-図2の横軸25よりも左側）。我々の観測に何らかの見落としがあり、本来は見えるべきものが見えづらくなっているのではないか？

2014年の年末、2回目の木星観測キャンペーンが始まりました。3-図2の横軸（X軸）は経過日数、縦軸が（上段）イオプラズマトーラスのイオン種ごとの発光強度、（中段2枚）木星の北極のオーロラ強度（示しているデータは同じものですが縦軸のスケールが異なります）、木星に到達したと予想される太陽風の動圧（地球周回衛星による観測からの推測）を表しています。X<20の日時では、オーロラとイオプラズマトーラスは確かに増光しています（青▽で示した部分）が、カッシーニのとらえた（3-図1）のようなはっきりとした明るさの変化はありません。しかし、2015年1月10日を過ぎたころ、だんだんとイオプラズマトーラスの明るさが増していくことに気づき始めました。当時は、これが自然現象であるとは断言しきれず、前述したとおり潜在的に何か問題を抱えているのではないかという不安な心境も重なり、「大きな不具合が表面化し始めた」と覚悟を決めたこともありました。1月30日には、この明るさの増加ははっきりとしたものになりました。しかし同時に、硫黄一、二価イオンの明るさだけが増していることが分かり、「ひさき」の観測装置の原理を考慮に入れると、これが機器の不具合や人工的なものとは考えられず、本物の自然現象を捉えていると信じるようになりました。2月に入り、ハワイの地上望遠鏡がイオ火山の爆発を捉えていたという報告を受け、2015年1月10日前後から始まった緩やかな明るさの増加は火山活動によるものだと私たちは確信するに至りました。

3月に入り（X>30）、驚くことが起こりました。オーロラとプラズマトーラスに起こる突発的な増光がはっきりと見えるようになったのです。つまり、3-図1に示したカッシーニの観測のように、両者の増光がはっきりとしてきたのです。最近まで注目されてはいませんでしたが、カッシーニによる観測の開始前に火山の爆発が衛星イオで起きたという証拠があります。3-図1の黒線に見られる明るさの減少は火山爆発が収まりつつある期間を表しているそうです。つまり、木星のオーロラとイオプラズマトーラスのはっきりとした増光を見るためには、その前に火山爆発が起きていることがひとつの条件になっていたのです。ここまでで、「ひさき」が正常な観測を続けていると我々は確信ができましたし、地上観測によるイオプラズマトーラスの情報も集まり、いよいよ物理プロセスの解釈に進むことができました。ここまでに得られた情報を総合すると、（1）カッシーニが捉えた明るさの増加は、Tvashtar火山の噴火が原因であるのに対し、2015年に「ひさき」が捉えた増加はKurdalagon火山の噴火が原因である。（2）火山噴火後5日を経過しないうちに、硫黄一価イオンによる明るさが最初に増え始め、ほぼ同時に硫黄三価イオンによる明るさが減少し始める。（3）3～6日経過し、硫黄二価イオンによる明るさが増え、数カ月後には元の明るさに戻る。（4）イオプラズマトーラスの明るさが増し始めてから30日を経過した頃から、突発的なオーロラの増光は（頻度はそれほど変わらないが）はっきりと見え始める。つまり、火山噴火の影響は1～2カ月を経過したのちにオーロラの明るさに影響を及ぼし始める。これはイオプ

2-※1　理化学研究所プレスリリース　(http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170523_1/) を改編

3-図1　カッシーニが極端紫外光領域で観測したイオプラズマトーラス（黒）と木星の極に現れるオーロラの（赤）の明るさの変化。X軸は1999年からの経過日数を表し、Y軸は発光強度を表しています（単位はTW）。赤線にも黒線にも突発的に明るくなる瞬間があることが分かります。

3-図2　「ひさき」の観測したイオプラズマトーラスの明るさ（上段：単位はGW）、木星の北極オーロラの明るさ（中段2枚：単位はGW）と木星に到達したと予想される太陽風の動圧（単位はnPa）。△印（上段図）や○印（中段図）の日時に突発的な増光が見られます。

ラズマトーラスが5日以内に反応することとは対照的である。

現在は、上記の変化時間に、原子・イオンの衝突断面積を考慮して、イオプラズマトーラス内の密度や温度に関する数値モデルが構築できると期待しています。イオの火山噴火が、その周囲のイオン組成に影響を及ぼすことは容易に想像できますが、反太陽方向に何十木星半径も離れた領域にも影響を及ぼすことは非常に興味深いことです。

オーロラとプラズマトーラスの増光の時間差ですが、おおよそ 10 ～ 13 時間くらいであることが分かってきました。この時間差は現在も計測中です。オーロラを引き起こす高エネルギー電子の源がどこで発生するかは仮定をしなければなりませんが、この時間差は木星の内部磁気圏には内向きにゆっくりした（10 ～ 50 km/sec）高温電子の流れが存在していることを示唆しています。

4．木星周辺の環境をスペクトルで解明する

吉岡 和夫（東京大学 講師）

木星の数ある衛星の中でも、“ イオ ” は激しい火山をもつことで知られています。硫黄酸化物をはじめとする大量の火山噴出物は、イオの重力圏から脱出して宇宙空間に到達します。さらにこれらは硫黄と酸素に分解され、周囲のプラズマとの衝突や紫外線照射を経てイオン化し、高速で回転する木星の磁力線に捕まります。こうして出来たイオンや電子が、イオの軌道（5.91 木星半径）に沿ってドーナツ状に木星を取り囲んだものを “ イオプラズマトーラス ” と呼びます。

イオの軌道は、木星の強力な磁場が支配する “ 内部磁気圏 ” と呼ばれる領域にあり、そのすぐ内側には相対論的エネルギー（～ 50MeV）の電子を多く有する放射線帯や、その外側には木星の大規模なオーロラを輝かせるための高速電子（数 keV）を供給する “ 中間磁気圏領域 ” が隣接しています。このように派手な領域に挟まれたイオプラズマトーラスを構成するイオンや電子は、どのような振る舞いをしているのでしょうか。その謎は光を使うことで読み解けます。

イオンや原子は、陽子と中性子からなる “ 核 ” と、それをとりまく複数の電子で構成されています。通常はどの電子もある決められた軌道をとり、エネルギー的に安定した状態（基底状態）にあります。しかし太陽光に照射されたり、他の粒子と衝突したりすることで、ほんの一瞬だけ “ エネルギー状態 ” を上げることがあります（励起状態）。プラズマで満たされたイオプラズマトーラスにおいては、イオンと電子の衝突が主要な励起要因です。

イオンや原子は、それぞれ決められたエネルギー状態をいくつか持っています。電子と衝突したときに、どのエネルギー状態にどの程度の確率で遷移するかは、励起させる側である周囲の電子の温度や密度によって決まります。さらに、これらの励起状態は一瞬しか保てず、すぐに基底状態に戻ります。このとき、励起状態と基底状態の間の差分のエネルギーは光（輝線）という形で放出されます（発光）。この輝線が木星内部磁気圏を探るための重要な指標なのです。

ここでの鍵は、イオンが複数の波長（エネルギー）の輝線を同時に放射するということです。繰り返しますが、イオンがとり得るエネルギー状態は複数あるため、基底状態と比べたエネルギー差（輝線の波長に相当）にも複数の種類があるためです。イオプラズマトーラスから放射されるこれらの輝線の明るさは、「ひさき」に搭載されているような分光器を使えばそれぞれ別々に導出できます。このように、ある光源が放つ光を波長ごとに分け

4-図1　「ひさき」が取得したイオプラズマトーラスのスペクトル（黒）と、イオン組成・密度、電子温度を仮定して計算したモデルスペクトル（赤）※1。

4-※1　K. Yoshioka et al., *J. Geophys. Res.*, **122**, 2999-3012, doi:10.1002/2016JA023691 (2017).

