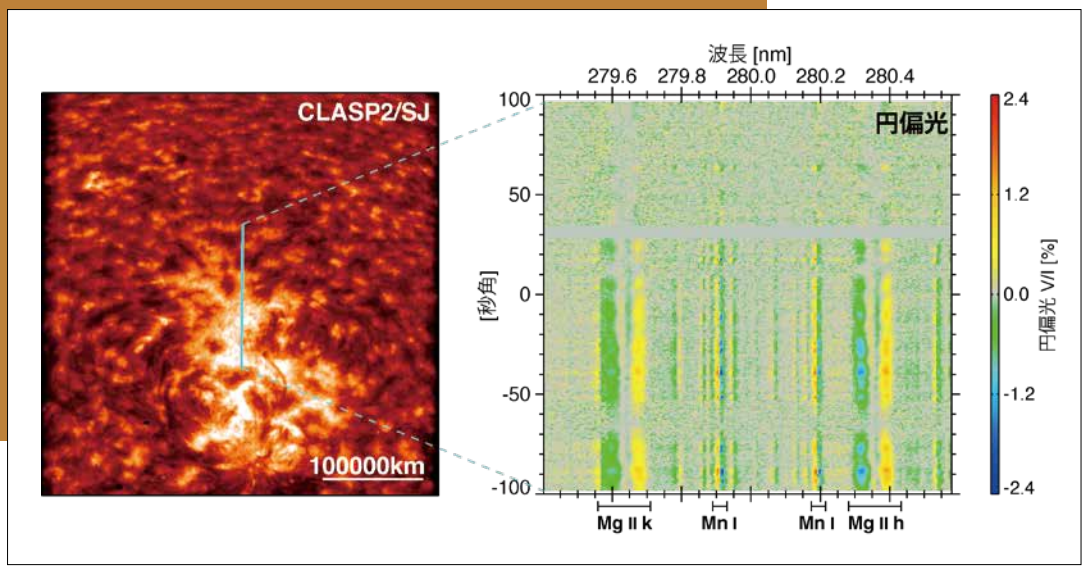
JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2022 10

No.499



ロケット実験CLASP2で観測された太陽彩層

左：CLASP2搭載のライマンα線スリットモニター撮像装置（SJ）で観測した活動領域の様子。水色の実線がスリット位置をあらわしており、この部分の偏光スペクトルを得た。
右：CLASP2偏光分光器で得られた活動領域の円偏光スペクトル。彩層底部から最上部に存在する磁場がゼーマン効果によって円偏光を発生させている。
（p.2参照）

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

観測ロケットで見えてきた新しい太陽の姿

国立天文台 太陽観測科学プロジェクト 准教授 石川 遼子（いしかわ りょうこ）

はじめに

大小様々なスケールの磁場が存在する太陽は、それによるダイナミックな活動現象に満ち溢れています。地球大気の影響を受けない宇宙からの観測は、紫外線やX線、均一かつ高空間分解能での観測が可能となることから、太陽活動を理解する上で必要不可欠です。宇宙からの観測といえば、観測衛星がよく知られていますが、本稿で紹介するのは、筆者が計画の取りまとめを行った、NASAの観測ロケットを利用したロケット実験CLASP2（Chromospheric LAyer Spectro-Polarimeter）、CLASP2.1の成果です。ロケット実験の観測時間は5分程度と圧倒的に短いですが、手っ取り早く宇宙へアクセスすることができます。科学成果を得るのはもちろん、新しい観測技術や観測アイデアを検証し将来への布石を打つことができるのが強みです。

残された謎とアプローチ

6千度の光球（太陽表面）の上空に、1万度の彩層そして100万度のコロナが広がっていることはよく知られています。さらに、彩層やコロナといった高温大気層は、ジェットや磁気流体波動といった動的現象に満ち溢れていることも、太陽観測衛星「ひので」などによって明らかになりました。しかし、どうやってこれらの動的現象が駆動されるのか、さらに、どのような仕組みで高温大気層を生成し維持できるのか、詳しいことはよくわかっていません。これらの謎を解明する鍵を握るのが、太陽を貫く磁場です。磁場は、太陽表面付近の対流による運動エネルギーを上空へ運ぶ役割を担っていると考えられており、その性質の理解は高い測定精度と空間分解能の2つを兼ね備えた「ひので」に搭載された可視光磁場望遠鏡により、大きく進展しました。しかし、その磁場観測は光球にとどまり、彩層やコロナの磁場を観測することはできません。彩層は、ガス圧優勢の光球から磁気圧優勢のコロナへ切り替わる領域であり、彩層の真ん中付近を境に磁場の振る舞いが大きく異なります。そのため、光球の磁場観測を使って上空の磁場の様子を推測することも極めて困難です。動的現象が起きている「現場」、つまり、光球より上空での磁場の直接観測が必要不可欠なのです。

観測ロケット実験CLASPシリーズのはじまり

これまで光球以外の磁場観測がほとんど行われていなかった大きな理由の1つが、その観測の困難さにあります。磁場の観測は偏光を測定することで行われますが、彩層～コロナ

図1：CLASP2観測装置（ロケットの外筒を半透明化した）。カセグレン望遠鏡（左側）、偏光分光器（右側）、スリットモニター撮像装置（中央部）からなる。

は磁場が弱く、生じる偏光はごくわずかです。彩層の磁場観測を目指した新たな装置開発が世界中で加速しており、地上からの観測では、近赤外領域のスペクトル線観測から磁場を測定する方法が追求されています。

