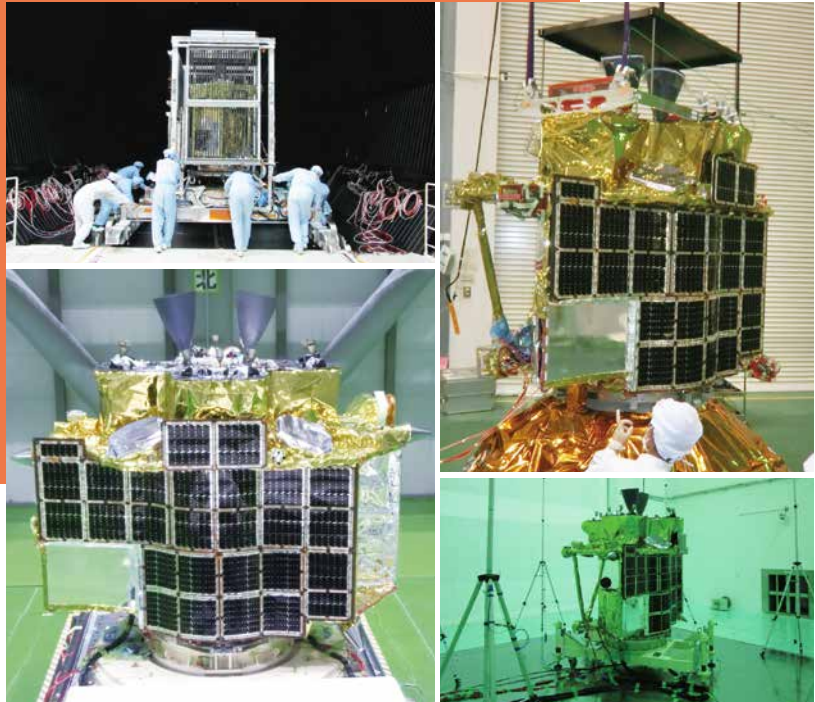


ついにその姿を現した 小型月着陸実証機SLIM

開発が進められてきた小型月着陸実証機SLIMも、ついに、実際に月に向かう“フライトモデル”が組み立てられました。現在、このフライトモデルに対して様々な試験を行い、健全性や設計妥当性を確認しているところです。

上段：（左）宇宙空間の熱環境を模擬する熱真空試験装置に運び込まれるところ、（右）ロケット結合部のフィットチェック中。下段：ロケット振動への耐性を確認する試験中（左）振動試験装置上、（右）音響試験装置内。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

迫れ、あかつきの星!(3) ～太陽が駆動する金星大気の巨大な波～

東京大学 新領域創成科学研究科 教授 今村 剛 (いまむら たけし)
産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 主任研究員 神山 徹 (こうやま とおる)

熱潮汐波とは？

熱潮汐波は、潮汐という言葉が入っていても、月の引力によって地球の海に引き起こされる潮の満ち引きとは違います。これは太陽（あるいは系外惑星であれば中心星）からの放射が惑星大気の昼側だけを加熱することによって生じる大気中の波です。太陽光によって加熱される場所は、惑星の地表に対して惑星の自転と逆方向に動いていきます。そのことによって大気中には惑星の自転と逆方向に（太陽を追いかけるように）伝わる波が生じます。全球規模の日変動現象というところは月による潮汐と同じです。熱潮汐波は惑星を東西に1周して1波長とか2波長という巨大な波であり、天気図上で視認することはできません。地球では水蒸気や成層圏オゾンが太陽光を吸収して暖められることによって生じていて、地表での振幅は1 hPa程度と小さいものの、高層大気では大きな振幅を持ち大気循環に影響しています。

この熱潮汐波が金星において重要な役割を果たしていることが、金星探査機「あかつき」によってわかってきました。

金星は高度50～70 kmあたりに硫酸の雲の層があり、金星全体を隙間なくおおっています。この雲が昼側で太陽光を効果的に吸収して暖まるために、大振幅の熱潮汐波が生じます。金星ではスーパーローテーションと呼ばれる、雲の高度で100 m/sに達する風が東から西へと吹いています。熱潮汐波がこの風を維持しているのかもしれないという予想が以前からなされていました。惑星の自転と逆方向に伝播する熱潮汐波は、自転と逆方向の「角運動量」を持っています。太陽光による加熱は、主として低緯度の雲層高度の大気で起きるため、低緯度の雲層高度で熱潮汐波が生じ、それがより高い高度や低い高度に向かって、また高緯度に向かって伝播します。この伝播にともなう角運動量が運ばれると、大気を回転させる力が生じるのです。金星に熱潮汐波があることは以前から知られていましたが、このあと述べるような「あかつき」の多角的な観測によってその詳しい構造が明らかとなり、スーパーローテーションにどのように関わっているのかを実証的に調べるのが可能となりました。

「迫れ、あかつきの星! (1)」は2020年9月号 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews474.pdf
(2) は2021年10月号 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews487.pdfに掲載しています。