て強度分布に変換したものをスペクトルと呼びます。

なお、周囲の電子温度に対するそれぞれの輝線の光りやすさ（遷移確率、滞在時間等で決まる）は量子力学的な観点から長年研究されており、原子・イオンごとにデータが蓄積されています。このデータベースとスペクトルデータを使えば、衝突電子の温度分布や密度を導出できるのです。この手法はスペクトル診断とよばれ、空間構造の把握に長けた光学観測を通して、電子やイオンの温度・密度を導出できるというメリットがあります。

イオプラズマトーラスを構成する硫黄イオンや酸素イオンは、波長 50 ～ 150nm の極端紫外領域に多くの輝線を持つため、「ひさき」は遠隔的にイオプラズマトーラスの電子温度を導出するために最適な観測装置といえます。

4－図 1 は、実際に「ひさき」が取得したイオプラズマトーラスのスペクトル（黒）に、あるイオン組成・密度、電子温度を仮定して計算したモデルスペクトル（赤）を重ねたものです。このように、スペクトル診断手法を用いることで、「ひさき」は地球周回軌道から木星周辺の電子温度やイオン組成を導出することに成功しています。詳しくは文献※1をご参照ください。

5．衛星イオからの大気流出に伴う電子加熱

土屋 史紀（東北大学 助教）

衛星イオは、太陽系で最も活発な火山活動をもつ天体です。イオの大気は二酸化硫黄を主成分とする火山性ガスから成り、宇宙空間へ流出したのち電離し、イオの公転軌道に沿ってプラズマの濃いドーナツ状の領域（プラズマトーラス）を形成します。惑星や衛星の大気から宇宙空間への散逸過程の一つにイオンピックアップ過程があり、原子・分子が電離し、電磁場による力を受けて宇宙空間へ散逸します。プラズマトーラスの電子温度は 5 万 K 程度の高温状態が維持されており、これが効率的な電子衝突電離と大気散逸の要因だと考えられています。「ひさき」の打上げ前は、プラズマトーラスの電子が高温に維持される機構が未解明問題として残っていました。高温の電子の衝突励起によりイオンは極端紫外領域で発光するため、極端紫外の分光撮像装置を搭載した「ひさき」により、高温状態の維持機構を研究することができます。「ひさき」が硫黄イオンの発光を観測した結果、イオの下流で極端紫外線が強く光ることが明らかになりました※1, 2。発光はイオの場所で急に上昇し、イオの近傍で電子の加熱が急速に発生していることがわかります（5－図 1）。加熱量を推定した結果、イオ近傍での加熱だけで、プラズマトーラス全体の加熱の 2 割程度を担うことが明らかになりました。加熱された電子は、極端紫外領域での放射冷却によってエネルギーを失い、硫黄イオンの発光強度はイオから下流側に離れるにつれて低下していきます。電子加熱のエネルギー源は、中性ガスが電離することにより発生するイオンの運動エネルギーであると考えられています。イオからの中性ガスの流出量は毎秒約 1 トンに達し、電離によって 1-2 TW ものエネルギーがプラズマトーラスに注入されます。これまでの知見では、電離により生じた数 100eV のピックアップイオンと電子とのクーロン衝突により、10 日程度の時間スケールで電子が加熱されると考えられていました。一方、「ひさき」の観測結果は、10 時間より短い時間で高温電子が発生することを示しており、イオの周囲では、効率的な電子の加熱機構が働いていることが明らかになりました。電子加熱機構の候補としては、ピックアップイオンから励起される電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波による加熱が考えられています。高温のイオンから電子へのエネルギー輸送現象は、宇宙空間の至る所で見られ、EMIC 波のようなプラズマ波動の介在が重要な役割を果たしていると考えられています。ジオスペース探査衛星「あらせ」による地球の内部磁気圏での電子加熱の観測、木星氷衛星探査計画 JUICE によるエウロパ・ガニメデからの大気散逸に伴う EMIC 波の観測※3, 4を通して、プラズマ波動が介在した電子加熱について理解を深めていきたいと考えています。

5－図 1　（左）木星の北から見た、発光強度の空間分布の模式図。プラズマトーラス（青）は木星の自転（約 10 時間）と同じ角速度で回転しており、プラズマが常に衛星イオ（公転周期約 42 時間）に吹き付けている。（右）「ひさき」により観測された、衛星イオの軌道に沿った二価の硫黄イオン発光強度の空間分布。イオの下流側で発光強度が増大していることが分かる。

6．「ひさき」がリードした国際・学際連携木星観測

木村 智樹（理化学研究所 研究員）

「ひさき」の最大の強みの 1 つに「惑星専用」である点が挙げられます。ハッブル宇宙望遠鏡などの、汎用の大型宇宙望遠鏡では、なるべく多くの対象を観測する必要があります。研究者は、競争率の非常に激しい観測提案審査を突破しても、年間で数回撮像するチャンスを得られれば良い方です。一方「ひさき」は、特定の惑星を、長期間切れ目なく観測できます。宇宙空間で、同じ天体を、ただひたすらじっと観測し続ける。「連続監視」ができるわけです。一見地味ですが、実は、「ひさき」によって世界で初めて実現できた、非常に新しい惑星観測手法なのです。

この独自性は、他の宇宙望遠鏡等との連携観測で、大きな役割を果たし国際・学際連携を

6－図 1　「ひさき」と連携した宇宙望遠鏡群（©JAXA, NASA, ESA, Jon Spencer）。

5－※1　F. Tsuchiya et al., *J. Geophys. Res.*, **120**, 10,317–10,333, doi:10.1002/2015JA021420 (2015).
5－※2　東北大学ウェブサイト (http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2016/05/award20160512-01.html)
5－※3　笠羽康正 他 , 日本惑星科学会誌 , **25**, 3, 96-107 (2016).
5－※4　Y. Katoh et al., in Planetary Radio Emissions VIII, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 495-504 (2017).

リードしてきました（6－図1）。最初の成果は2014年初頭でした。当時JAXAの研究員だった筆者、サラ・バッドマン博士、垰 千尋博士らが協力して提案し、「ひさき」とハッブルで木星を2週間に渡って、同時に観測する時間を獲得しました。ハッブルとしては異例の長期観測です。

この観測では、「ひさき」で木星オーロラの時間変動を監視し、ハッブルの世界最高解像度の撮像によりその構造を測定することで、時間変動と空間構造を網羅した観測を目指しました。これにより、オーロラと磁場を介して結合している、木星周辺の広大な宇宙空間におけるエネルギーの解放・輸送過程を解明するのが狙いです。

観測期間中、「ひさき」は、木星のオーロラが突然、数時間に渡って爆発的に増光していることを発見しました。今までの観測頻度では検出できなかった急速な変動を、「ひさき」が初めて捉えたのです。運良く、ハッブルの撮像が、増光時のオーロラの構造を捉えました。これにより、世界で初めて時間的・空間的特徴を網羅したオーロラ観測が、狙い通り成立したのです。

これらの観測から我々は、木星では、地球とは異なり、自転や磁場のエネルギーがオーロラを自励的に増光させる、新しい仕組みがあることを示しました。この成果は、JAXAや欧州の大学との共同プレスリリースで発表され、米国地球物理学会レターの表紙を飾りました※1。

次に仕掛けたのは、X線天文分野の望遠鏡との協働です。あまり惑星を観測してこなかったX線望遠鏡を、「ひさき」と同時に木星に向けることで、様々な情報を得ます。この同時観測を行うために、筆者は日米欧の天文学者らと協力して、チャンドラX線宇宙望遠鏡をはじめとする、世界のX線望遠鏡へ提案を行い、2014年4月に観測が実施されました。

「ひさき」が監視する木星オーロラは、太陽からの高速なプラズマ流「太陽風」の日々の変動と良く相関するため、太陽風変動の指標となります。チャンドラ等が観測するX線のオーロラは、数千億度の温度に相当する、太陽系で最高エネルギーのプラズマから放射されます。これらの観測から、最高エネルギーのプラズマ加速と、太陽風の関連を調査することが目的です。

観測の結果、「ひさき」のオーロラの日々変動と、太陽風のシミュレーションを組み合わせることにより、太陽風擾乱の木星への到達時刻を高精度に導出できました。また、チャンドラ等によるX線オーロラの日々変動の観測から、X線オーロラと太陽風の変動が相関していることが分かりました。これにより、最高エネルギーのプラズマ加速は、太陽風の変動と木星磁場の相互作用がエネルギー源となって、駆動されることを発見しました。この成果は、JAXAや欧州の大学との共同プレスリリースで発表され、米国地球物理学会誌の表紙を飾りました※2。

6－図2 「ひさき」、ハッブル、ジュノーの連携で捉えた木星オーロラの爆発的増光※4。

我々は今、2016年7月から木星周回を開始しているジュノーとの連携に取り組んでいます。ジュノーが木星に到着する以前から、筆者はジュノープロジェクトと直接交渉を重ね、「ひさき」やハッブルとの協力観測体制を整えてきました。遠隔観測だけで同定してきた、木星のエネルギー解放・輸送過程の正体を、ジュノーのその場観測で決定づけるのが狙いです。

2016年5月、「ひさき」とハッブルにより、オーロラの突発増光の開始時間を、正確に捉えることに成功しました（6－図2）。この開始時間の直前、ジュノーのその場観測から、太陽風の衝撃波が木星に到来していることが判明しました。このことから、木星の自転や磁場以外にも、太陽風が磁気圏にエネルギーを供給していることが示されました。以上から、突発増光の源となる、磁気圏のエネルギーの蓄積・解放・輸送過程を絞り込むことに成功しました。この結果は、米国地球物理学会レターのジュノー特集号に掲載されました※3。

現在ジュノーは、極域のオーロラ上空すれすれを飛ぶ周回軌道に入っています。今まで私たち研究者が想像もしなかったオーロラ発生の仕組みが、次々と明らかになっています。

「ひさき」が発見したオーロラの背景にある、エネルギー解放・輸送過程が、ジュノーの観測により決定的になるかもしれません。筆者たちは、ジュノーの研究メンバーと協力しつつ、そのゴールに向かって研究しています。今後とも、「ひさき」がリードする国際・学際連携にご注目ください。