一方私たちが着目したのが、当時前人未到であった「紫外線の偏光」です。紫外線は宇宙からの観測が必須で、太陽とはいえ輻射強度は弱く、その観測の難易度はさらに高くなりますが、彩層の最上部や遷移層[*1]といったコロナ直下にアクセスできるという大きな利点があります。2008年、日本の太陽研究者グループ、NASAの観測ロケット実験に精通したNASAマーシャル宇宙飛行センター（MSFC）、紫外線偏光の理論検討を進めてきたスペインの研究グループを中心とした5ヶ国による国際協力で、観測ロケット実験Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter（CLASP）が立ち上がりました。7年にわたる検討・開発の末、CLASPは、2015年9月、NASAの観測ロケットによって打ち上げられ、世界初となるライマンα線（波長122nm）の偏光分光観測に成功しました（詳しくはISASニュース2017年7月号[*2]参照）。CLASPで得られた観測データから、理論的に予測されていた散乱偏光がライマンα線で確かに発生すること、さらに、磁場によって散乱偏光が変調を受けるハンレ効果が働いていること、が明らかとなりました。一方で、ライマンα線のハンレ効果だけでは、彩層の磁場を精度良く決定することができないこともわかりました。そこで私たちは、次なる候補である電離マグネシウム線（波長280nm）の偏光分光観測に挑戦することにしました。電離マグネシウム線の最大の利点は、ハンレ効果に加えて、ゼーマン効果によって円偏光が生じることです。ゼーマン効果は、「ひので」可視光磁場望遠鏡はじめ、広く磁場導出に用いられており、確実に彩層の磁場を測定できると期待できます。これが、観測ロケット実験CLASP2のはじまりです。CLASP打上げ後間もない2015年のことでした。

観測ロケット実験CLASP2の開発

2016年末、NASAへの提案書が採択されたことを皮切りに、CLASP2計画は本格始動しました。CLASP2観測装置は、望遠鏡、スリットモニター撮像装置、偏光分光器の3つから構成されています（図1）。ライマンα線から電離マグネシウム線へ波長を変更するため、CLASP打上げ後MSFCで保管されていた観測装置を日本へ返送し、改造を施しました。高い科学目標を維持しつつも科学成果創出にいち早く漕ぎ着けるため、CLASPの主構造や光学素子を可能な限り再利用することで、開発期間の短縮と開発費用の抑制に努めました。

CLASP同様、CLASP2観測装置の開発も国際協力の下で進められました。回折格子をフランス、CCDカメラを米国から提供してもらい、それ以外の光学素子や構体の開発は、日本チームが国内外のメーカーと協力して進めました。紫外線で高い偏光精度を実現するのに必要不可欠となる紫外線用の偏光素子やコーティング開発は、分子科学研究所にある極端紫外光研究施設UVSORで行いました。各フライト品が完成した後は、国立天文台の先端技術センターにて組み立て、光学調整や偏光較正といった様々な性能確認試験を進めていきました。こうして、ほぼ予定通りの2018年11月、米国へ観測装置を送り出しました。まず、MSFCでフライトコンピュータとの噛み合わせや運用シミュレーションを実施しました。その後、観測装置をホワイトサンズ実験場（WSMR）へ持ち込み、1ヶ月半にわたる最終試験を経て、2019年4月11日打上げを迎えました（図2）。ロケットと観測装置は両方とも完璧に動作し、世界初となる電離マグネシウム線（波長280nm）域の偏光分光観測に成功しました。

CLASP2の開発は、CLASPで確立した試験手順や培った経験をフル活用することで、かなりスムーズに進めることができました。その一方で、CLASPでは発覚しなかった問題に直面し何度かヒヤリとする場面がありました。いずれの問題も、国内外のチームメンバーの協力を経て解決することができましたが、2回目だからといって過信してはいけないこと、ちょっとした違和感を大事にすること、の大切さを身にしみて感じました。

CLASP2の成果

CLASP2が行った約6分半の観測のうち、2分半にわたって実施した活動領域の観測では（表紙画像左）、スリットに沿ったほとんどの場所で、ゼーマン効果によって発生した電離マグネシウム線（表紙画像右、Mg Ⅱ k, Mg Ⅱ hと表記）の有意な円偏光を検出することができました。これは、彩層中部～最上部の視線方向磁場によるものです[*3]。さらに、同じくゼーマン効果による顕著な円偏光が検出されたことでその存在に気づいたのがマンガン線です（表紙画像右、Mn Iと表記）。このマンガン線は、スペインチームの輻射輸送計算により彩層底部から放射されることがわかりました。CLASP2は、「ひので」可視光磁場望遠鏡との共同観測にも成功しており、光球・彩層底・中・最上部の4層にわたる磁場情報を得ることができたのです（図3）。