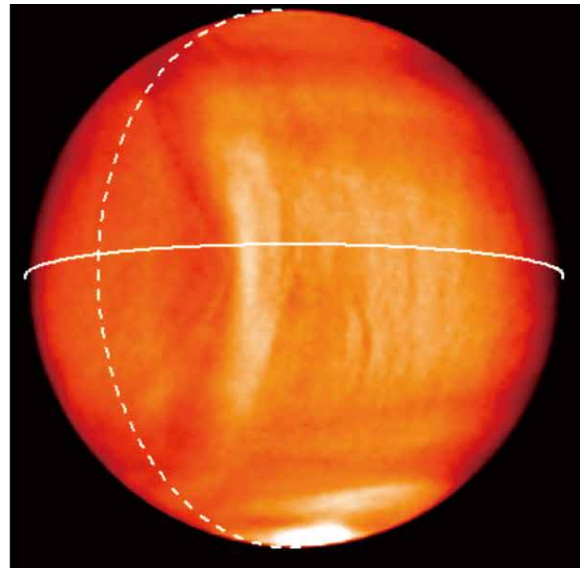
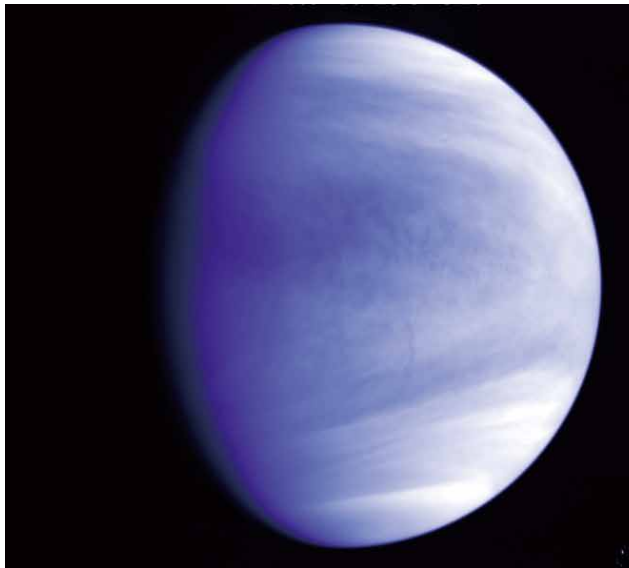


図1：2015年12月7日に同じタイミングで取得された(左)紫外カメラUVIと(右)中間赤外カメラLIRによる金星の画像。それぞれ波長283nmと8–12 μm での撮影。LIR画像中の実線は赤道、白点線は昼夜境界線を示す。LIR画像に見られる南北方向の筋状の模様は地形の凹凸に起因する山岳波による。

雲の温度に現れた熱潮汐波

昼夜の加熱差によって生じる熱潮汐波は、太陽方向に対して静止した、すなわち金星地方時に対して固定された構造を持つため、その全体像をとらえるためには昼夜両方を含む全ての地方時をカバーする観測が重要となります。「あかつき」の中間赤外カメラLIRは、雲頂から発せられる熱放射を波長8–12 μm で撮影して雲の温度分布を可視化する、いわばサーモグラフィです(図1右)。このようなカメラを金星に持ち込むのは今回が初めてであり、このことによって全地方時で数千枚に及ぶ雲温度画像を得ることができました。またPioneer Venus、Venera、Venus Expressなど過去の金星探査機とは異なり、「あかつき」はほぼ赤道面に沿った軌道を周回しているため、赤道を中心として両半球に広がる現象を広い地方時で観測し続けることができます。このようなカメラは熱潮汐波の観測にはうってつけです。

雲頂は不連続面ではなく、雲粒が高度とともに徐々に減少するように分布しているため、熱放射は単一の高度から出てくるのではなく、ある幅を持った高度範囲の熱放射が観測されます。そしてその高度範囲は、雲から探査機に向かう熱放射が真上方向からどれだけずれているか(出射角)によって変わります。そのため、LIRが観測する高度を放射伝達計算によって推定し、出射角ごとにLIRデータを分類することによって、異なる高度の情報が得られます。

図2の左側の図は、高度69km付近を観測する出射角60°のデータを平均して得られた熱潮汐波の構造を示しています。南北両半球とも赤道から中緯度帯まで波数2(東西一周に2波長)の半日潮と呼ばれる成分が強く、波数1の一日潮は目立ちません。このように両半球の全地方時にわたる熱潮汐波の構造が可視化されたのは初めてのことです。

出射角によって異なる高度を観測できることを利用して、高度方向の構造についても調べました(図2右側)。高度とともに波の位相が、地方時が早まる側へとずれています。このことは雲中で励起された熱潮汐波の位相が下向きに伝播していることを表しており、このとき群速度(エネルギー伝播)

は上向きであるため、熱潮汐波が持つ自転と逆方向の角運動量も上方輸送されます。このような角運動量の輸送によって雲層高度の大気がスーパーローテーションの方向に加速されていることが推定されました。このような位相の傾きは、探査機と地上局を結ぶ電波通信を利用した電波掩蔽観測によってもとらえられています。

風速分布に現れた熱潮汐波

雲画像を用いた気象研究の常套手段として、小規模な雲の模様の動きから風速を求める方法がありますが、LIRで得られた雲画像は地球の雲画像と違って模様に乏しいという問題がありました。小規模な模様のコントラストを強調しても、同時にノイズも強調されてしまい、結局うまくいかないのです。そこで私たちは、1～2時間間隔で取得された画像を連続した数枚ずつ重ね合わせて平均することによってノイズを低減することを試みました。単なる平均ではなく、画像データを緯度経度座標に展開してからスーパーローテーションの速度で動く座標系に変換し、この座標系において画像を重ね合わせることで、スーパーローテーションによって流される成分を強調したのです。こうして得られた連続画像を眺めると、昼側では赤道から高緯度に向かう方向に雲が流れ^{*1}、夜側では逆に高緯度から赤道に向かう方向に雲が流れる^{*2}という傾向が雲頂高度で平均的に存在することがわかりました(Fukuya et al. 2021)。これまで金星の昼側では高緯度に向かう流れが観測されていましたが、これがそのような平均循環を表すのか、あるいは熱潮汐波の特定の位相をとらえたものなのか、はっきりしていませんでした。今回の観測により、後者が正しいことになりました。

こうして熱赤外面像を用いた雲追跡が可能となり、夜側も含む全地方時で風速分布を求めることに世界で初めて成功しました。得られた風速の地方時と緯度についての平均的な分布を図3に示します。どの緯度でも地方時によって風速が顕著に変化していますが、これは熱潮汐波を反映しています。この風速分布から熱潮汐波の一日潮と半日潮の速