7．火山活動に伴う衛星イオ大気の変動

古賀 亮一（東北大学 博士課程1年）

木星の衛星イオは太陽系で最も火山活動が活発な天体です。イオの表面には多数の火口や溶岩が存在していることが知られています（7－図1※1）。火口からの噴出物や、火山噴出物が降り積もってできた硫黄酸化物の霜が太陽光や溶岩によって昇華した物質が希薄な大気を形成し、やがてイオの重力圏を脱出していきます。イオから流出するガスは毎秒1トンに及び、木星磁気圏内のプラズマの質量の9割を担う主要なプラズマ源となっています。イオからの大気の流出過程を明らかにすることは、木星磁気圏への影響を理解するうえでも重要な研究課題となっています。

イオの希薄な大気は主に二酸化硫黄などの硫黄酸化物およびその解離により生成された酸素や硫黄原子で構成され、塩化ナトリウムを微量に含んでいます。これまでは火山活動による希薄な大気の変動はイオ起源の塩化ナトリウムが解離してできたナトリウム原子の発光を地上観測することで検出されてきました。主な理由としては次の2つが

6－※1 T. Kimura et al., *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1662–1668, doi:10.1002/2015GL063272 (2015).
6－※2 T. Kimura et al., *J. Geophys. Res.*, **121**, 2308–2320, doi:10.1002/2015JA021893 (2016).
6－※3 T. Kimura et al., *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 4523–4531, doi:10.1002/2017GL072912 (2017).
6－※4 理化学研究所プレスリリースより転載 (http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170523_1/)

コラム ❷ 「ひさき」の由来

村上 豪（ISAS 助教）

肝付町にある「火崎」からの景色

みなさんは「ひさき」の名前の由来をご存知でしょうか？　鹿児島県肝付町にある岬の「火崎（ひさき）」と、観測対象の惑星が「太陽（ひ）の先」であることが「ひさき」の由来です。火崎は、内之浦で一番最初に朝日が昇り、漁の安全を祈願する場所とされています。肝付町にとって新しい夜明けの象徴となってほしい、内之浦を旅立つ船（イプシロン）の安全な航行を祈りたい、との想いも込められています。当然ながら命名前にはプロジェクトメンバー有志で火崎へのお参りも忘れてはいません。うっそうと生い茂る身の丈ほどもある草木をかき分け、急斜面の道を抜けるとようやく火崎へとたどり着きます。そこには目印としてそびえ立つ灯台と御崎神社が隣り合って並んでいます。その後の「ひさき」の活躍からお分かりの通り、御利益はお墨付きです。内之浦へお越しの際は新名所、火崎への御参りはいかがでしょうか？（安全にはくれぐれもお気をつけください。）

7-図１　Voyager １で撮影されたイオ表面とLokiの噴火の様子（image credit: NASA/JPL/USGS）。

挙げられます。１つ目は火山活動を示すイオからの赤外放射量とナトリウム原子の発光量に相関が報告されていることです。２つ目は酸素や硫黄の原子の発光は暗いのに対し、ナトリウム原子は可視光の 589.0 nm, 589.6 nm における共鳴散乱断面積が大きく、とても明るく発光するため、天候さえよければ地上から長期間連続観測することが可能だからです。しかし、ナトリウム原子は微量成分であり、これだけでイオの希薄な大気を十分に調査したということにはなりません。希薄な大気の大部分を占める酸素原子の振る舞いについてはこれまで知られていませんでした。

私たちは「ひさき」を用いて、130.4 nm の紫外波長でイオ周辺（イオを中心として木星半径程度の範囲）の酸素原子発光強度の変動を解析しました。地球の周りに広がるジオコロナには酸素原子が含まれており、太陽光の共鳴散乱により同じ波長で発光するため、イオ周辺の酸素原子発光の変動を観測する上で大きな妨げとなっていました。しかし、私たちは「ひさき」が地球の影を飛翔し太陽光の影響がないときのデータのみを用いて解析することで、暗いイオ起源の酸素原子発光のみを抽出することに成功しました。その上で、私たちは酸素原子発光の変動と同時期に観測されたナトリウム発光やイオ表面の赤外放射量の変動を比較しました。

7-図２は 2014 年 11 月下旬から 2015 年５月上旬に「ひさき」によって観測されたイオ周辺の酸素原子発光の変動（7-図２上※2）と、同時期に地上観測されたイオ起源のナトリウム発光の変動（7-図２下※3）を表しています。酸素原子の発光がナトリウム発光から推定される火山活動静穏時（11 月～１月）と比べて、活発な時（２月）は２倍以上明るくなったことが分かります。これはイオ周辺の酸素原子量が増大していることを示しています。これまで、イオの大気形成に対する火山活動の直接的な寄与については明らかになっていませんでしたが、その観測的な証拠が初めて得られました。また両者の発光を比較したとき、酸素原子発光のピークが平穏時の明るさに戻るまでの期間は、ナトリウムのものと比べて長いことがわかります。この原因を火山活動による供給量の差として理解すると、二酸化硫黄と塩化ナトリウムの昇華温度の違いで説明することができます。塩化ナトリウムは昇華温度が高いため、高温の火口からの噴出が静まるとすぐに供給量が減ります。一方、硫黄酸化物は昇華温度が低いため、高温の火口の噴出物のみならず、より低温の溶岩によるイオ表面の昇華によって、供給が持続すると解釈できます。

また、赤外放射量（3.8 μm）の観測によって「ひさき」の観測期間中の 2015 年１月下旬と４月上旬にそれぞれイオの Kurdalagon Patera とよばれる火山地帯において火山活動の増大が観測されました※4。１月のイベントは酸素およびナトリウム原子の発光の増大に対応します

7-図２　2014年11月～2015年５月の間に観測されたイオ周辺の酸素原子発光強度の変動（上※1）とイオ起源のナトリウム原子発光強度の変化（下※2）。横軸は2015年１月１日からの経過日を表している。

7-※1　NASA/JPL/USGS (https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/multimedia/pia00010.html)
7-※2　R. Koga et al., *Icarus*, **299**, 300–307, doi:10.1016/j.icarus.2017.07.024 (2017).
7-※3　M. Yoneda et al., *Icarus*, **261**, 31–33, doi:10.1016/j.icarus.2015.07.037 (2015).
7-※4　K. de Kleer and I. de Pater, *Icarus*, **280**, 378–404, doi:10.1016/j.icarus.2016.06.019 (2016).

が、４月のイベントでは対応する増大は見られませんでした。この違いは火山活動のイベントによってガスの放出を伴う場合と伴わない場合が存在することを示唆していますが、その原因はいまだに説明できていません。ガスの供給量と火山活動度の対応関係、及び硫黄酸化物と塩化ナトリウムの供給メカニズムの違いをより理解するために、今後も「ひさき」を使ってイオ起源の酸素原子発光のモニターを続けたいと思います。

８．太陽系最強の木星磁気圏にも侵入する太陽風の影響

村上 豪（ISAS 助教）

太陽系の惑星たちは常に秒速数 100 km に及ぶ太陽風にさらされ続けています。この太陽風に対して重要なのが惑星のもつ大規模磁場の存在です。惑星のもつ磁場は太陽風に対してバリアのような役割を果たす磁気圏を形成しています。地球は磁場のおかげで周囲に磁気圏を形成し太陽風の直撃を免れています。ただし、太陽風エネルギーの一部は磁気圏内に侵入しオーロラや放射線帯などを引き起こしています。一方、大規模な磁場をもたない火星や金星では太陽風の影響を直接受け、現在も大気の一部が宇宙空間へ吹き流され続けています。

木星は地球の約２万倍もの強い磁場をもっており、木星が作る磁気圏バリアは太陽系で最大・最強です。しかも地球に比べ太陽から遠いため、磁気圏の内部深くに守られている木星の近傍には太陽風の影響など及ぶはずがないと考えられてきました。一方で、太陽風の影響を示唆する観測事実もありました。それは衛星イオの火山ガス起因のプラズマ雲（イオプラズマトーラス）に現れます。トーラス中のプラズマの明るさは平均的に夕側で明るく、朝側で暗いという非対称性があることが知られていました（８－図１）※1。しかしその朝夕非対称性のメカニズムはこれまで観測的な証拠もなく未解明のままでした。

８－図１　「ひさき」が2014年１月１日に捉えた木星近傍のイオプラズマトーラスのスペクトル画像。木星の自転と共に木星の周りを回転している硫黄イオンの発光強度を示している。朝側に比べて夕側でより明るく光っている様子がはっきり捉えられている。

我々はイオプラズマトーラスで観測される朝夕非対称性は木星近傍に太陽風が何らかの影響を及ぼしているのではないかと考え、惑星分光観測衛星「ひさき」で継続的な観測を行いました。