図2：射場での集合写真。打上げ成功を祈願した達磨（上段中央）も一緒に。
（US Army Photo, White Sands Missile Range）

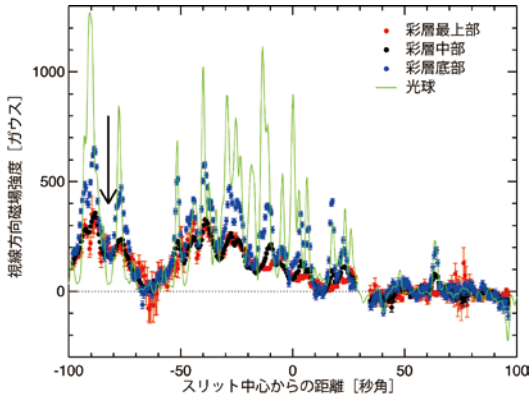


図3: 光球からコロナ直下に至る磁場分布。CLASP2のスリットに沿った各高さでの磁場強度を示す。（国立天文台, IAC, NASA/MSFC, IAS）

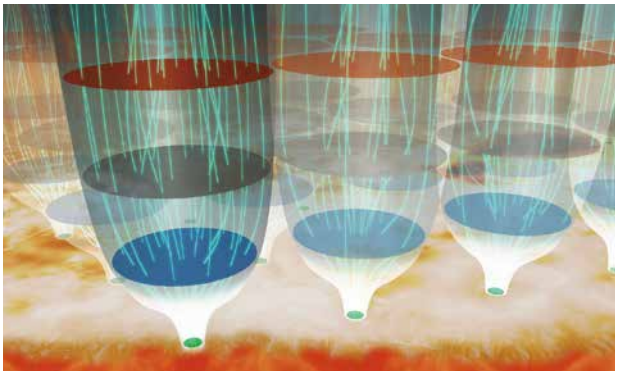


図4：観測ロケット実験CLASP2と「ひので」衛星の共同観測から明らかになった、光球から彩層最上部に至る磁束管の想像図。4つの高さ（光球、彩層底・中・最上部）で磁場を観測した。（国立天文台）

光球磁場の大きく変動した空間分布は、光球ではキュッとすぼまったチューブ状の「磁束管」が、互いに少しずつ離れて分布していることを示しています（図3の緑線）。一方彩層では（図3の青、黒、赤の丸）磁場の空間変動が小さくなっています。これは、光球に比べて急激に磁場強度が弱くなっていること、さらに、彩層底部から最上部に行くにつれて磁場が弱まっていることを示しています。また、局所的に光球の磁場が弱くなっている所で、比較的強い彩層磁場が存在していることもわかります（例えば図3黒矢印で示した場所）。これは、磁束管が彩層で急激に膨張し互いにひしめき合いコロナへ到達するという、これまでみなが想像するも、その観測的証拠が得られなかった光球からコロナ直下までの磁場の様子を示しています（図4）。また、強度スペクトルから求めた彩層上部の熱エネルギー密度が彩層最上部の磁場（図3の赤丸）と非常に高い相関を持つことがわかり、[1] 彩層加熱が磁場起因であること、[2] その加熱機構に迫る上で光球の磁場情報では不十分であり、彩層上部での磁場測定が必須であること、の2点を明瞭に示しました。

観測ロケット実験CLASP2.1

CLASP2により、彩層底部～最上部の磁場計測を可能とするマンガン線、電離マグネシウム線の有用性が明らかとなりました。私たちはこれをさらに追究すべく、CLASP2を発展させたCLASP2再飛翔計画（CLASP2.1）を立案しました。CLASP2.1では、観測装置の改造は行わず、ロケットの観測プログラムを変更することでスリットスキャンを行います。これにより、視線方向磁場の2次元マップ化と、複数スペクトル線による高さ情報と

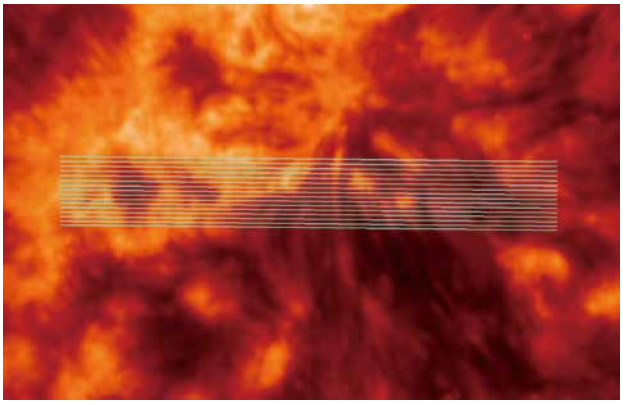


図5: CLASP2.1のスリットモニター撮像装置で観測した彩層。ロケットのポインティングを1.7”刻みで動かし、活動領域中の水色線で示した16ヶ所（200”x26”の領域）で偏光スペクトルを得た。

により、コロナへのエネルギー伝搬を担う磁場の3次元構造を明らかにすることを目指します。

2021年春、提案書がNASAに採択され、CLASP2.1が正式にスタートしました。コロナ禍での渡航と射場作業には様々な制限がありましたが、1ヶ月半に及ぶWSMRでの試験はおおむね順調に進み、2021年10月8日（現地時間）CLASP2.1の打上げに成功しました。そして、計16ヶ所、活動領域でのスキャン観測に成功しました（図5）。様々な形状を持つゼーマン効果由来の電離マグネシウム線、マンガン線の円偏光スペクトルが検出されており、データ較正および詳細解析を進めているところです。