*1 https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2F541586-021-03636-7/MediaObjects/41586_2021_3636_MOESM5_ESM.mov

*2 https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2F541586-021-03636-7/MediaObjects/41586_2021_3636_MOESM3_ESM.mov

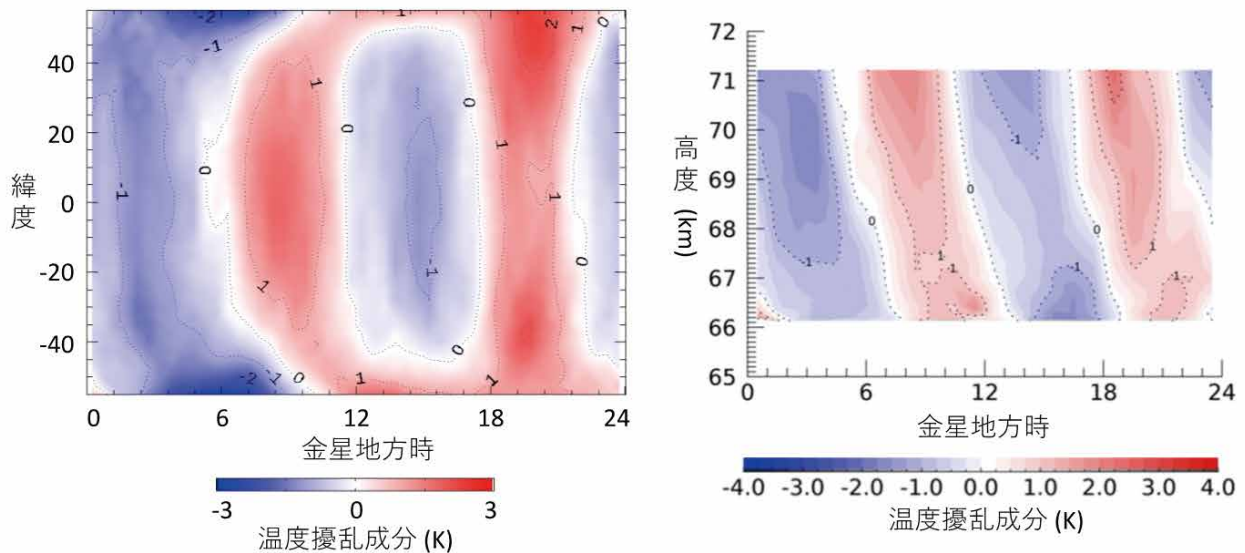


図2：(左) 2016年10月から2019年1月までの3金星年以上にわたる雲温度画像を平均して得られた、熱潮汐波にともなう温度変動の地方時と緯度に対する分布 (Kouyama et al. 2019 を改変)。(右) 複数の出射角のデータを用いて求めた赤道域での温度変動の地方時と高度に対する分布 (Akiba et al. 2021 を改変)。

度構造が初めて明らかとなり、ここから理論的考察をもとに上下流の振動も推定することによって、熱潮汐波が角運動量を高度方向に運ぶことによってスーパーローテーションの維持に大きく寄与していることがわかりました。

「あかつき」の紫外カメラUVIからも驚くべき結果が得られました。金星を紫外線で見ると雲頂に顕著な濃淡模様が観察されます(図1左)。これは二酸化硫黄や何らかの未同定の化学物質が不均一に分布しており、太陽紫外線の吸収が場所によって違うためです。このような金星の紫外画像を用いた雲追跡は以前から行われていましたが、解像度や空間力バレッジの不足のため、熱潮汐波による角運動量輸送の評価には不十分でした。しかし「あかつき」のUVIは膨大な高解像度画像を取得し、これを新たに開発した高精度な雲追跡手法で解析することにより、これまでになく高精度な風速データを得ることができました (Horinouchi et al. 2020)。雲層で散乱された太陽紫外線を撮影するので昼側の風しかわかりませんが、熱潮汐波にともなう風速の緯度線

に沿った振動パターンが緯度とともに東西方向にずれており、このために高緯度から赤道域へと角運動量が運ばれてスーパーローテーション方向の加速が生じていることが明らかとなりました。UVIデータから導かれたこのような南北方向の角運動量輸送は、前述のLIRの赤外線観測で明らかとなった高度方向の角運動量輸送とは別のメカニズムであり、熱潮汐波がこのような働きをすることは理論的にも指摘されてこなかったことです。見積もられた加速量はスーパーローテーションを維持しうる大きさであり、惑星気象学に新たな視点をもたらしたものとと言えます。全球的な加速と減速のバランスの分析に、LIRによって得られた温度変動の情報も使われました。「あかつき」の総合的な観測があつてこそその成果です。

展望

「あかつき」は金星気象の様々な要素を研究対象に掲げていますが、とりわけ熱潮汐波に関してはこれまでになく豊富な情報が得られ、急速に理解が進んでいます。現在も新たなアイデアにもとづく解析が試みられており、その成果についても近くご紹介できるでしょう。大気のスーパローテーションは金星の他に土星の衛星タイタンでも見られるほか、土星や木星の低緯度にも似た現象が存在し、系外惑星でもそのような大気循環を示唆する観測例が増えています。中心星の近傍を公転する系外惑星が数多く発見されていますが、そのような惑星では中心星からの強い放射を受けて大振幅の熱潮汐波が生じているかもしれません。これらの惑星の大気において熱潮汐波がどれほど重要であるかはまだわかりませんが、金星という精密観測が可能な近隣の天体を対象としてメカニズムを理解することにより、広く惑星一般に応用していくことができるでしょう。「あかつき」の観測の充実は、一方で数値シミュレーションによる金星大気研究の発展を促しており、観測と理論を両輪として金星をはじめ惑星大気の研究が深まっていくことを期待しています。