８－図２（a）※1は「ひさき」が 2014 年１月に観測したイオプラズマトーラスにおける朝夕非対称性（朝側と夕側の明るさの比）の時間変化を示しています。この結果から我々は、平均的に夕側の方が明るいという既知の観測事実だけでなく、激しく時間変化しており時には突発的に夕側が朝側の 2.5 倍以上も明るくなる事実を見出しました。また８－図２（b）※1は地球近傍の衛星による観測結果から見積もられた木星での太陽風の強さ（動圧）の時間変化を示しています。８－図２（a）と（b）を比較すると、矢印で示されている通り今回「ひさき」により見出されたイオプラズマトーラスの朝夕非対称における突発的な変化が太陽風の変動に応答していることがわかります。すなわち、太陽風の影響は、太陽系最強のバリアである木星磁気圏の内部深くにまで及んでいるのです。この観測結果により、これまで考えられてきた「太陽風は木星磁気圏の内部に影響を及ぼさない」という定説を覆すことになります。この結果は米国地球物理学会レターに掲載されました※1。

８－図２　(a)「ひさき」が2014年１月に観測したイオプラズマトーラスにおける朝夕非対称性の時間変化と (b) 太陽風の強さ（動圧）の時間変化のグラフ。矢印および点線で、木星近傍に強い太陽風が到達するとイオプラズマトーラスが応答し朝夕非対称性が強まっている（夕側が朝側に比べて明るくなっている）時間帯を示す。

太陽風の影響が木星近傍まで侵入できるメカニズムとして、木星の外側（木星半径で 20 ～ 30 倍程度の距離）に流れる円盤状の電流が太陽風の影響を受け、その一部が木星の磁力線に沿って流れ込み、木星近傍にまで達する、という説があります。この仮説を検証するには、数値シミュレーションによる研究と木星近傍で得られるその場の観測データが必要です。研究チームは現在、2016 年７月に木星周回軌道に投入された NASA の木星探査機ジュノーと「ひさき」による同時観測を行い、ジュノーが観測する木星近傍での電流の変化と「ひさき」によるイオプラズマトーラスの時間変化を比較することでその因果関係を明らかにすべく、海外の研究者らと協力して準備を進めています。

９．統計解析から見えてきた木星オーロラと太陽風の新たな関係

北 元（東北大学 研究員）

これまでのハッブル宇宙望遠鏡や地上赤外観測により、木星のオーロラは太陽風動圧増大時に増光することが知られています。しかし、これらの観測は断片的だったためオーロラ変動の統計的描像は不明瞭でした。さらに、2014 年初旬の「ひさき」の観測により、必ずしも太陽風動圧の増大時に木星オーロラが増光するとは限らない、という可能性が示唆されました。そこで、「ひさき」の２年間のデータを用い、木星オーロラと太陽風の関係を統計的に解析しました※1。解析には「ひさき」で取得した紫外スペクトルデータを使用し（90 ～ 148nm・10 分の

８－※１　G. Murakami et al., *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 12,308-12,316, doi:10.1002/ 2016GL071675 (2016).

９－※１　H. Kita et al., *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 6790-6798, doi:10.1002/2016GL069481 (2016).

積分値)、太陽風のデータは地球近傍の観測データを元にした1次元MHDモデルを使用しています。9-図1は観測の一例で、木星紫外オーロラ強度(上)と太陽風動圧(下)の時間変化です。太陽風動圧が増大するタイミングで紫外オーロラの強度が増加していることがわかります。さらに、Day of year ～ 18 と Day of year ～ 26 付近に着目すると、太陽風動圧変化はほぼ同じですが、前者では紫外オーロラが反応し、後者は反応していないがわかります。

まずは、太陽風動圧の増大にオーロラの増大が対応するかを調べました。太陽風動圧がある閾値を超えたタイミングを基準として太陽風と紫外オーロラのデータを重ね合わせます。そうすることで、太陽風とオーロラの統計的な時間変動の様子が浮かび上がってきます。今回は5日以上太陽風が静穏な状態が続き、その後動圧が増大した9イベントを用いました。その結果、動圧が増大したタイミングでオーロラが明るくなることが統計的に示されました。この事実は、太陽風が5日以上の静穏であると、木星オーロラが増光することを意味しています。次に、オーロラの強度変化量と太陽風動圧の変化量、及び太陽風が静穏な時期の長さに着目し、相関関係を調べました。すると、太陽風静穏期の長さとオーロラの変化量の間に正の相関があることがわかりました。一方で、太陽風動圧の変化量とオーロラの相関関係は弱いことがわかりました(9-図2)。これらを総合すると、太陽風変動は木星オーロラの増大を「トリガー」しますが、どの程度明るくなるかについては太陽風が静穏な期間の長さに要因があることを示唆しています。

これらの統計解析は、「ひさき」の連続データによって初めて成し得たもので、木星オーロラと太陽風の新たな関係が明らかとなりました。この現象の解釈として、太陽風の静穏期が長いほどより多くのプラズマが磁気圏に蓄積されるためだと推察しています。木星の衛星イオは定常的にプラズマを磁気圏に供給しています。磁気圏内に蓄積されたプラズマが太陽風擾乱によって解放され極域に降込み、オーロラが発光するというのが可能性の一つです。他にも幾つかの可能性があり、今後の課題としてこの現象を説明できるプロセスを特定する必要があります。現在活躍中のジュノーや地上赤外観測などを通じ、オーロラと太陽風の関係を一つ一つ検証していくことが現象の解明につながると考えています。

9-図1 「ひさき」で観測された紫外オーロラの強度(上)と太陽風モデル(下)。太陽風動圧が高い時期を灰色でハッチしています。

9-図2 紫外オーロラ強度変化量と太陽風が静穏な時期の長さ(左)及び太陽風動圧の変化量(右)との相関関係を調べた結果。オーロラと静穏時期の長さの間には正の相関関係がみられますが、動圧の変化量との間には相関が弱いことがわかります。

10. 木星オーロラのスペクトル解析

垰 千尋(情報通信研究機構 研究員)

「ひさき」による長期継続観測から、数時間～数カ月のさまざまな時間スケールの木星オーロラ発光強度変動が捉えられました。オーロラを引き起こすオーロラ電子の流れは、木星から木星周辺の宇宙環境へとエネルギーおよび角運動量を輸送します。「ひさき」の発光スペクトルの解析から、オーロラ電子のエネルギーの変動の特徴が明らかになりました。

木星オーロラの電子エネルギーは、メタンによる紫外吸収効果が異なる波長帯の強度比(Color Ratio, CR)を指標として求められます。一般に用いられるCRの波長帯は123～130 nmと155～162 nmですが、後者は「ひさき」搭載EXCEED観測器の観測波長の範囲外です。そこで、観測器の波長特性を踏まえて、126.3～130 nmと138.5～144.8 nmを用いる、新しい強度比を導出しました。これを用い、観測された木星オーロラ発光変動時のオーロラ電子の特徴調査を行いました。モデルで予測した太陽風の動圧増大に対応する数日にわたるオーロラの増光と、太陽風が静穏な時期における木星1自転(約10時間)よりも短いオーロラの増光が検出されました。増光時のオーロラ電子エネルギーの変化は小さく、オーロラ発光強度変化はエネルギーよりも電子数の増大が主要因であることが初めて明らかになりました(10-図1)。太陽風による外部起因の変動と、それによらない磁気圏内部駆動の変動で、オーロラ電子の変化の特徴が継続時間以外には変わらないという結果でした。磁気圏粒子のパラメータ(プラズマ密度・温度)の変動量がオーロラ加速理論から求まり、磁気圏ダイナミクスに伴う断熱的

10-図1 2014年1月に「ひさき」で観測された(a)木星北極域のオーロラ発光強度と(b)発光強度比CR、および、(c)モデルで推定した木星位置における太陽風動圧の時間変化。(a)、(b)において、オーロラ短時間増光をオレンジ色、数日間にわたる太陽風との関連が示唆される増光を水色で示します。(b)の右側の軸は、CRに対応するオーロラ電子エネルギーを示しています。オレンジ色の点も水色の点も同程度のオーロラ電子エネルギーであることがわかります。

10-図2　オーロラ電子のエネルギーとエネルギー流入量の関係を示します。10分積算のデータを用いた頻度分布を表し、暖色ほど観測頻度が高いところです。白線は、異なる磁気圏プラズマ条件下のオーロラ電子加速理論の関係式を示します。観測結果は、静穏時には白色点線（磁気圏の電子2.5 keV, 0.0019 /cc）にもっとも近いのに対して、2015年1月のイオ火山活発時は、白色実線（2.5 keV, 0.0027 /cc）に近くなっていました。

加熱効果およびオーロラ発光位置変化のモデルを、観測結果をもとに定量的に議論することができました[※1, 2]。2015年1月の衛星イオの火山活動活性時には、発光強度変化が大きい短時間増光が見られ、これらはオーロラ電子数の非常に大きな増大によるものでした。他方、オーロラ電子エネルギーは期間を通して30%ほど小さくなっていました。オーロラ電子のエネルギーとエネルギー流入量の関係を、10－図2に示します。オーロラ電子加速理論と比較すると、火山活動が活発になった時には、オーロラ電子の起源である磁気圏の数keVのプラズマが増大したことを示唆します。加えて、2年分の長期データから、北極のオーロラ発光強度の中央値は1.3 TWと求まりました[※3]。木星の熱圏が約1,000度と太陽紫外線加熱では説明できないほど高温に維持されている謎や極域のエネルギー収支を議論するうえで重要な制約を、観測から与えることができました。