最後に

本稿では、円偏光に着目した科学成果を紹介しましたが、CLASP2の観測では散乱偏光によって生じた直線偏光の観測にも成功しており、ハンレ効果が作用している兆候が得られています。また、観測データの解析と並行して、スペインチームが中心となって、直線偏光と円偏光両方のスペクトルを使って磁場を導出するインバージョンコードの開発も進めており、ゼーマン効果とハンレ効果を組み合わせた彩層のベクトル磁場の導出[*4]にも期待がかかります。

CLASP2、CLASP2.1は、紫外線の偏光分光観測によるコロナ直下の磁場測定という新しい太陽物理の扉をひらきました。現在、国内外の太陽研究者コミュニティでは、2030年代以降の将来計画の検討を進めています。紫外線の偏光分光観測による宇宙からの磁場測定は、太陽活動メカニズムの解明に迫る強力な手段になりうると期待されており、CLASPシリーズで培われた観測技術や科学成果が重要な役割を果たすことは言うまでもありません。

最後に、観測ロケット実験CLASP2、CLASP2.1は、小規模計画として採択され、科研費とのマッチングファンド方式で行われました。また、CLASP2立ち上げ時には、宇宙科学研究所国際共同ミッション推進経費により、基礎開発の着手をサポートいただきました。

＊1　1万度の彩層と100万度のコロナの間をつなぐ薄い大気層。温度が急激に変化する。

＊2　https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews436.pdf

＊3　電離マグネシウムｈ線とｋ線のスペクトル線中心付近は彩層最上部から放射され、スペクトル線中心から離れた波長域は彩層中部から放射される。これらの波長域の円偏光を区別して取り扱うことで、彩層最上部（図3赤丸）と中部（図3黒丸）の磁場を得ることができる。

＊4　円偏光は、視線方向の磁場によるゼーマン効果で発生する。一方ハンレ効果は、太陽表面から傾いた磁場の強度と向きに応じて、直線偏光に作用する。ゼーマン効果とハンレ効果を組み合わせることでベクトル磁場（磁場強度と向き）を導出できると期待される。

X線分光撮像衛星XRISM 熱真空試験

8月3日から9月3日の約1ヶ月をかけて、X線分光撮像衛星XRISMの熱真空試験を、筑波宇宙センター13mφチャンバで実施しました。熱真空試験の目的は、XRISMを、軌道上で遭遇する高温、低温の環境にさらし、衛星システムとしての熱設計の妥当性検証と、高温／低温環境下での搭載バス機器及びミッション機器の熱的／電気的性能を評価することです。熱制御ハードウェアの性能確認では、ヒートパイプ及びヒータ制御回路などの熱制御ハードウェアが設計通りに機能していることを、電気的性能の確認では、搭載バス機器及びミッション機器の電気的性能を、それぞれ確認します。熱真空試験を通じて、衛星が打上げに適した品質を有しているかを確認するため、この試験は、打上げに向けた試験として大きな山場の1つとなります。

熱真空試験に向けて13mφチャンバにXRISM衛星を搬入しているところ。

試験期間中、JAXAや大学等の数多くのチームメンバーが、衛星システムメーカーの皆さんと共に、24時間体制で試験に臨みました。また、試験を行う筑波宇宙センターだけでなく、相模原キャンパスからも関係者が機器の状態をモニターするなどしました。試験参加者同士、お互い情報を共有し、試験を円滑に進めることができました。試験期間中に、熱設計評価や機能性能確認に必要なすべてのデータを取得することができました。XRISMの観測機器、ResolveとXtendは、衛星搭載後、初めて低温真空下で動作させる機会でした。スムーズに試験が行えるよう、5月末から手順書を整備するなど、2ヶ月以上を費やして入念に事前準備にも取り組んできたこともあり、軌道上で使うコマンドの実証、キャリブレーションデータの取得など、すべての試験項目を予定通り完了することができました。現在、取得したデータの詳細な評価を行っているところです。熱真空試験を終え、XRISMは、また1つ大きな山場を越えたことになります。10月下旬から、もう1つの山場である音響・振動試験を予定しています。（生田 ちさと）

日本天文学会2022年秋季年会企画セッション「JASMINEが切り拓く近赤外時系列位置・測光天文学」開催

2022年9月13日から14日の1日半にわたって、新潟大学で行われた日本天文学会秋季年会企画セッションの1つとして、「JASMINEが切り拓く近赤外時系列位置・測光天文学」を開催しました。コロナ禍の収まりきらない状況の中、天文学会初めての現地参加とリモート参加のハイブリッド開催方式でしたが、学会および会場関係者の方々の努力により、とてもスムーズに進行できました。本セッションでは、現地約30人、リモート約60人に参加いただき、現地およびリモート参加者の両方からの発表や質問、議論が活発に行われ、きわめて有意義なセッションとなりました。

