

木星氷衛星探査機 JUICEの打上げ風景

JUICEは、現地時間2023年4月14日（金）9時14分にフランス領ギアナ・クールーのギアナ宇宙センターから打ち上げられました。当初の打上げ予定日は前日の13日でしたが、雷のため打上げ予定時刻の約10分前に延期となりました。14日も曇りの天気でしたが、JUICEは閃光と共に、煙を残して力強く飛び立って行きました。（p.6 参照）
[撮影] 上段：小林 正規（千葉工大/PERC） 下段：齋藤 義文（宇宙研）



The Forefront of Space Science

宇宙 科学 最前線

観測と衛星搭載装置開発の両輪で探る 活動銀河核セントラルエンジン

大阪大学 宇宙地球科学専攻 助教 野田 博文（のだ ひろふみ）

はじめに

宇宙に数多く存在する銀河の中心には、太陽の100万倍から10億倍ほどの質量を持つ「超巨大ブラックホール（Super-Massive Black Hole; SMBH）」が1個ずつ存在します。我々が暮らす銀河系も例外ではなく、「いて座A*」という名の太陽の400万倍の質量を持つSMBHが中心に潜んでいます。これらのSMBHが周囲から大量の物質を飲み込むと、物質の重力エネルギーを変換することで、銀河全体を凌駕する光度の電磁波の放射や高速のプラズマ噴出流を生成する「活動銀河核（Active Galactic Nuclei; AGN）」が現れます。このAGNの放射や噴出流は、銀河や銀河団の広範囲に影響を及ぼし、宇宙が現在の姿に進化する過程で重要な役割を担ったことが分かっており、宇宙科学の重要な研究対象となっています。私はこれまで、物質の重力エネルギーを変換して放射や噴出流を生み出す根源、いわばAGNの「セントラルエンジン」を理解すべく、AGNからのX線などの観測、そしてX線を捉えるための新たな衛星搭載装置の開発を両輪に研究を進めてきました。本稿では、第15回宇宙科学奨励賞の対象となった研究および

関連する内容についてご紹介します。

活動銀河核セントラルエンジンの観測的研究

セントラルエンジンは、SMBHに吸い込まれていく物質の流れの中でSMBHの最も近くに形成され、X線を放射する高温プラズマ領域「コロナ」と、紫外光や可視光で輝く円盤状の高密度領域「降着円盤」から構成されと考えられます。これらの領域がダストに囲まれた複雑なシステムである上に、見かけのサイズが非常に小さく、空間分解も困難です。そのため、どのような物理状態や空間構造の物質の流れが強い放射を生み出しながらかSMBHに吸い込まれていくのか、物質の量が変わるとどう変化するのかなど、根本的な理解が未確立のままでした。

そこで私は、0.3–600キロ電子ボルトという広帯域のX線を高感度で同時にカバーできる日本の5番目のX線天文衛星「すざく」を使い、AGNを調べることにしました。特に、SMBHが吸い込む物質の量が時間変化することで生じるX線の激しい強度変動に着目し、異なるエネルギーのX線同士の強度変動の相関を利用して、放射を成分に分解する独自の解析

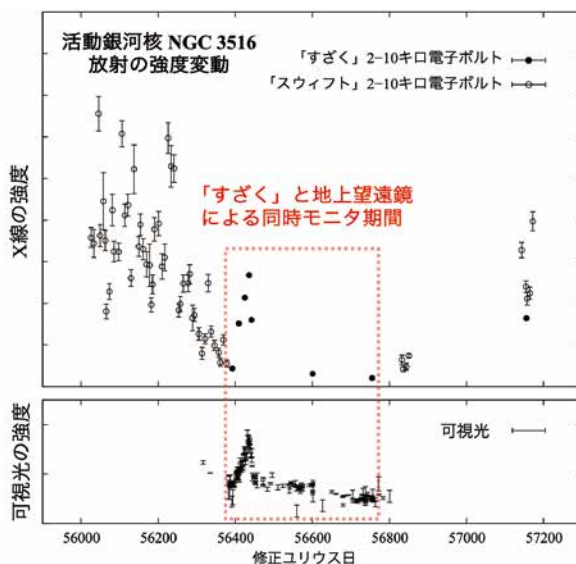
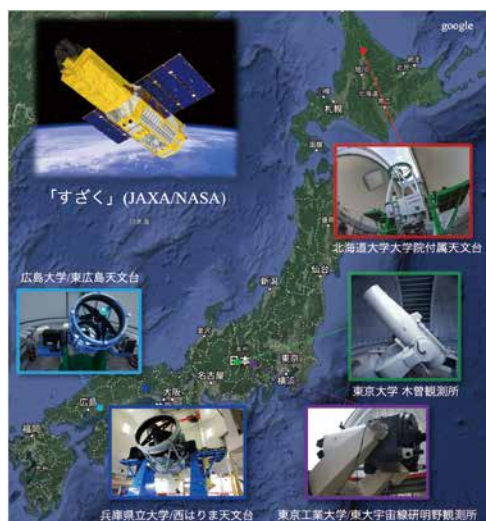