コラム ❸　次世代電源系要素技術実証システム NESSIE ってどうなってる？

久木田 明夫（JAXA 研究開発部門第一研究ユニット 研究領域主幹）

打上げ以降、いろいろとありましたが、これまでトータルで1,000日以上の実証データを取得してきましたので、その内容を簡単に紹介したいと思います。念の為ざっくりおさらいすると、NESSIEは、リチウムイオンキャパシタ（LiC）と3接合薄膜太陽電池の軌道上実証機です。LiCは、最長で8カ月間使わないで放置していても自己放電が無い事が確認できました。薄膜太陽電池については、データを1つ紹介したいと思います。取得した短絡電流（Isc）・開放電圧（Voc）データと地上劣化予測を比較して劣化予測が正しいかを調べるのですが、ここではIscデータ（右図）を紹介します。実証セルが4セットあり、No. 1、2は紫外線保護コーティング付き、No. 3、4がコーティング無しのセルです。右図からわかる通り、放射線劣化予測だけでは、若干のズレがありますが、放射線劣化予測に紫外線の影響を加味すると、実証データと予測データが一致している事がわかります。この結果から地上で実施している劣化予測が正しい事が確認できました。

ISC保存率
IMM3J：Inverted Metamorphic 3-Junction（逆積み格子不整合型3接合）。つまり実証用の薄膜3接合太陽電池セルNo.1～4。
RDC：Relative Damage Coefficient（相対損傷係数）。Predection by RDC methodとは、RDCを用いた放射線劣化予測の事。

11．金星における大気発光の新発見

奈良 佑亮（東京大学 博士課程1年）

極端紫外波長域の観測は超高層大気の組成を知るための手段として重要です。高度約100 km以上の領域にあたる金星の熱圏では、これまでにロケット観測、スペースシャトルからの観測、金星周回衛星の観測など、複数の極端紫外波長域の観測が行われてきました。しかし、ロケットやスペースシャトルによる観測は、地球大気の発光が雑音となり、観測できる期間にも制限がありました。また、金星周回衛星からの観測も軌道の制約上、観測期間が限られてしまいます。一方、「ひさき」には衛星から見た時の太陽と金星間の角度に制約はありますが、数カ月にわたる長期間、金星を連続観測する機会があります。また、軌道高度は約1,000 kmに位置するため、ロケットやスペースシャトルからの観測に比べ地球大気の影響を受けにくいという利点があります。さらに金星の超高層大気の組成を測定するために十分な波長分解能を備えています。「ひさき」は木星とともに金星を主な観測対象とした初めての衛星として観測を続けています。

他の惑星観測との兼ね合いで「ひさき」は2014年3月に20日間を超える長期間の観測を実施しました。この期間の観測をすべて積分した結果、これまで同定されなかった弱い発光が捉えられました（11-図1）[※1]。過去の観測より1桁暗い約1レイリー[※2]の発光が検出されたのです。さらに、複数の成分が混ざった波長域にフィッティング解析を施すことによって各成分に分解し、窒素分子

11-図1　「ひさき」が観測した金星スペクトル（90～120 nm）。スペクトルの波長分解能はおよそ0.4 nmですので、輝線に起因する全発光強度は縦軸の値を0.4倍したものにおよそ等しくなります。N_2のc'₄-X帯[※3]（97 nm付近の黒線）、b-X帯[※3]（98～108nm帯の青線）の発光が金星ではじめて捉えられました。CO（105.2 nm）の発光のような弱い発光の同定にも成功しました。

10－※1　C. Tao et al., *J. Geophys. Res.*, **121**, 4041–4054, doi:10.1002/2015JA021271 (2016).
10－※2　C. Tao et al., *J. Geophys. Res.*, **121**, 4055–4071, doi:10.1002/2015JA021272 (2016).
10－※3　C. Tao et al., *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 71-79, doi:10.1002/2017GL075814 (2018).

11-図2 「ひさき」が観測した金星スペクトル(120～150 nm)。N_2 a-X帯※3 (135～145 nm帯の赤線) の発光が金星ではじめて捉えられました。また、波長分解能が足りないために重なって観測されてしまった輝線を分解し、各々の強度を算出することで多くの輝線が同定されました。

の発光を初めて同定することに成功しました（11－図1，2）※1。このような、高高度、高波長分解能、長時間という特徴を持った「ひさき」の観測によって、極端紫外波長域において50種を超える輝線が金星で新たに同定されました。「ひさき」の観測により金星の極端紫外波長域における、いわば発光強度データベースを作ることができ、将来の金星科学が発展するための基礎を築いたと言えます。

金星大気の主成分である CO_2 から生成されるCやCOの発光を除くと、発光に寄与する物質はH、He、O、N、Ar、N_2 であり、地球、火星の極端紫外スペクトルと共通しています。熱圏において地球型惑星では温度、気圧といった物理的環境は大きく異なっていますが、化学的環境は類似しているということが確かめられました。

12. 大気波動が揺さぶる金星の雲の上の世界

益永 圭（スウェーデン国立スペース物理研究所 研究員）

金星の高度約100 kmより上空に広がる熱圏では、大気は主に昼側から夜側へ流れています。これは太陽放射で加熱される昼側から冷たい夜側へ向いた圧力勾配によって駆動されています。一方、金星の高度45～70 kmほどには厚い雲が広がっており、西向きの風が吹いています。この風の速さは秒速100 mに及び、この高度において金星の大気は約4日で一周しています（スーパーローテーションと呼ばれる）。この駆動メカニズムは分かっていませんが、雲層に存在する大気波動がその運動の駆動・維持に重要な役割を果たしていることが分かってきています。近年、こういった大気波動は超高層大気にまで伝搬し、金星の熱圏のダイナミクスにも影響を及ぼすことが提唱されていますが、その実態はよくわかっていません。また、金星は固有磁場を持たないため、超高層大気は太陽風に直接曝されており、太陽風の影響を受ける領域でもあります。私たちは、このように上下から影響を受ける金星熱圏のダイナミクスをより理解するため、「ひさき」を用いて研究を行ってきました。

2014年3月から2015年11月の間に、金星の極端紫外大気光の連続観測を5期間にわたり実施しました。この観測によって同定された輝線のうち、特に明るい酸素の輝線（83.4 nm、130.4 nm、135.6 nm）に注目しました。酸素原子は金星熱圏における主要成分の1つであり、金星熱圏の運動力学・化学的性質を理解する上で重要な成分です。これらの輝線は熱圏中の酸素原子が電離圏中の光電子と衝突することによって発光するので、その強度は酸素原子柱密度および光電子フラックスの変動に依存します。実際は、高い発光効率の高度120～140 kmにおける変動を捉えていると考えることができます。

12－図1 a-dは太陽紫外フラックスおよび酸素大気光の発光強度の時間変動の一例を示しています。光電子は熱圏中の CO_2 が太陽紫外光を受け光電離することによって生成されるため、大気光の発光強度は太陽自転周期と同期して変動しているのがわかります。大気光データの変動周期成分を求めると、太陽自転周期である約27日周期のほか、約4日周期で変動する成分が検出されました（12－図1 f-h）。これは金星全球の熱圏中の酸素原子柱密度または電離圏中の光電子フラックスに数パーセントの4日周期変動があることを示しています。さらに、5期間の観測の結果、この4日周期変動成分は金星の朝側を観測した時に強く現れる性質も明らかになりました※1, 2。

一方、金星探査機Venus Expressが同時期に観測した太陽風の変動と大気光の明るさの関連を調べましたが、明確な相関関係は存在しませんでした。このことから、「ひさき」が観測した大気光の周期変動は熱圏上部からの影響で引き起こされているのではなく、熱圏下部からの影響を受けた熱圏酸素原子の密度変動が原因で起こっているのであろうと考えられます※1, 2。

熱圏下部からの影響として、最初に述べた大気波動が関わっている可能性があります。地球では中層大気（成層圏や中間圏）において様々なスケールの大気波動が観測されており、中層大気の物質輸送に重要な役割を担っていることが知られています。このような大気波動は金星中層大気（雲層や中間圏）でも探査機によって観測されており、金星においても大気波動が物質輸送に重要な役割を果たしている可能性があります。私たちの観測結果は、こういった大気波動による物質輸送の影響が金星の熱圏高度にまで及んでいる可能性を示唆しています。

12-図1 (a) 太陽観測衛星SOHOによって観測された太陽紫外フラックス（26～34 nm）。地球の位置での太陽フラックス観測データから太陽の27日自転周期を仮定して金星の位置での太陽フラックスを推定した値である。(b-d)「ひさき」が観測した酸素原子極端紫外大気光の時間変動。(e-h) 周期解析結果のパワースペクトル。破線より大きい箇所は99%信頼区間を示す。太線矢印は検出された強度の大きい周期の3成分を示し、太陽フラックスの変動に起因している。細線矢印はその他の周期成分で太陽フラックスの変動とは独立している。