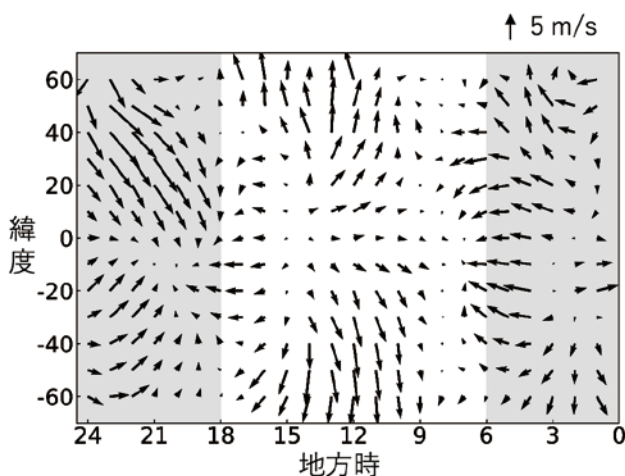


図3：雲温度画像を用いた雲追跡により得られた風速の地方時と緯度についての分布。スーパーローテーション成分を差し引いたもの。影を付けた領域は夜側であり、今回初めて風速の分布が得られたところ。矢印の長さは風速に比例し、緯度について10度の長さが5m/sに相当する。(Fukuya et al. 2021 を改変)

ベピコロンボ水星へ再び接近 ～2回目の水星スイングバイを実施～

日欧共同水星探査計画ベピコロンボの水星磁気圏探査機「みお」および水星表面探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) は、2022年6月23日に2回目の水星スイングバイを実施しました。探査機は同日の18時44分22秒 (日本時間) に最接近高度198 km を通過し、その後も目標通りの軌道を航行しています。水星周回軌道投入まで合計9回実施されるスイングバイのうち今回は5回目となります。2025年12月に予定される水星到着までの長い旅路もようやく折り返しを通過したと言えます。

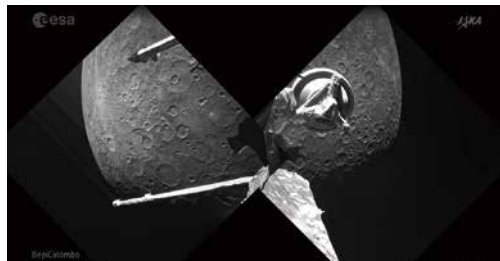
今回も「みお」に搭載されるほぼ全ての観測装置を稼働させ、水星磁気圏や周辺宇宙環境の科学観測を実施しました。観測データは非常に良好で、2022年7月にドイツのダルムシュタットで2年半ぶりに対面で開催された科学チーム会議も各機器チームの報告に大いに盛り上がりしました。1回目の水星スイングバイとの比較という観点でも面白いデータが得られており、今後の観測成果報告にご期待下さい。

最接近前後には運用状況を運用室からYouTubeで生配信する試みを若手有志チームとともに実現し、同時接続で最大約550

名、再生回数5000回以上と多くの方に視聴頂き、やはり運用イベントはライブならではの臨場感を発信できる貴重な機会だと実感できました。

3回目の水星スイングバイは1年後の2023年

6月に予定されています。運用チームはすでに水星到着に向けた運用準備を本格化させており、気の抜けない日々が続きます。水星への旅を続けるベピコロンボの今後に引き続きご注目下さい。(村上 豪)



ベピコロンボ2回目の水星スイングバイ時、最接近の約6分後に撮影された水星の姿。推進モジュールに搭載されている2台のモニタリングカメラによって撮影された。水星表面探査機本体や磁力計マスト、アンテナ (HGA及びMGA) が映り込んでいる。(Credit: ESA/BepiColombo/MTM)

XL-Calibur気球実験の北極圏フライト

日米瑞共同の気球実験XL-Caliburが、7月12日から18日の6日間にわたって実施され、気球はスウェーデンからカナダまでフライトしました。本実験は、硬X線の偏光観測によりブラックホールの幾何学的構造やパルサー風星雲内の磁場の様子を捉えることを目的としています。データ解析の結果はまたの機会に報告させていただくとして、今回はスウェーデン・キルナ市にあるSwedish Space Corporation (SSC) のEsrangle実験場での準備と打上げの様子をお伝えしたいと思います。

日本グループは硬X線望遠鏡を担当しており、コロナ禍の下、広島大学・大阪大学・沖縄科学技術大学院大学・東京理科大学のメンバーで、5月5日からフライト運用後の7月19日まで現地に滞在しました。5月中旬には、我々の望遠鏡を含め、ゴンドラの組み上げが完了しましたが、そこからはNASAの気球本体の船便を待ち続ける日々となりました。国際物流の遅延の影響を受け、当初の予定よりも1カ月以上遅れて到着し、フライトレディとなったのは6月23日でした。成層圏の風がスウェーデンからカナダまで十分な速度で維持される見通しが7月15日ま

でだったため、ここからは滞在している全員で天候を祈る日々が始まりました。

最終的には7回も打上げに挑戦し、6回は風向きや天候の影響によりキャンセルとなりましたが、期限3日前の7月12日に7度目の正直で見事に放球され、カナダへの長い旅をスタートさせることができました。この日はほぼ無風状態で、ゴンドラを支えている大型トラック (愛称ヘラクレス) が切り離

しまで微動だにしない、理想的な打上げとなりました (打上げの様子はYouTube*参照)。XL-Caliburチーム以外の人と一緒に、打上げの瞬間を拍手で祝ったのが記憶に残っています。私にとっては、2013年のPoGOLiteと2016年のPoGO+の2気球実験もEsrangle実験場から7月12日に打ち上げられたため、この日付には何かの縁を感じます。XL-Caliburは、カナダから無事に回収が済んだ後は、次回は南極での長期間フライトを計画しています。引き続きのご支援どうぞよろしくお願い致します。