図1：活動銀河核NGC 3516のモニタ観測に用いた「すざく」と日本各地の地上可視光望遠鏡（左）と観測したX線および可視光の激しい強度変動（右）。高温コロナからのX線と降着円盤からの可視光の強度の相関から、セントラルエンジンの空間構造に関する知見が得られた (Noda et al. 2016)。

手法を考案しました (Noda et al. 2011)。この手法を「すざく」の様々なAGNのデータに適用したところ、セントラルエンジンには一般に、強度変動が激しいX線を放射する電子温度が10億度程度の高温コロナと、あまり強度変動の激しくないX線を生み出す100万度程度の「暖かい」コロナが共存することを突き止めました (Noda et al. 2013)。

次に、セントラルエンジンの空間構造に迫るため、「すざく」と日本各地の1.5メートル級の地上望遠鏡5台を動員し、AGNからのX線と可視光を同時にモニタ観測しました (図1)。その結果、X線と可視光の強度が足並みを揃えて変動し、X線が可視光より数日先行することを突き止めました。これは、高温コロナが降着円盤と隣接し、X線が円盤を照らして温度を変えることで生じると考えられ、高温コロナが光の速さで数日かかるほどの広がりを持つことを示唆します (Noda et al. 2016)。さらに、SMBHに吸い込まれる物質の量が数年で1桁以上減少したAGNのX線、紫外線、可視光の同時観測データを調べたところ、物質が大量に吸い込まれる時に存在していた暖かいコロナや降着円盤が、物質の量が減少すると、高温コロナへと蒸発して消える「状態遷移」と呼ばれる構造変化が起きたことを確認しました (Noda & Done 2018)。状態遷移は理論研究から予言され、質量がSMBHの約1千万分の1の、恒星が超新星爆発を起こして死んだ後に残る「恒星質量ブラックホール」では度々発見されていた現象ですが、SMBHでは確実な証拠が乏しかったため、SMBHと恒星質量ブラックホールを統一的に理解するための重要な結果として注目を集めています。このように、X線を中心とする多波長の強度変動を捉えることで、図2に示すセントラルエンジンの描像を得ることができました。

X線天文衛星ASTRO-H搭載検出器の開発

セントラルエンジンの理解には、そこに燃料（質量）を供給するAGNのより外側の領域の研究も不可欠です。この領域を調べるには、コロナからのX線が周辺の物質と相互作用して生じる輝線や吸収線を捉えるのが有効な方法の1つで、そのプロファイルや強度を精密に測定できれば、質量供給源の物質の運動状態や空間構造などを詳細に調べることが可能

になります。この目的のため、私は、従来のX線検出器よりも約30倍高いエネルギー分解能で精密X線分光を実現する「X線マイクロカロリメータ」を搭載する日本の6番目のX線天文衛星ASTRO-H（「ひとみ」）の開発に貢献してきました。

2009年に大学院（注1）に入学してからは、X線マイクロカロリメータとともにASTRO-Hに搭載する、エネルギーが高いX線を捉えるための検出器「硬X線撮像検出器」および「軟ガンマ線検出器」の開発に携わり、特に「熱設計」に貢献しました。地上では、例えばパソコンのCPUなどはファンを取り付けておけば効果的に冷却できますが、衛星軌道上では大気が無いいため、この方法では冷却できず、「熱伝導」と「熱放射」のみで検出器を許容温度に安定に制御する必要があり、重要