11－※1 Y. Nara et al., *Icarus*, doi:10.1016/j.icarus.2017.10.028 (2017).
11－※2 レイリー（Rayleigh）は、光の強度を表す単位で、単位時間、単位面積、単位立体角あたりに入射する光子数が 10^6 個のとき1レイリーと定義される。
11－※3 原子輝線は、元素記号に続くIやIIは電離度を表し、Iは原子、IIは1価イオンであることを表す。分子輝線は、化学記号に続く記号で状態の遷移を示す。Xは基底状態を表し、他はアルファベット順で早いほどエネルギーの低い励起状態を表す。カッコ内の数字は、左側から励起状態、脱励起状態の振動準位を表す。

以上のように、「ひさき」の観測によって金星熱圏の酸素原子密度に約4日周期の変動が存在することが明らかになりました。しかし、これを駆動するメカニズムはまだ完全には解き明かされていません。私たちは、大気が4日循環している高度で生まれる大気波動が鍵を握っているのではないかと予想していますが、観測的な証拠はまだありません。より詳細な議論を行うには、金星中層大気の同時観測が必要となるでしょう。幸いなことに、私たちは金星探査機「あかつき」を有しています。「あかつき」は複数のカメラを搭載しており、2015年12月の金星周回軌道投入以降、雲層から熱圏下部にわたる様々な高度の観測を行っています。私たちは「ひさき」のデータと「あかつき」の同時観測データを組み合わせることで、今後も金星の熱圏と中層大気をつなぐメカニズムの詳細に迫っていきたいと考えています。

13. 磁気嵐に呼応する地球外気圏の密度変動

桑原 正輝（東京大学 博士課程３年）

地球大気の最も外側の領域（外気圏）は、内側の中性大気の熱圏と、外側の電離大気のプラズマ圏のはざまに位置し、宇宙空間との境界領域にあたります。外気圏の中性大気は、太陽光を散乱することにより特定の波長の輝線を発しています。このうち水素ライマンアルファ線の発光を「ひさき」により観測した結果、磁気嵐に伴う水素大気の密度変動が、プラズマ圏のイオンとの電荷交換反応（イオンと中性物質が衝突した際にイオン側に電子が移る反応）で説明できることがわかりました※1。

最近の地球観測衛星（TWINS）により、地球を取り囲むように広がる中性水素の総量が、磁気嵐の発生に伴い突発的に増加（6～17%）するという現象が新たに確認されました。本来中性である水素原子は磁場の影響を受けないことから、熱圏やプラズマ圏と何らかの相互作用を経て増加するということが示唆されていました。しかし、その詳細な物理過程は明らかになっていませんでした。

2013年に打ち上げられた「ひさき」は地球周回軌道から惑星の高層大気・磁気圏の観測を行っていますが、その飛翔高度は1,000 kmであるため、高度10,000 kmまで広がる地球外気圏大気の発光が常に視野に入ることになります。本稿では木星や金星の観測データにとっては汚染成分となるこのバックグラウンドデータを活用し、地球外気圏の中性大気の変動を追いました。2014年2月に中規模の磁気嵐が数回発生し、地磁気変動の2～6時間後に中性水素の増加（約10%）が観測されました（13-図1）。

外気圏中の中性水素の粒子数の収支は、熱圏およびプラズマ圏との相互作用により決まります。まず、熱圏との相互作用として考えられるのは、熱圏の膨張による外気圏への中性水素の流入量の増減です。磁気嵐発生後、極域に注入されたエネルギーは大気の擾乱を引き起こし、粘性の相互作用・熱伝導・摩擦による損失等により中性大気を加熱します。我々は2014年2月に発生した磁気嵐の中でも最大の地磁気擾乱を引き起こした19日のイベントに着目し詳細な解析を行いました。中性大気の経験モデル（NRLMSISE-00モデル）によれば、この時の熱圏温度は50 Kほど上昇していました。しかし、このモデルにより求めた中性大気の組成・密度をもとに熱拡散方程式を解き、中性水素の増分に換算すると0.2%ほどにしか達しませんでした。10%の増加量を説明するためには、2,000 K以上にも達する熱圏の温度変動が必要であり、これは現実的な値ではありません。さらに、過去の地球周回衛星（DE-2）の観測および地上分光観測から、熱圏温度は磁気嵐の発生から10時間以上遅れて上昇することが言及されています。この点においても、熱圏との相互作用では「ひさき」の観測結果を説明できません。

一方、中性水素の消失の要因の一つとして考えられるものが、外気圏の中性水素とプラズマ圏のイオンとの電荷交換反応（例えば $H+H^{+} \rightarrow H^{+}+H$）です。この反応により生成された中性水素は、中性になる前のイオンの運動エネルギーを持つために、高速で外気圏外に散逸します。通常、この消失と生成とが釣り合うことで外気圏は定常状態を維持しています。しかし、磁気嵐が発生すると、地球近傍のプラズマを閉じ込めている電場の発達によりプラズマ圏が縮小し、この電荷交換反応の衝突頻度が低下します。その結果、中性水素の突発的な増加が引き起こされるのではないかと我々は考えました。地球物理観測衛星（OGO-5）による粒子観測の結果から得られた経験式から、19日のイベント中にプラズマ圏界面が5地球半径から2地球半径まで縮小していたことがわかっています。過去の地球磁気圏観測衛星（IMAGE）による撮像観測および前述のOGO-5の観測により得られた中性水素とイオンの密度分布をもとに、衝突頻度の低下による「ひさき」の視線上の中性水素の柱密度の増分を推定した結果、4×10^{10} cm^{2}となりました。これは観測量である5×10^{10} cm^{2}と同程度です。さらにOGO-5の観測結果から、夜側のプラズマ圏界面の変動は地磁気変動に対して2～6時間遅れることがわかっています。この結果からも、磁気嵐発生に伴う中性水素の突発的な増加は、プラズマ圏のイオンとの電荷交換反応で説明できます。

このように地球外気圏の中性水素の分布・組成は磁場の擾乱に影響を受けます。他の惑星では、磁場・重力の強さや海洋の有無により、外気圏大気の発光の様相は地球と比べ異なるでしょう。実際、火星探査衛星MAVENによる観測では、球対称分布が仮定されていた火星コロナが球対称から外れる分布になっていることが明らかになっています。より詳細なコロナ観測を行うことで、惑星大気の散逸過程を解明する手助けとなるでしょう。

13-図1　磁気嵐に伴う水素ライマンアルファ線の増光※1
（上）2014年2月に観測された夜側の地球水素大気の発光強度の変動。黒点は1分ごとの観測データ、赤線は1周回ごとの平均値を表している。（下）地磁気活動度の指標（Dst指数、http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/, Kyoto University）。図中の黒点線はDst指数が最小値を記録した時刻、赤点線は水素大気の発光強度が最大になった時刻を示している。Dst指数の減少に伴い、水素大気の発光強度が増加しているのが確認できる。

12－※1　K. Masunaga et al., *J. Geophys. Res.*, **120**, 12, 2037-2052, doi:10.1002/2015JE004849 (2015).
12－※2　K. Masunaga et al., *Icarus*, **292**, 102-110, doi: 10.1016/j.icarus.2016.12.027 (2017).
13－※1　M. Kuwabara et al., *J. Geophys. Res.*, **122**, 1269-1276, doi:10.1002/2016JA023247 (2017).

深宇宙探査技術実証機DESTINY+

DESTINY+(デスティニー・プラス)はDemonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science の略称で、惑星間航行中にダスト（固体微粒子）を捕集して分析を行い、小惑星フェートンのフライバイ探査を行う計画です。フェートンはふたご座流星群の母天体で、活動的でC型（炭素質）小惑星、最大級（5.8 km）の地球衝突可能性天体です。DESTINY+ には、①惑星間ダストの全体像をダスト粒子毎の軌道特定、組成分析から明らかにする。②活動的小惑星の表層地形観測からダスト放出機構を理解する。③フェートンから放出されるダストの物理化学特性を明らかにする。④太陽系外から地球軌道程度まで流入する星間ダストの組成分析から太陽系起源物質の理解を深める。という4つの理学目的と、①電気推進による宇宙航行技術を発展させ、その活用範囲を拡大する。②先進的なフライバイ探査技術を獲得し、小天体探査の機会を広げる。という2つの工学目的があります。

従来の深宇宙探査機が、ロケットで惑星間空間に一気に投入されるのに対し、DESTINY+ では小型のイプシロンロケットで地球周回の長楕円軌道に投入され、1～2年かけて燃料消費の桁違いに少ないイオンエンジンで高度上昇し、月スウィングバイで加速して惑星間空間へ出発します。これは将来の低コスト・高頻度で持続的な深宇宙探査を実施可能にするための技術実証です。「はやぶさ2」搭載のイオンエンジンを増強し、これに必要な電力を新型の薄膜軽量太陽電池パドルにより供給します。地球周回中の探査機へ様々な方向から入射する太陽光熱や、推力増強に伴う発熱増加に対応した放熱能力向上の一方、地球や月の影に入る際には、保温のための電力消費を抑えるため、過度な放熱を抑制する必要があります。そこで、ループヒートパイプや可逆展開ラジエーターなどの先端的熱制御技術を採用します。