キルナは北極圏のため、日本の夏とは大違いです。5月でも雪が残っており、6月になると1cm近い大型の蚊が大量発生 (屋外にいと1人に10匹以上が群がる) し、7月になるともう涼しい、という北極圏の夏をあらためて体験してきました。

(高橋 弘充)



打上げの様子。XL-Caliburのゴンドラが全長12m。気球とゴンドラを含めた全長は200mにもなり、上空40kmをスウェーデンからカナダまで6日間フライトしました。



5月にゴンドラの組み上げが完了した際の日米瑞XL-Caliburチームの集合写真。

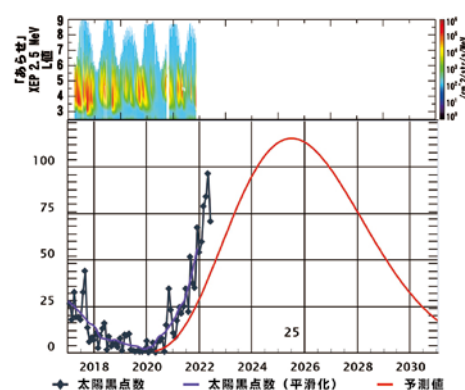
* NASA XL-Calibur Balloon launch attempt # 4
<https://www.youtube.com/watch?v=puU3o3cuvzc>

長期観測計画に基づく「あらせ」の後期運用延長

「あらせ」衛星運用は、2018年秋に定常運用から後期運用に移行していましたが、承認されていた2021年度末までの後期運用延長期間の満了に伴って、更なる運用期間の延長を申請しておりました。今回「あらせ」は、2019年12月からはじまった第25太陽活動周期の全体をカバーして、内部磁気圏・放射線帯変動を総合観測することを目的に、2032年度末までの10年間、観測運用を延長すること、および観測運用終了の翌年度に廃棄軌道への移行運用、停波運用を実施する計画を申請し、宇宙科学研究所にご承認いただきましたので、ご報告致します。

「あらせ」の観測運用は2017年3月から開始されましたが、現在までの約5年間の観測は、図に示すように第24から25太陽活動周期への太陽活動極小期に対応しました。「あらせ」はこれまでの観測で、非線形波動粒子相互作用による放射線帯高エネルギー電子の生成や消失の様相を明らかにしてきました*1が、これまでは、DST指数*2が-150より小規模な宇宙嵐しか観測できていませんでした。今後、太陽活動極大期に向けて、これまで以上に大きな宇宙嵐に遭遇する機会が増えると予想されますが、大きな宇宙嵐時においても非線形波動粒子相互作用の効果がどれほど寄与しているのかは、「あらせ」の大きな科学課題の1つです。太陽風の大規模構造や宇宙嵐の規模によって、ジオスペースは異なる変動を現すことが知られていますが、太陽風状態に対する応答としての宇宙嵐の多様性を解明す

るためには太陽活動周期に亘った観測が必要不可欠です。今回いただいた、この貴重な観測機会を活かして、ジオスペースの変動の様相を明らかにし、太陽圏科学に貢献して行きたいと考えています。また、新たな延長期間



「あらせ」が観測した放射線帯(2.5 MeV電子フラックス)の地球からの距離(L値)依存性と第25太陽活動周期の太陽黒点数の予測。

中に始まる新しい衛星・地上の観測計画との国際的な協調観測も計画しています。今後の「あらせ」の科学成果にもご期待いただくと共に、これまで同様、「あらせ」をご支援いただければ幸いです。

(篠原 育)

*1「あらせ」の科学成果の概要については、2022年2月に発行されたISASニュース「あらせ」特集号をご参照下さい。

https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews_arase.pdf

*2 宇宙嵐の大きさを表す指数で、負数で絶対値が大きくなる程、規模の大きな宇宙嵐を表します。

松本さんは、名古屋大学で早川 幸男先生(元名古屋大学教授・学長)のご指導の下、赤外線天文学研究を始めた仲間でした。私は、宇宙線物理からの転向を模索中でしたし、松本さんは、新進気鋭の修士課程の学生さんでした。そんなわけで、どちらも赤外線には無縁で、すべてがゼロからの出発で、大変苦労をしたことを思い出します。当時は、我が国の赤外線検出技術のレベルは低く、また、赤外線観測に必要な観測基盤は皆無の状態、先進国の米国との彼我の差は大きく、正攻法では敵わないので、特異な観測手法(偏光観測)や観測対象(拡散天体)を選んで、ゲリラ戦法で進むことにしました。

その後、私は、京都大学に移り、地上観測を中心に進めましたが、松本さんは、より挑戦的な、気球、ロケットを使った観測によって、大気光、黄道光などの観測から、天の川銀河の近赤外線マップの観測へと発展させていかれました。後者の観測は、10年後に行われたCOBE(宇宙マイクロ波背景放射観測衛星)に先駆けた観測になりました。その後、観測の重点を遠赤外、近赤外域での宇宙背景放射に向けられ、これが近赤外域での未知の放射成分の発見につながりました。

赤外線観測で最も重要な技術は、観測器を液体窒素、液体ヘリウム(超流動状態)を使って極低温に冷却することですが、これを真空、無重力状態のスペースで実現することは至難の業です。松本さんはこれをロケット実験によって実現されました。この技術は、その後のスペースシャトル利用の回収実験(SFU)でのIRTS(ミニ赤外線望遠鏡)実験、それに続く赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)の推進の原動力になりました。その後、これらの成功に勢いを得て、究極的な赤外線観測ミッ