JASMINE計画は、JAXA宇宙科学研究所の公募型小型科学衛星計画3号機に選定され、2028年打上げ目標に向けて準備を進めています。JASMINE は、我々の天の川銀河（銀河系）の形成史の探究と、生命居住可能領域にある地球に似た系外惑星の探査の両方をターゲットにした意欲的なミッションです。本企画セッションは、国内の幅広い分野のサイエンスコミュニティからの声を集め、JASMINEが提供する近赤外線時系列位置・測光天文学という新しい軸の観測データを、より多くのサイエンスに有益なものにするための議論を行うことを目的に企画されました。

1日目の午前では、JASMINEチームから、JASMINE ミッションの概要と進捗状況が報告されました。午後には、銀河系サイエンスについての発表があり、すばる望遠鏡や電波、X線観測との連携についての議論がなされました。2日目の午前は、系外惑星や時系列測光観測を利用した研究についての発表があり、地球型惑星の発見についてJASMINEと、大阪大学が進めるPRIME望遠鏡やNASAのRoman計画との連携について議論されました。さらに、発見される地球型惑星の物理的および化学的特性を調べるための、すばる望遠鏡やESAのArIel計画との連携も議論されました。特に現地会場では、セッション後も活発な議論が続き、Gaia[*1]やTESS[*2]といった最近公開されたデータを利用している研究者から、どのようなデータ公開が最終的なミッションのインパクトにつながるかという意見を聞くことができ、大変有意義な機会となりました。

郷田直輝氏によるJASMINE計画概要の講演の様子。

末筆ながら、本企画セッションを支援して下さった年会関係者の方々、参加者の方々、世話人の馬場 淳一氏、松永 典之氏、河原 創氏、開催にご協力頂いた臼井 文彦氏に深く感謝します。

（英国 ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン　河田 大介）

＊1：2013 年に打ち上げられた ESA の位置天文衛星。　＊2：2018 年に打ち上げられた NASA・MIT のトランジット系外惑星探査衛星。

NASA Decadal Survey 太陽系科学編

2022年4月に、米国で惑星科学分野のDecadal Survey Reportが発表されました。Decadal Surveyは、National Academy of Science（米国科学アカデミー）が10年ごとに実施するコミュニティ主導のボトムアップ調査です。惑星科学分野のDecadal Surveyは、米国科学・工学・医学アカデミーの惑星科学・宇宙生物学分野の Decadal Survey 委員会が主催し、2023年から2032年の10年間に惑星科学、宇宙生物学、惑星防衛の分野を最大限に発展させるための研究戦略を明らかにしました。

惑星科学分野におけるNASAの探査ミッションは、小型、中型、大型ミッションという3つのミッションクラスに分かれており、それぞれに対応するディスカバリープログラム、ニューフロンティア・ミッション、フラッグシップ・ミッションと呼ばれる3つのミッションラインで主に実施されています。ここでは、今回の惑星科学分野のDecadal Survey Reportの中で最も重要な、フラグシップミッションの選定について紹介することにします。

フラグシップミッションは、NASAが主導する、NASAや米国にとって高い戦略的重要性を持ったミッションです。これまでに実施されたフラグシップミッションには、現在も活躍しているVoyagerや土星から素晴らしい映像を届けてくれたCassiniなどがあります。今回のDecadal Surveyの期間中に実施すべきフラグシップミッションとして、Decadal Survey委員会は2つのミッションUranus Orbiter and ProbeとEnceladus Orbilanderを選定しました。

1位で選定された、Uranus Orbiter and Probeの目的天体である天王星は、太陽系で最も興味深い天体のひとつで、極端に自転軸が傾いており、内部から放出されるエネルギーが低く、特徴のある大気運動、複雑な磁場を持っています。Uranus Orbiter and Probeはこの天王星の大気圏に探査機を送り込み、天王星周回軌道で大気、内部、磁気圏、環、衛星など天王星系のあらゆる側面を数年にわたって軌道上で観測するミッションです。

2位で選定された、Enceladus Orbilanderの目的天体である土星の衛星エンケラドスは、地下の海からガスや粒子が宇宙空間に噴出されている活動的な小さな氷衛星で、Enceladus Orbilanderは太陽系科学の最も基本的な問題の1つである、地球以外に生命が存在するのか、存在しないとしたらなぜ存在しないのか、という問いに答えることが期待されています。

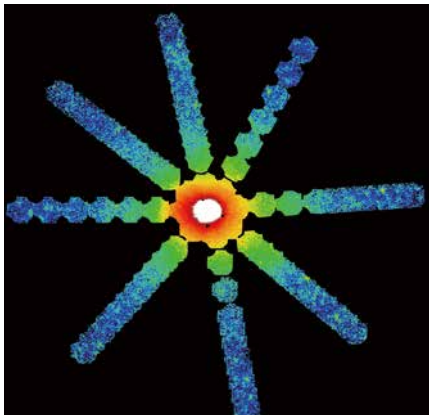
惑星科学分野のDecadal Survey Report からは、2023年から2032年の10年間の米国の惑星探査は、(1) 巨大惑星の探査と生命探査を今回紹介した大型のフラグシップミッションで目指しつつ、(2) 中型のニューフロンティア・ミッションのテーマとして、小天体のサンプルリターンミッション、外惑星やその衛星の探査、月探査、金星探査などの候補を選定することで太陽系の起源と進化の理解を目指し、(3) 競争的プロセスで選定され、高い打上げ頻度で実施される小型ミッションで、様々な科学探査を進める、という方向性を読み取ることができました。中型、大型のミッションの多くは日本単独で実施できる規模を超えた魅力的なミッションですので、海外パートナーとしてこれらのミッションに参加することを推進していきたいと思います。