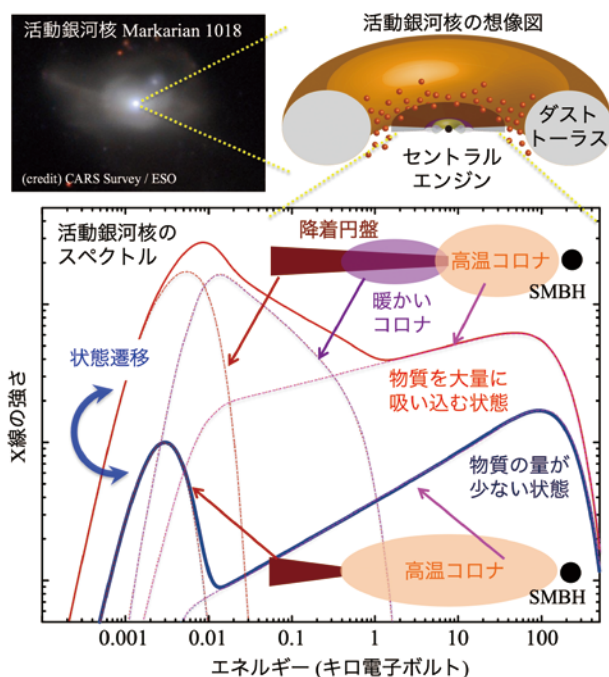


図2：活動銀河核Markarian 1018の可視光画像（左上）、活動銀河核の想像図（右上）、および本研究で得られたセントラルエンジンの描像（下）。超大ブラックホールに吸い込まれる物質の量が多いと高温コロナ、暖かいコロナ、降着円盤の三領域が現れ (Noda et al. 2011; 2013)、量が減少すると、暖かいコロナと降着円盤の一部が高温コロナへと蒸発して消え、状態遷移が生じる (Noda & Done 2018)。

な開発要素の1つです。そこで、熱伝導で効果的に熱を輸送する熱部材を新たに追加したり、外部からの熱放射を極力抑えるためのデザインを提案し、数値計算と実験で検証しました。大学院を修了する時には、センサーを軌道上で許容温度に保つ熱設計を確立することができました。

その後、2014年にポスドク(注2)になるタイミングで、熱制御が極めて重要となるASTRO-H搭載のX線マイクロカロリメータの開発に参入しました。X線マイクロカロリメータは、衛星軌道上でセンサー温度を50ミリケルビンという極低温に安定に保つことで、X線光子が入射した際の温度上昇を正確に測定し、入射したX線のエネルギーを精密に測る検出器です(図3)。衛星軌道上でセンサーを極低温に安定に保つために、複数の機械式冷凍機、多段式の断熱消磁冷凍機、そして液体ヘリウムの蒸発を組み合わせた複雑な冷却システムを用います。無重力下で液体を保持し、蒸発した気体のヘリウムのみを排出するために、ヘリウムタンクの出口に多孔質の栓がついていますが、この相分離器が正しく動作するためには液体ヘリウムが常に超流動状態(温度2.17ケルビン未満)でなくてはなりません。ヘリウムの排気と冷凍機の運転を続けていればこれを上回ることはありませんが、ASTRO-Hを打ち上げる際、地上で双方を止め、軌道上で再開する必要があります。そのため、仮に想定外の事象が生じて液体ヘリウム温度が高まったとしても軌道上で超流動状態が破れないためには、打上げ時にどのくらいの温度まで許容できるかが重要な研究テーマでした。私は、JAXA筑波宇宙センターでの地上試験に全面的に貢献しながら熱数学モデルの改良と較正を重ね、様々なケースを想定した熱解析を実施し、打上げ時のヘリウムの許容温度や軌道上で冷凍機の運転を開始するタイミングを割り出しました。この結果は、実際にASTRO-Hを載せたH-IIAロケット30号機の打上げ条件の1つに採用されるなど、打上げに不可欠な研究となりました(Noda et al. 2018)。

ASTRO-Hの打上げと成果、そしてXRISMへ

2016年、JAXA種子島宇宙センターでの打上げ運用に全面的に参加し、慎重な運用の結果、条件を満たす液体ヘリウム温度を達成したことを確認しました。そして、2月17日17時45分、ASTRO-Hを載せたH-IIAロケット30号機が打ち上げられました。打上げ後、無事にヘリウムの排気を開始し、冷凍機も立ち上げ、X線マイクロカロリメータを軌道上で稼働することに成功しました。数値計算の結果は実際の温度推移を良く予測できており、熱数学モデルが内部の熱流や温度を高い精度で再現できていたことがわかりました(図3)。

ASTRO-Hはペルセウス座銀河団を観測し、X線マイクロカロリメータによって世界で初めて天体の精密X線分光に成功しました。その結果、従来にない精度で銀河団の高温プラズマの運動を制限でき、中心のNGC 1275というAGNからの噴出流が激しくぶつかっているにも関わらず、高温プラズマの乱れた運動が意外にも静かであることが分かりました(Hitomi Collaboration 2016)。しかし、本格観測に向けて準備が進んでいた矢先、大変残念なことに、ASTRO-Hに姿勢異常が起こり、打上げから約1ヶ月後にその観測寿命を終えることになってしまいました。ASTRO-HでAGN研究を飛躍させてやろうと意気込んでいたので、事故の直後は落胆しましたが、ASTRO-Hが残した観測データを余すことなく成果につなげようと、データ解析に力を注ぎました。その結果の1つとして、6.4キロ電子ボルトに現れるAGN内部の中性鉄原子からの蛍光輝線を初めて精密分光でき、セントラルエンジンの周囲を取り囲み、質量を供給する役割を果たす「ダストオーラス」(図2)の空間構造や形成メカニズムについて、これまでにない理解が得られました(Hitomi Collaboration 2018)。