ションSPICAが計画されてきました。これは、世界的にも高く評価され、その実現に大きな期待がかけられていました。計画の規模の大きさから、わが国独自での実行が難しいということで、ヨーロッパ(ESA)との共同ミッションとして進められてきましたが、開発途中での中断のやむなきに至ったことは残念なことでした。このように、松本さんは、我が国のスペース赤外線観測の推進に、終始指導的役割を果たし、リードされてきました。

一方、松本さんは、初期のロケット観測で見つけられた未知の近赤外線放射の追究を生涯かけて行われました。この放射は、桁違いに強い黄道光に埋もれたもので、両者の分離は至難を極め、その確認は容易ではありませんでした。それを、長年にわたって、様々な手法での観測を重ねられ、特殊な解析方法を導入されて追究されました。最近では、米国のグループとの共同ロケット実験や、また、ハッブル望遠鏡による深宇宙観測のデータを使った未知の天体の探索などで新しい展開が期待されていました。そして、亡くなる寸前まで、研究論文の発表をされるなど、まさに、生涯現役を貫かれた見事な一生でありました。

このようなかけがえのない仲間を失ったことは誠に残念で寂しい限りです。いまや、松本さんのご冥福をただただお祈りするばかりです。

(奥田 治之)



追悼
松本敏雄
名誉教授

銀河を 吹き渡る 風をみる

連載

第4回

XRISMの「眼」 Xtend開発を振り返って

XRISMに搭載されるミッション機器の1つ、XtendはX線望遠鏡(XMA)とCCDカメラ(SXI)から構成される軟X線撮像装置です。軟X線分光を担当するResolveとともにXRISMに搭載されます。Xtendの最大の特徴はその広い撮像視野です。30mm四方の大面积CCDを「田の字」状に4枚並べることで、満月より広い38分角四方を一度に収めることができます。観測研究において天体の構造から新しい事実が見つかることは少なくありません。例えばResolveが狙った領域の周辺で何が起きているかを知るのに、Xtendの広視野撮像が大きな役割を果たします。

XtendのCCDカメラSXIは、すでに衛星システムへの組み込みを終え、衛星試験を行なっています。開発としてはひと段落といったところですが、そこに至るまでにはチームとして並々ならぬ苦労がありました。ここでは、Xtendのこれまでの開発の経緯を簡単に振り返ってみたいと思います。

Xtendの前身は、ASTRO-H「ひとみ」に搭載されたSXIです。基本設計はこれを踏襲しています。ただしASTRO-Hで明らかになった課題に対処するため、Xtendでは多少の設計変更を行いました。少しでも質の高いデータを手に入れたというのは研究者の本然の欲求です。しかし、たとえ変更箇所が僅少であったとしても、それがフライト要求を満たすかどうかを確認するには、ほぼ一から性能検証をやり直す必要があります。

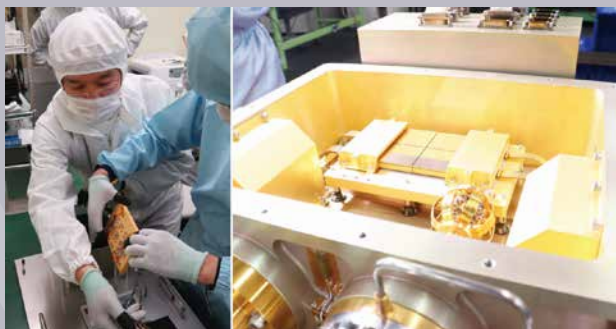


図1：(左) CCD素子をフライト品に組み込む林田清先生。(右) 4枚のCCDが並んだフライト品カメラ内部の様子。



図2：つくばで実施した機能試験の様子。手前がフライト品カメラ。

XRISM 打上げまでの短いタイムスケールで、メーカーと綿密にやりとりしつつ基礎データを収集し、仕様確定していくスケジュールの過密さが、Xtend開発における第一の山場でした。このような多事多端に対応するために、Xtendチームは全国の研究者や学生が一丸となって取り組みました。北は東北から南は九州まで、実験メンバーが相互に補助しながら試験・解析を進めることで、この過密スケジュールをなんとか乗り切ることができました。

第二の山場は、フライト素子の選定から地上較正までの一連の機能試験でした。X線CCDカメラを駆動するには、熱雑音を低く抑えるために素子を -100°C 以下に冷却し、結露を防ぐためカメラ筐体を真空に保つ必要があります。試験は24時間運転で行うため、停電などの不測の事態に備えて常時チームメンバー数名が張り付くことになります。折り悪しくCOVID-19で国内の行動制限が非常に厳しい時期でした。当番を確保するだけでも大変な状況が続きましたが、とにかく動ける人員が最優先で試験に臨むことで、この第二の山場もどうにか乗り越えることができました。

組み上がったフライト品カメラの機械環境試験が第三の山場でした。その間に、これまでチームを率いてくれた大阪大学の林田 清先生が急逝されるという大変悲しい出来事もありました。しかし、試験自体は不思議なほど問題なく終わることができ、衛星システムへの引き渡しを滞りなく行うに至りました。これまでに築いてきた体制の強固さが功を奏した形です。

ここで強調しておきたいのは、Xtend開発において、大学所属の若手研究者や学生の果たす役割が非常に大きかったということです。CCDのデータ取得から性能評価・検出器較正まで、目に見えにくい地道な作業はたくさんあります。Xtendチームが膨大な仕事を大過なくこなせているのは、彼らの八面六臂の活躍に負うところが大きく、それを通じて技術継承もうまく行え、多くの若手が育ってきたことを実感します。

こうして無事に衛星に組み込んだことで、Xtend開発としてはひと段落です。しかし今後の衛星試験から初期運用までが本当の正念場と言えます。引き続き気を引き締めて試験を行い、XRISMが打ち上がった暁には、天文学に新風を吹き込むような、大きな展望が拓ける(Xtend!)ことを期待しています。

Xtendチーム／京都大学 内田 裕之(うちだ ひろゆき)