（齋藤 義文）

「すざく」(ASTRO-EⅡ)プロジェクト終了

2005年7月10日にM-V6号機で打ち上げられ、2015年8月20日に観測の終了を宣言したX線天文衛星「すざく」(ASTRO-EⅡ)は、2019年11月29日の宇宙理学委員会による科学審査、2021年3月15日の所内の終了確認会を経て、このたび10月1日付で正式にプロジェクトを終了する運びとなりました。

「すざく」は10年余りに及ぶ観測を行い、多くの科学的成果を上げてきました。ISASニュース2008年3月号[*1]が「すざく」特集号となったほか、その後も宇宙科学最前線などに多くの記事が執筆されています。「すざく」の観測データは、研究者が利用しやすい形に処理・較正されたうえで公開されており、2016年10月に日米で公開されたアーカイブズ最終バージョンは、現在も研究への利用が続いています(ISASニュース2017年2月号)[*2]。ISASの「すざく」データアーカイブ[*3]では、「JUDO2」や「UDON2」というアプリを使って簡単に「すざく」データを眺めることができますので、ぜひアクセスしてみてください。



「すざく」による、ペルセウス座銀河団の観測結果。
（Urban et al. 2014, MNRAS 437, 3939 より）

「すざく」(ASTRO-EⅡ)。

プロジェクト終了にあたり、打上げ以来、お世話なったすべての皆様に深く感謝の意を表します。ありがとうございました。

（石田　学）

＊1：https://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.324/ISASnews324.pdf
＊2：https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews431.pdf
＊3：https://darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/

XRISM X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission

連載

銀河を吹き渡る風をみる

第6回

銀河の「風」の動きを見る観測装置Resolve

NASAで製作されたモジュールを、日本側で製作した真空断熱容器に組み込む瞬間の様子。2019年11月25日に住友重機械工業（SHI）新居浜工場にて、SHI/NASA/JAXA共同で実施。後方右端で青いマスクをつけて確認しているのが筆者。

ResolveはXRISMの搭載機器の1つで、X線反射望遠鏡とX線マイクロカロリメーターを用いた検出器システムで構成されます。本稿では後者についてご紹介します。

X線マイクロカロリメーターとは、X線光子を熱量（カロリー）として検出する装置です。光子を吸収するとそのエネルギー分だけ素子の温度が上昇するので、この温度変化から光子のエネルギーを計測します。Resolveでは素子を絶対温度0.05度（単位ケルビン：K）に冷やすことで、X線光子のエネルギーを0.1%の精度で決定します。これは現在広く使用されている半導体検出器より30倍も優れた性能です。元素は決まったエネルギー（波長）を持つ光を出すので、そのエネルギーと強さを調べることで、銀河をとりまく高温ガスの中にどんな元素がどのくらい存在するのか、どのような物理状態にあるのかがわかります。ドップラー効果により光の波長が変化することを利用すると、高温ガスの運動、いわば銀河を吹く「風」の速度もわかります。Resolveを使えばこれまでにない精度でそれらを測定できるようになるのです。

X線マイクロカロリメーターを用いた衛星搭載装置の開発は、ASTRO-E、ASTRO-EⅡ（「すざく」）、ASTRO-H（「ひとみ」）の3衛星にわたって、日米国際協力によって進められてきました（注：ASTRO-Hからは欧州も加わりました）。しかしながら2000年打上げのASTRO-Eはロケットの不具合により軌道投入に失敗、2006年打上げのASTRO-EⅡでは打上げ後に装置の不具合により液体ヘリウムが失われ、観測を開始することができませんでした。冷却システムの設計や開発体制を抜本的に見直したASTRO-Hでは、ペルセウス座銀河団を観測し、「30倍優れた」スペクトルデータを取得することに成功しました。世界で初めて目の当たりにする本当に素晴らしいデータでした。しかしながら今度は衛星の不具合により機能が停止しました。XRISM搭載のResolveは私にとって4度目の挑戦です。