搭載される3つの観測機器の開発や理学全体の取りまとめを千葉工業大学が担当し、多くの組織の研究者が参加しています。ダスト分析器は NASA の土星探査機カッシーニ搭載品の改良版でダストの軌道特定が可能となっており、ドイツ航空宇宙センター（DLR）が資金提供しシュツットガルト大学が開発します。500 km の最接近距離を相対速度 30 km/s 以上ですれ違う数十秒間に、超望遠モノクロカメラが高解像度で小惑星を撮像し、可視近赤外マルチバンドカメラは4つ以上の波長帯で同時撮像を行います。このとき地球・探査機間の電波の往復には 30 分弱必要であるため、探査機には自律的に小惑星の姿を捉えて追尾撮像する機能を持たせます。フライバイ観測データを送信し終えるまでの4年半が所定のミッション期間ですが、延長ミッションとして2つ目の天体の探査をするマルチフライバイも検討しています。

（西山 和孝）

ホールスラスタ開発試験用真空チャンバが完成

オール電化衛星技術の実証を目指す技術試験衛星9号機の開発が進む中、ホールスラスタ開発試験用真空チャンバ（通称ホール DT（Development Test）チャンバ）が完成し、2017年12月から本格的な運用に入りました。先端宇宙科学実験棟（D棟）1階に設置されたホール DT チャンバ（＝写真）は、直径（内径）3m、全長9m のステンレス製容器にメカニカルポンプならびに高真空ポンプが接続されたシステムです。合計 21 台の 30 インチ口径クライオポンプがチャンバに直結され、ホールスラスタの推進剤であるキセノンガスに対する高い排気能力（>220kL/s）を実現します。技術試験衛星9号機搭載用ホールスラスタは、投入電力6 kW に対して発生推力 359mN 以上を目標としていますが、これは「はやぶさ」、「はやぶさ2」搭載イオンスラスタ1台あたりの投入電力 400 W が 10 mN 級であったことを考えると、電気推進としては飛躍的な大電力化になります。従って、ホール DT チャンバのポイントは排熱設計にあり、真空チャンバ内で動作するホールスラスタからの熱を排出し、また、低温で動作するクライオポンプへの熱入力を低減するための水冷システムについて細心の注意を払って開発しました。熱設計余裕も十分確保しており、投入電力 10 kW を超える大電力ホールスラスタについても試験が可能です。チャンバの設計開発をリードしていただいた研究開発部門と第一宇宙技術部門技術試験衛星9号機プロジェクトチーム、先端宇宙科学実験棟の整備にご協力いただいた施設部、宇宙科学研究所科学推進部、ならびに先端宇宙科学実験棟各位に深く感謝いたします。

先端宇宙科学実験棟のホールスラスタ開発試験用真空チャンバ。

ホール DT チャンバでは、早速ホールスラスタの各種試験が実施されており、まずは技術試験衛星9号機搭載ホールスラスタの開発に注力することになります。「はやぶさ」、「はやぶさ2」搭載イオンエンジンと同様に、ホールスラスタにも合計1万時間以上の運用が求められることから、耐久性の評価が最大のポイントです。将来的には、このホール DT チャンバを活用し、商用衛星用途から、探査ならびに軌道間輸送のための次世代ホールスラスタまで、研究開発が活性化していくことを期待しています。

（船木 一幸）

ベトナムにて宇宙科学技術国際会議を開催

近年豊かになりつつある東南アジアでは宇宙への関心が高まりつつありますが、その活動範囲は GPS や準天頂衛星などの測位衛星のデータ利用や超小型衛星の製作等に限られており、まだまだ最先端の宇宙科学研究・技術開発に関わることは東南アジアの若手には困難な状況にあります。そこで、まずは宇宙科学の魅力を伝え、宇宙科学の立ち上げを目指すことを主目的に、HCMIU-VNU（ベトナム国立ホーチーミン市国際大学、会場）と JAXA（調査国際部、ISAS、総合研究大学院大学が協働）の共催で国際会議を実施しました。2017 年 12 月 12 日～ 15 日の４日間開催された会議に、約 70 名が参加しました。そのうち 22 名はベトナムの学部学生でした。日本からは、國中副所長、満田プログラムディレクタを初めとして ISAS の教員８名、中須賀教授（東京大学）、神武准教授（慶応大学）等計 15 名が参加しました。また台湾・韓国の宇宙科学・宇宙応用関係者や、ベトナム国立宇宙センター（VNSC）所長も含むベトナムの宇宙関係者の参加がありました。

会議期間中 HCMIU と JAXA 及び総研大、さらにアジア諸国の宇宙機関とが具体的にどのように連携強化していくかの議論が活発に交わされました。既に JAXA との協力が進められている宇宙利用分野については、災害監視・大気汚染等の問題に共同で取り組むことになりました。さらに今回の国際会議を契機として、HCMIU 物理学科において宇宙科学集中講義の企画や ISAS へのインターンシップの募集を行うこと、JAXA が開催を主導する「アジア・太平洋地域宇宙機関会議」（APRSAF）の枠組みを通じて、今後東南アジア全域における芽だしを行っていくことが合意されました。学生も含め若手からも積極的に質問や意見が出ました。終了後、学生の一人が駆け寄ってきて“Thank you very much, please come again.”とのこと。準備段階からの疲れが一気に吹き飛びました。

（左）講演中の國中副所長、（右）バンケットの様子（満田プログラムディレクタと主催者・組織委員会メンバー）。

会議の実施に協力いただいた ISAS 教員および科学推進部（特に国際・大学院教育関係）の皆さんには大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

（松原 英雄）

第18回宇宙科学シンポジウム開催

2018 年１月９日～ 10 日に、JAXA 相模原キャンパスにおいて、宇宙理学委員会及び宇宙工学委員会の主催により「宇宙科学シンポジウム」が開催されました。本シンポジウムは、宇宙科学コミュニティの会合として毎年年初に開催されています。２日間の延べ参加人数は 444 名で、JAXA 外から 277 名が参加され、口頭講演は 36 件、ポスター発表は 188 件と例年通りの盛況な会合となりました。

今年は、今後の宇宙科学の進め方に関して、初日に2つの企画セッションとパネルディスカッションが行われました。午前の企画セッションでは、2030 年代の宇宙科学ミッションをテーマとして、理学及び工学の各分野から超大型観測衛星計画や 20 年後の輸送系の展望をお話しいただくとともに、若手で構成される 20 年委員会のメンバーから、委員会の答申の方向性に関して、厳しい現実を考慮しながらも将来構想に関して報告がなされました。将来の議論のなかでは、1993 年の『ネイチャー』に掲載された宇宙科学研究所に関する高い評価※1が紹介され、この評価を維持、超える活動を今後行うべきとのコメントも寄せられました。

午後の企画セッションでは、「宇宙科学の規模と頻度」をテーマとして、JAXA 中期計画における宇宙科学の位置付け、JAXA プロジェクト業務改革とミッションライフ、挑戦的ミッションと信頼性の在り方に関する報告、及び大気突入カプセルの研究事例の紹介が行われました。宇宙科学予算の厳しい現状とその中で現行のプロジェクト遂行のためにリソースを振り分けなければならない状況が説明されました。また、「イカロス」の開発事例をもとに、相乗り衛星の活用等の新しいミッション創生の可能性が提案され、また、より大学と連携した取り組みによる予算獲得やプロジェクト推進に関する意見が寄せられました。

パネルディスカッションの様子。

宇宙科学プログラムの最新トピックスとして、３つの特別セッションが企画されました。「はやぶさ２」、「あかつき」、「あらせ」、CALET、「たんぽぽ計画」の最新運用成果報告や XARM、SLIM、BepiColombo、SPICA のプロジェクト進捗が報告されました。

２日目の一般セッションでは、戦略的中型計画、公募型小型計画、海外との共同計画を目指すグループからの報告や小規模計画の活動報告等多数の講演が行われました。

シンポジウムの講演資料は、JAXA リポジトリ (https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/) にて公開予定です。

本シンポジウムの開催にご協力いただいた皆様に、この場を借りてお礼申し上げます。

（第 18 回世話人　田中 孝治、安部 正真、大山 聖、国分 紀秀）

※１　John Madoox, “Recipe for a good research laboratory”, NATURE, vol.366 23/30, December, 1993.