匠の集団

— 科学衛星・探査機のことなら
おまかせください —

第 6 回

深宇宙追跡技術グループ

深宇宙追跡技術グループは深宇宙機の追跡及び軌道決定に関する地上系技術の開発と、深宇宙プロジェクト（プリプロジェクトなども含む）に対する技術支援を行うグループです。グループ員は、深宇宙通信や深宇宙軌道決定が専門の工学系研究者と、電波天文学や電波科学が専門の理学系研究者により構成されています。本稿ではこれまでの活動の例と今後のビジョンについてご紹介します。

日本における深宇宙軌道決定ソフトウェアの開発は、1985年に打ち上げられた日本初の深宇宙機「さきがけ」に端を発します。1960～70年代にNASA/JPLの主任研究員としてバイキング・ボイジャー計画の軌道決定を担当された西村敏充先生が1981年に宇宙科学研究所に着任されました。西村先生の主導で富士通の協力も得て5年間の期間をかけて軌道決定ソフトウェア「ISSOP*1」を開発し、「さきがけ」の運用に使用しました。

その後深宇宙機の打ち上げの度に軌道決定の機能は強化され、現在に至るまでJAXAの深宇宙軌道決定基盤ソフトウェアとして「ISSOP」の開発が継続しています。最先端の軌道決定技術を先行的に実証する目的で、JAXAインハウスの軌道決定ソフトウェア「DMOODS*2」の開発が2010年から始まりました。IKAROSでは、電波干渉技術を用いた高精度軌道決定手法であるDDOR*3機能を日本で初めて実装し、本ソフトウェアでその性能を実証しました。実証されたDDOR観測モデルは「はやぶさ2」打ち上げに向けて「ISSOP」に技術移転され、イオンエン

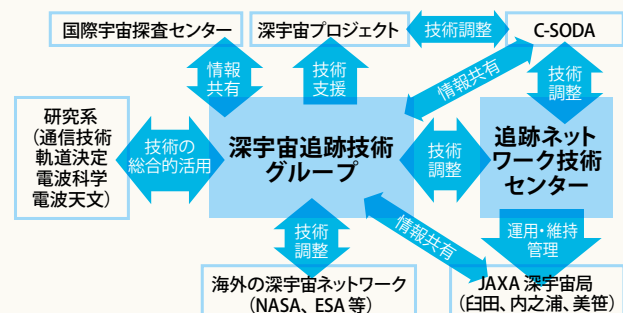
ジン運転中の軌道決定や、リュウグウ到着前の精密誘導など、「はやぶさ2」の運用で効果を発揮しました。リュウグウ滞在中にはLIDARと光学観測を用いて小惑星の軌道・重力場と探査機の軌道を同時推定する機能を「DMOODS」で実証しました。この機能は「火星衛星探査計画（MMX）」に向けて「ISSOP」に実装される事になっており、フォボスの近傍運用で利用される予定です。この例は、JAXAにおける先行的インハウス開発と、それを産業界に展開し安定的な定常運用に繋げるループの有効性を示す好例であると言えます。今後は「DMOODS」を国内外の深宇宙ユーザーに公開し利用拡大を図ることにより、NASA/JPLのような重層的な軌道決定コミュニティを日本でも育成することを目標としています。

深宇宙地上局における送受信系、電波記録系の開発も本グループが貢献する活動の一つです。美笹深宇宙探査用地上局開発プロジェクト（GREAT）では、本グループのメンバーがKa帯低雑音受信系の開発において主導的役割を果たしました。メーカー主導で開発が行われた送受信モデムや固体電力増幅装置についても、JAXA側インテグの立場でプロジェクトに貢献しました。高精度な深宇宙軌道決定実現のためには地上局アンテナ位置を数cmの精度で求める必要があります。電波天文観測用に開発されたIF信号系とDDOR計測用に開発されたデジタルバックエンドシステムを組み合わせ、アンテナ位置計測のための測地VLBIを行うシステムを整備しました。その後測地VLBIを定期的に実施する事により、高い地上局位置精度が維持されています。開発されたシステムを国内研究者が電波天文学・電波科学観測に活用する体制も整えられており、科学成果の創出につながっています。現在のシステムは受信機能に特化していますが、今後送信機能も付加し、衛星のテレメトリ・コマンド運用のモデム機能を後段の汎用PCでソフトウェア処理により実現するシステムの開発を目標にしています。

追跡ネットワーク技術センターや国際宇宙探査センターと協力の上、当グループが主導して、JAXA深宇宙ネットワークの将来構想の検討が行われています。2020年代の深宇宙ユーザー動向に基づき地上局の運用負荷を調査したところ、少なくとも2028年度まで臼田局を延命しないと要求を満たせないことが明らかになりつつあります。今後延命に向けた具体策の検討を加速する予定です。

海外深宇宙局ネットワークとの国際協力体制の構築も本グループの役割の一つです。JAXA地上局運用の余剰時間を海外地上局との間でバーターにより融通しあう協定を昨年度までにNASAとESAとの間で締結しました。世界の深宇宙局の局配置を俯瞰すると、東アジアに位置する日本は地理的にユニークな価値を有しています。例えば過去には火星探査機InSightの火星到着時に日本局によるDDOR計測が必要であったため協力要請（その後、打上げ延期により要請はキャンセル）があったり、今年打上げのNASAの新型宇宙船ORIONの地球帰還時に日本局での3-wayドップラ受信が求められていたりする事例が挙げられます。今年度も様々な探査機の運用の打診が内々に届いていますが、その際に日本側で迅速に対応できる体制の構築が課題になっています。どのような探査機でも対応できる仮想汎用衛星を局運用データベースに設定する対策を検討しています。