Resolveの特徴の1つは極低温です。Resolveの設計は基本的にASTRO-Hと同じで、液体ヘリウムで1Kの熱浴を作り、そこから断熱消磁冷凍機を用いて素子を0.05Kに冷やします。ヘリウムタンクの周囲を機械式冷凍機で冷やすことにより、30Lの液体ヘリウムを3年以上保持する計画です。ResolveのX線受光部の大きさはわずか5mm角しかありませんが、それを0.05Kに冷やすために非常に「大掛かりな（質量約300kg）冷却装置」と「質量」が必要になるのです。また、ASTRO-EⅡの失敗を踏まえて、ASTRO-HやResolveでは万が一液体ヘリウムが失われても機械式冷凍機と断熱消磁冷凍機だけで0.05Kに冷却して観測を続けられる設計にしています。もう1つの特徴は、X線マイクロカロリメーターは感受性が高く、X線だけでなく振動や電磁ノイズ等、あらゆるノイズ擾乱を拾ってしまう可能性があり、ノイズ対策が重要であるという点です。ASTRO-Hでは開発当初、機械式冷凍機の振動の影響で本来の性能がまったく出ず、大変苦しめられましたが、その対策はASTRO-Hで実施済みであり、Resolveでは大きな問題にはなっていません。もちろん、Resolveで苦労したこともあります。最大の危機は、NASAで製作されたセンサと断熱消磁冷凍機を含むモジュールを組み込んで、真空断熱容器の組み立てが完了した後に、低温での液体ヘリウムの漏れが見つかったことです。極低温に冷やした時だけ発生するいちばん厄介な漏れで、結局真空断熱容器の蓋を開けてNASAのモジュールを組み込んだ直後の状態まで戻し、日米チームで検討・試験を繰り返して漏れ原因を探して塞ぎました。コロナ禍の影響もあってチームメンバーの往来にも苦労があり、問題解決に1年以上かかりました。Resolveの開発フェーズの中でも非常に苦しい時期でした。幸いなことにその後は大きな問題はなく、2022年3月には装置としての試験を終え、現在は衛星としての試験を実施中です。

Resolveという言葉には分解するという意味の他に決意や不屈という意味があり、X線のエネルギーを高い精度で分解するという装置の特性を示すと同時に、今度こそX線マイクロカロリメーターによる精密X線分光観測を実現させるというチームメンバーの強い思いが込められています。打上げまであと一息のところまで来ました。XRISMがもたらす宇宙の新たな発見にご期待下さい。

ResolveサブPI　藤本 龍一（ふじもと りゅういち）

宇宙科学の未来を切り拓く

連載

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 8 回

コンタミネーションコントロールはお任せください: 地球外物質研究グループ

地球外物質研究グループが正式な組織として立ち上がったのは、イトカワ試料の受入れ後の2015年です。正式な組織になる前は、「はやぶさ」が試料を持ち帰る前の2006年に技術系職員1名と太陽系科学研究系の教授1名の構成で、「はやぶさ」が持ち帰る試料受入設備を整備する目的で活動がスタートしています。

キュレーションというと、リターンサンプルを非破壊、非汚染の環境で管理保管し、試料のカタログ情報を取得公開すると同時に、国際公募研究への提供を行っている組織と理解されるかもしれませんが、その業務を遂行するために蓄積された知見や、開発整備された各種装置や実験環境などは、広くグループ外の方にも開放されており、実際に様々なユーザーの方が利用されています。具体的には、リターンサンプルを扱っているクリーンチャンバー以外にも、クリーンルームには、走査型電子顕微鏡や、試料加工装置、グローブボックスなどがあり、清浄な環境で試料を加工分析することができる環境を提供しています。クリーンルーム外にも、透過型電子顕微鏡や、走査型電子顕微鏡、収束イオンビーム加工分析装置(FIB-SEM)や電子線マイクロアナライザー(EPMA)などがあり、所外の物質科学研究者が持ち込みの地球外物質試料の分析研究をするために来所するだけでなく、JAXA内の理工学研究者なども実験などで生成したサンプルを持ち込んで分析されることもあります。装置利用以外にも、施設内で生成している超純水はフライト品などの洗浄や清浄化に利用されたりすることもあります。またキュレーションでは、チャンバー内環境を高い清浄度レベルで維持するために、高純度な窒素ガスの生成と清浄化を行う装置を整備しているだけなく、大気圧イオン化質量分析計(API-MS)などの環境モニタ装置でその環境を評価することができます。最近はガスクロマトグラフ質量分析装置(GC-MS)を整備して、これまで外注して実施していたクリーンルームなどの環境モニタを、自前でも評価できる能力を身に着けました。

リュウグウ試料受入時メンバーの集合写真。

リュウグウ試料受入前リハーサルの様子。

地球外物質研究グループでは、貴重なリターンサンプルの汚染を極力避けるために、チャンバー内やクリーンルーム環境を高い清浄化レベルで維持するために、持ち込む物品の清浄化や、サンプル採取装置および関連物品の清浄度管理(コンタミネーションコントロール)にも気を配っており、そのノウハウを持っていますので、将来のサンプルリターンを検討する際や、探査機の清浄度が重要になる際には、そのノウハウを活かした協力が可能です。もう1つのグループの特徴は、試料ハンドリング装置も自前で開発しているところです。試料ハンドリングのツールは様々なものが市販品でもありますが、試料への汚染を気にすると、試料に触れる部分やチャンバー内に持ち込む物品の素材を吟味し、汚染が極力少ないものに置き換えたり、ハンドリング方法を変えたりする必要があります。具体的な例として、「はやぶさ」のμmサイズの試料を扱うために開発された静電制御マニピュレータや、「はやぶさ2」のmmサイズの試料を扱うために開発された真空ピンセットがあります。現在は、火星衛星探査計画(MMX)などの大量サンプルを効率よくハンドリング分析できる装置の開発を進めています。