連　載

捕らえろ粒子。感じろ電磁波。宇宙嵐に挑むERG

ERGプロジェクト　リレートーク

第15回（最終回）

「大切なものは目に見えない」

●S-WPIA担当　小嶋 浩嗣

イラストレーターの熨斗千華子さんがソフトウェア型波動粒子相互作用解析装置（S-WPIA）のエンブレムをつくってくれました（左図）。「あらせ」の故郷、鹿児島県肝付地方に伝わる妖怪「いったんもめん」が巻き付いて、そこに『星の王子さま』の「大切なものは目に見えない」と言うフレーズがフランス語で書かれています。S-WPIAは、2007年12月ERG衛星キックオフ会議で、東北大学の加藤雄人さんに提案して頂きました。「ソフトウェアで観測するので重量ゼロです」というスタンスで。S-WPIAは、宇宙空間で移ろいゆく「エネルギーの流れ」を捉える日本発の観測装置です。宇宙空間を探査する科学者にとって、エネルギーの流れは最も重要なものの一つですが目には見えません。でも、このエネルギーの流れがあるから宇宙環境は、時々刻々と変化をしていくのです。やっぱり大切なものは目に見えないのです。しかし、S-WPIAは、この大切なものを見えるようにしてくれます。S-WPIAを提案して10年。この間、加藤さんにより手法は理論的に確立され、JAXA疋島充さんがプログラムとして形にしてくれました。S-WPIAはほとんどの観測器のデータを使用しますが、各機器の研究者、メーカーの担当者、そして衛星システムチーム、すべての皆さんが、S-WPIAの意義を理解し協力してくださいました。さあ、S-WPIAは科学者の目となり大切なものを見せてくれるでしょうか。

（小嶋から疋島 充さんへ）
　疋島さん、S-WPIAの非常に複雑な衛星上処理プログラムを実現してくれてありがとうございます！

「S-WPIAの開発を経て」

●S-WPIA機上ソフトウェア担当　疋島 充

　私がこの分野に足を踏み入れたのは修士課程からで、これからホットになる水星磁気圏探査機MMOに搭載するサーチコイルセンサの開発に携わりました。その後、「コーラス」と呼ばれるプラズマ波動のシミュレーション研究を行い、ERGプロジェクトの立案者である故小野先生に声をかけて頂き、東北大学でS-WPIAの開発をスタートしました。

　S-WPIAは、これまで各機器PIの方々からの紹介にありましたように観測した波動電場・磁場（PWE-E/B）、背景磁場（MGF）、粒子（MEPe、HEP、XEP）の全データを用いて衛星機上で波動と粒子の「相関」を求めるために複雑な処理を行います。各機器との連携処理が必要となるため、緻密な調整を経て、地上試験で次々と現れてくる問題を乗り越えて、開発を行ってきました。また、様々なケースを想定したフレキシブルな処理に対応し、いかに速く、もちろん計算が異常終了しない処理フローを構築することに神経と時間を使いました。S-WPIA処理のために上記の全機器から送出されるデータ量は1秒間に1メガバイトにもなります。これは全ミッション機器から定常的に作られる通常データ総量の100倍！に相当します。そしてPWEによる同量程度のバースト波形データが上乗せされます。これらデータは全て地上に下ろすことは不可能なため、高島さんの記事にありました機上の大容量レコーダMDRに保存します。S-WPIAではこれらのデータを地上に送る機能も備えており、サイエンス側の要望を取り入れつつ使い勝手のよい機能に作り上げてきました。また、S-WPIA処理とデータ送信の連携が曲者で、互いの処理が破綻しないようにメーカーの方々のご協力も得て十分に試験を重ね、本日の運用に至っております。

　熱真空試験で長時間計算を行う機会がありましたが、日をまたいで10時間近くの計算が無事終了した時は強くガッツポーズしました（心の中で）。開発の他には、内之浦の射場で打上げ当日（＋α）まで1カ月近く滞在し、レイトアクセス班として打上げ数時間前まで衛星の側で作業を行い、貴重な経験をしました。

　S-WPIAは世界初の試みであり、新しい物理量を見つけることはそう簡単ではありません。S-WPIAはこれまでの磁気圏科学に新たな知見を与える強力な手法です。ERGが皮切りとなり、今後の科学衛星に搭載されていくことを信じて日々解析を進めております。

打上げ直後の集合写真（筆者は下段右から二人目）。

編集後記

「あらせ」の開発に携わったなるべく多くの人の、生の声を読者にお届けしようと半ページごとのリレートークでお届けしました。執筆の依頼をすると反応は十人十色で、文章もその人の個性にあふれていて、短い記事ながらも筆者の主張・個性がギュッと凝縮された一文がありました。「あらせ」を作り上げた「何か目に見えないもの」を心で見て、感じていただけたのなら嬉しいです。（三谷）

着いてみないとわからないことばかり。専門家も天文ファンも一緒になってワクワクできるところが「はやぶさ２」の魅力だと思う。

研究開発部門　第一研究ユニット
宇宙科学研究所 はやぶさ２プロジェクトチーム
武井 悠人（たけい ゆうと）

1988年生まれ。博士（工学）。2007年、山形県立山形東高等学校卒業。東京工業大学機械宇宙学科、同大学院機械宇宙システム専攻（JAXA連携講座所属）を経て、JAXA採用は2015年。研究開発部門第一研究ユニットに在籍し、宇宙科学研究所はやぶさ２プロジェクトチームを併任。

「はやぶさ２」のシステムを担当

――航空・宇宙に関心が芽生えたのは？

小学３～４年生のころ、家族旅行でアメリカに行ったのですが、連れていかれたのがなぜかフロリダのケネディ宇宙センターでした。どでかいサターンV型ロケットが横たわっているのを見て、これはすごいなと。また、ディズニー映画の『ロケットマン』にも刺激を受けました。火星探査に行く宇宙飛行士をコミカルに描いたものですが、とてもカッコよくて自分も宇宙に行ってみたいと思いました。

――大学は機械宇宙学科ですね。

当初はロケットをやりたかったのですが、講義の中で一番面白いと感じたのがロボティクスでした。そんな中、宇宙ロボット研究の大御所だった大学院時代の恩師と出会い、「ロケットとロボットは一緒だよ。そう、システム。宇宙ロボットも面白いからやってみないか」と勧められました。どちらも単独ではなく、システムすなわちモノの集合体なんですね。大学院では宇宙ロボティクスを専攻し、宇宙飛行士をサポートする装着型ロボットアームの研究開発をしていました。

――現在は「はやぶさ２」のシステム担当をされています。

システム担当として運用、運用計画、姿勢・軌道・通信解析、訓練企画などの業務に従事してきました。システム担当というのは全体の調整役。探査機を運用するにあたり、サイエンス系、姿勢制御系、推進系など各部門から要求がきます。それらをすりあわせて一本の運用計画に整理するのが私たちの役割です。加えて訓練企画の業務では、小惑星近傍を模擬した「はやぶさ２運用シミュレータ」開発を任され、現在ではそのシミュレータを使いプロジェクト一丸となって、リアルタイム運用訓練に取り組んでいます。プロジェクト全体と関わる仕事に、大きなやりがいを感じています。

――「はやぶさ２」プロジェクトは大変人気があります。

このミッションの面白いところは、到着してみないとわからないところがいっぱいあって、我々プロジェクトメンバも天文ファンも一緒にワクワク出来るところではないでしょうか。「はやぶさ２」では、そもそもリュウグウがどういう小惑星かがわからない。おおよその自転スピード、直径１km弱という大きさ、C型小惑星であることはわかっていますが、表面にどんなデコボコがあるのか、自転軸はどっちに向いているかなど、着いてみなければわかりません。タッチダウンが想定以上に難しく大きな危険を伴うかもしれません。ある意味、我々と一般の皆さんが同じ土俵で探査に向き合っている。そこが魅力だと思いますよ。順調にいけば６～７月に到着し、リュウグウの素顔が分かります。我々にとって今年は勝負の年になります。

フレンドリーだった宇宙研

――宇宙研に来られたときの第一印象は？

修士１年から筑波宇宙センターの宇宙ロボット実験室に出入りしていました。そのころからの宇宙研のイメージは「すごい研究者たちの塊」。どんなにすごいところだろう、怖いんじゃないかと緊張しました。来てみると、皆さんフレンドリーで楽しく仕事をされていて、逆に毒気を抜かれたような感じがしました。でも、いざプロジェクトの中で議論が始まると、皆さん専門性が深く技術面では妥協しない。こういう環境に自分も参加することができて本当に恵まれていると改めて感じました。

――将来はどんな業務につきたいですか？

太陽系に拡がる人類の拠点を作ってみたい。これまで自分の進路を決めてきたのも、「人が宇宙に出る」ことに魅力を感じたからです。しかし人間だけでは安全性や効率に課題がありますので、探査機やロボットとの協力が不可欠だと考えています。ゆくゆくはその様なフィールドに「はやぶさ２」をはじめ宇宙研で得た経験を生かしていければと考えています。

――柔道４段、インターハイ出場経験もあるとか。

高校３年時に山形県大会の60kg級で優勝し、インターハイに出ましたが残念ながら初戦敗退（笑）。実家がボランティアで柔道クラブをやっていたので、小さい頃からずっとやり続けています。実は昨年、私を含め３人で実業団のJAXA柔道部を立ち上げ、目下、部員募集中です。柔道が好きな方、是非お声がけください。

JAXA Explore to Realize　ISASニュース　No.443　2018年2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

今月は「ひさき」特集号が含まれます。力作揃いです。日々の衛星運用が続く大変お忙しい中、著者の皆様、大変ありがとうございました。（前田 良知）

＊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