竹内 央（たけうち ひろし）



深宇宙追跡技術グループと他の組織・部署との関係。

*1 ISSOP: ISAS Orbit determination Program

*2 DMOODS: Deep-space Multi-Object Orbit Determination System

*3 DDOR: Delta Differential One-Way Ranging

宇宙・夢・人

Space Human Dream

》光り輝くプラズマに魅せられ 宇宙を行く

イオンエンジンの推力を3割上げる

——小惑星探査機「はやぶさ2」のイオンエンジンの開発に携わったそうですね。

大学院生のとき、「はやぶさ」のイオンエンジンの地上試験モデルを用いて、どうしたら性能を向上できるかを研究していました。いろいろなアイデアを試していく中で、設計を少し変更するだけで推力が3割向上することが分かったのです。宇宙研の助教となって「はやぶさ2」のイオンエンジンの開発に加わり、その変更を設計に適用しました。

——現在は拡張ミッション中です。状況は？

2026年にフライバイする予定の小惑星に向けて、順調に飛行していますが、送られてくるデータには、想定外のことも含まれます。イオンエンジンの寿命は、エンジン内部だけでなく、取り付けられている探査機表面の状態にも依存していることがわかってきました。探査機全体を地上では再現できないため、要素を絞って再現実験を行い、裏付けを行っています。また「はやぶさ2」開発時に仕込んでおいた運用モードが、この故障モードに対して真価を発揮し、拡張ミッションでも稼働し続けています。現在開発中のDESTINY+では、さらに長い運用時間が要求されており、探査機表面を含めて対策を施すことで、非常に完成度の高いものになるでしょう。

プラズマ診断法でイオンエンジンの進化に貢献

——第3世代のイオンエンジンは、どの探査機に搭載されるのですか。

小惑星フェイトンを探査する深宇宙探査技術実証機DESTINY+に搭載します。イプシロンロケットで低軌道に投入され、地球を周回しながらイオンエンジンで高度を上げて惑星間軌道に入るのですが、地球周回軌道でイオンエンジンを稼働させるのは初めてです。イオンエンジンから排気されるイオンビームは、ライフルの弾丸のように回転しながら排気されるため、推力だけでなく、(推力軸まわりに回転する)トルクも生み出します。地球磁場からの影響も考慮し、このトルクを最小化しなければならないというのが、大きな課題でした。

助教になったばかりのときに、イオンの流れを可視化してトルクと磁場の関係を精密に評価する研究に取り組みました。この成果にもとづいて、今回、トルクを最小化できる設計を100分の1mmの細かさで決めることができました。推力も向上し「はやぶさ」の5割増です。この研究をしていたとき、イオンエンジンの生みの親だった國中 均所長に「そんなものは役に立たない」と言われたことを覚えています。先日、所長に「役に立ちましたよ!」と言ってみました。

宇宙飛行工学研究系 准教授

月崎 竜童 (つきざき りゅうどう)

1984年、静岡県生まれ。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2013年よりJAXA宇宙科学研究所助教、2021年より現職。専門は電気推進。



——國中所長の反応は？

所長がイオンエンジンの研究開発を始めたころは、「何とか動けばいい」と言われていたそうです。「今は動くのは当たり前で、要求仕様が高度で難しくなっている。当時とは次元がまったく違う」とおっしゃっていましたね。確かにイオンエンジンは大きく進化しました。その進化に私の研究が少しでも貢献できたことは、とてもうれしいです。

——電気推進の今後は？

電気推進の特徴は燃費の良さであり、そのため宇宙機の小型化が可能です。一方で、超小型衛星では、電力が足りずプラズマを効率よく使うことができません。この課題を解決するために、イオン液体を使う電気推進機の研究を始めています。電気推進はさらに進化し、地球周辺から深宇宙まで、超小型から大型宇宙機に至るまで、必要不可欠なものになっていくでしょう。

電気の基本はミニ四駆で学んだ

——なぜ電気推進の研究をすることに決めたのですか。

小学生のとき、宇宙飛行士の毛利 衛さんの活躍を見て、宇宙に憧れました。中学生になると教科書に載っていた探査機ボイジャーが撮影した惑星の写真を見て感動し、将来は宇宙、特に探査に関わることをやりたいと思うように。大学では航空宇宙工学に進み、研究室見学のとき、電気推進機が吹き出すプラズマを初めて見ました。青紫色をした、とても美しい光でした。その光り輝くプラズマに魅せられ、電気推進の世界に入りました。

——子どものころ、宇宙のほかに興味があったことは？

ミニ四駆です。私が生まれ育った静岡県にはタミヤというプラモデルやミニ四駆で有名な会社があったので、友達もみんな夢中でした。電気や機械の言葉や仕組みは、ミニ四駆やラジコンで覚えました。

もう1つ、静岡の子どもが夢中になるのがサッカーです。私も小学生で始め、高校でも続けようと思ったのですが、部員が100人もいて同じポジションには全国大会出場の選手がいました。とても敵わないと、体験入部をやめました。走るのなら自信があったので陸上部に入り、種目は1500mから5000mに取り組みました。大学、大学院でも陸上を続け、箱根駅伝の予選会にも5回出ています。今でも5000mは15分台です!

——ご自身の強みは？

外交的で、相手の懐に無邪気に入っていくところですかね。無邪気に近付き過ぎて怒られてしまうこともあるのですが、打ち解けて合って裏表なく本音で話し合える関係になることは、研究でもプロジェクトでも、普段の生活でも大切だと思います。

編集後記

はるか遠くの金星で日夜起きている、昔から謎だらけだったスーパーオーテーションは、大気を持つ惑星では普遍的に起きていることには私も驚いた。日本の小さな探査機でここまで明らかにしてくれたかと想うだけで居ても立ってもいられない。

(田中 智)



ISASニュース No.497 2022年8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 藤本 正樹
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/株式会社トリッド

〒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。▶ <https://www.isas.jaxa.jp/>