「はやぶさ2」の試料受入れを経験して、無機、有機さらには微生物の観点での汚染管理のノウハウが蓄積されており、将来的には、宇宙検疫の分野にも貢献できるよう考えています。現在2023年秋に地球帰還予定の小惑星ベンヌ[*1]の試料の受入れの準備として、総合研究棟1Fのクリーンルーム拡張工事を行っています。その後専用のクリーンチャンバーを導入する予定です。また2024年度打上げ予定のMMXは火星衛星のフォボスから2029年に試料を持ち帰る予定で、その試料受入れの準備も進行中です。

地球外物質研究グループはホームページ[*2]での情報発信を行っています。ご興味ある方はぜひお立ち寄りください。また、施設利用の相談などは同ホームページの施設利用案内 問合せ先よりお願いいたします。

安部 正真(あべ まさなお)

＊1 「Bennu」の日本語表記として「ベンヌ」という表記がメディアでは一般的に用いられますが、英語の発音に近いのは「ベヌー」です。
＊2 https://curation.isas.jaxa.jp/

東奔西走

「はやぶさ2」帰還以来のオーストラリア

科学推進部
亀崎 沙紀子（かめさき さきこ）

2022年8月上旬、オーストラリアの三都市（南オーストラリア州アデレード、ビクトリア州メルボルン、首都キャンベラ）に出張しました。2020年12月に南オーストラリア州ウーメラでの「はやぶさ2」サンプルリターンカプセルの回収に多方面から協力いただいた、オーストラリア宇宙庁や国防省をはじめとする関係機関に直接謝意を伝え、ミッションの成果を報告することと、今後の協力に向けた調整開始することを目的としていました。

私にとっては2020年11月～12月のカプセル回収活動以来のオーストラリアでした。前回は新型コロナウイルスの関係で外国人は原則として入国できない状況だったため、宇宙庁や在オーストラリア日本国大使館等多方面から支援いただき、特例で入国許可を得たうえでの出張でした。また入国後はすぐにバスで指定のホテルに移動し、各自の部屋から一切出ることなく2週間待機する必要があった当時と比較すると、8月上旬の時点で入国に関する諸制限はほぼ撤廃されており、だいぶ状況は変わってきていることを感じました。他国と同様に人の往来が抑えられていた間、航空会社や空港は減員されていたということで、出入国審査や保安検査に時間を要し乗り継ぎがぎりぎりになって走ったり、何度かフライトが遅延したりする場面もありましたが、約1年半前、新型コロナへの対応が世界的にまだ手探りであった時期にJAXA回収チームの活動を受け入れてもらったこと、そして困難な時期を経て再び渡航できる環境が維持されてきたことに改めて感謝したいと思いました。

今までのオーストラリア出張は「はやぶさ2」のカプセルの着陸許可を得るための調整が主でしたが、今回は宇宙関連の大学の研究機関や新興企業等も訪問することができたこともあり、従来とはまた違う角度でオーストラリアを見る機会になりました。1つは、宇宙関連産業の急速な進展について。情報としてはこれまでも見聞きしていたところではありますが、今回は体感できた、という印象でした。もともと「はやぶさ2」でお世話になったウーメラの試験場で1960年代から欧米のロケット打上げ実験が実施されるなど、オーストラリアの宇宙開発の歴史自体は古いのですが、国内における発展の方向性があまり明確でなかったそうです。近年大きな変化を遂げており、2018年の宇宙庁設立を機に国全体の戦略が取りまとめられつつ、安全保障分野との連携、産業育成、雇用創出、将来の人材確保に向けた教育など、各州が裁量を持つ分野においては州単位で政策が展開され注力されていることがよく分かりました。例えば南オーストラリア州の取り組みとして、アデレード中心部に“Lot Fourteen”と称する産業やイノベーションを促進するエリアが整備されています。宇宙庁の本部が設置されているとともに、管制室も備えた見学施設“Australian Space Discovery Centre”が一般に開かれ、宇宙庁などから超小型衛星を受注しているInovor Technologies社をはじめとする複数の宇宙関連企業などが入居しているなど、多くの人や情報が集まる拠点となっていました。現在新しく“Innovation Hub Centre”が建設されており、さらに活気にあふれていく様子を想像しました。

真冬のメルボルン大学。

もう1つは、宇宙分野への取り組みにも表われているように各州・準州の独立性が高いことです。新型コロナ対応についても州ごとの規制の違いが大きいため、2020年の出張の際にもまず日本からどの都市に入国するか、他州から南オーストラリア州への移動の際にはどのような制限があるか、などを確認していたことを思い出しました。各州はもちろん協力関係にあるものの、適度に競争力も働いているとのこと。1週間の間に国内線で乗り継ぎを含めると4ヶ所を移動したことで、感覚的にですが街や人々の雰囲気の違いを楽しむことができました。

「はやぶさ2」をとおして、今回は残念ながら会えなかった方を含めオーストラリアの多くの方と関与し、文化に触れることができています。まだ出会えていないこと、深く知ってみたいことが多くあることを実感し、さらに発展的な協力に期待できる機会になりました。

編集後記

OMOTENASHI/EQUULEUS を搭載した SLS 打上げの記事を載せることを楽しみにしていましたが、初号機の打上げはいつも大変ですね。産みの苦しみを乗り越えて、今年中に打ち上げられることを期待しています。天候で遅延していた若田さんは無事に ISS 到着でほっとしています。（石川 毅彦）

ISASニュース No.499 2022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　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/