ASTRO-Hの事故の後しばらくして、後継機となるX線分光撮像衛星XRISMが立ち上げられました。私は2018年、X線マイクロカロリメータとともにXRISMに搭載する、38分角四方という広視野を撮像分光するX線CCDカメラの開発の主要機関である大阪大学に着任し、そこからはX線CCD開発に貢献してきました。衛星に搭載するためのCCD素子の測定システムを大学の研究室に立ち上げ、性能の良い素子を衛星搭載品として選定し、地上キャリブレーション実験を完遂し、現在は衛星に搭載した状態で良い性能を発揮しています。XRISMはこれまで順調に開発が進み、いよいよ今年度打上げ予定という段階まで来ました。今後もXRISMの成功に向けて貢献し、AGNはもちろん、様々な天体の理解を精密X線分光によって深め、宇宙科学をさらに発展させられるよう、研究に取り組んでいきたいと思っています。

最後になりますが、この度、第15回宇宙科学奨励賞を受賞するにあたり、これまで支えていただいた全ての方々、ともに開発に取り組んできたASTRO-HならびにXRISM国際チームの皆様にこの場をお借りして心から感謝申し上げます。

最後になりますが、この度、第15回宇宙科学奨励賞を受賞するにあたり、これまで支えていただいた全ての方々、ともに開発に取り組んできたASTRO-HならびにXRISM国際チームの皆様にこの場をお借りして心から感謝申し上げます。

(注1) 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 牧島中澤研究室(当時)にて大学院時代を過ごした(私の所属は天文学専攻)。

(注2) 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 玉川高エネルギー宇宙物理研究室に基礎科学特別研究員として所属。



図3: H-IIAロケット30号機によるASTRO-H打上げの様子(左)、X線マイクロカロリメータ(SXS)の構造(右上)、および打上げからの各部の温度推移(右下)。黒線は熱数学モデルを用いて、打上げ時の温度を初期条件として数値計算した予測。赤線は軌道上で実測した温度変化(Noda et al. 2018)。

GEOTAILシンポジウム

2023年3月28日3月28日から31日の4日間、東大本郷キャンパスの小柴ホールでGEOTAILシンポジウムを開催しましたのでその様子をお知らせしたいと思います。このシンポジウムですがタイトルは30年間に渡るGEOTAILの成果を総括した上でその成果を将来につなげたいという思いを込めて Symposium on the Future of Heliospheric Science: From GEOTAIL and Beyond にし、JAXA宇宙科学研究所と名大・太陽圏サイエンスセンターとの共催で開催しました。現地参加とオンライン参加を合わせて100名を超える国内外の研究者からの参加登録がありました。

初日は、GEOTAIL Memorial Sessionとして、元プログラムマネージャの西田名誉教授、初代プロジェクトサイエンティストの向井名誉教授にGEOTAILミッションの経緯やなぜGEOTAILは日米共同ミッションとして成功したのかその理由を話していた他、GEOTAILの30年間の成果のまとめの講演、Plenary Talkなどがありました。

2日目以降は、GEOTAILの成果を将来に繋げるというセッションを開催しましたが、米国、欧州、日本の研究者が、それぞれの考える将来計画を楽しく話しているのが印象的でした。

GEOTAILは1機の衛星で磁気圏のその場観測を行い、多くの

画期的な成果をあげました。しかしながら、広い地球磁気圏の構造とそこで起こるダイナミックな現象を理解するためには1機の衛星ではわからないことも多く、多数の衛星による同時観測が必要になります。1990年代にはISTPと呼ばれるNASA、ESA、ISASが協力して複数のミッションを集結し、太陽-地球宇宙環境の共同観測を行うというプログラムが実施されました。その後、世界的な流れは、1機の衛星による観測から、複数衛星による編隊飛行衛星観測に進化してきました。そしてさらに近年、地球磁気圏で起こる様々なダイナミックな現象のメカニズムを理解するためには、編隊飛行衛星で1つの空間サイズを観測するのでは足りず、同時に複数の空間サイズを時間と空間を分離して観測する必要があるということ、研究者は実体験から理解し始め、従来より多数の衛星による編隊飛行衛星観測の重要性が増してきています。

日本では、2020年代の後半、「ひので」と新たに打ち上げられるSOLAR-Cで太陽を観測し、BepiColombo「みお」が水星磁気圏を、「あかつき」が金星を、「あらせ」が地球の内部磁気圏を、そしてMMXが火星圏の観測を行うことで内部太陽圏を複数の衛星で観測できるという、これまでにない好機を迎えます。更に、これら

の日本の衛星が欧州のソーラーオービター、米国のパーカーソーラープローブとも連携することで、かつて1990年代のISTPによる地球磁気圏の観測体制が内部太陽圏に広がったかのような観測が行われます。そしてその先はどうなるのでしょうか? 恐らく地球磁気圏で当たり前となってきた編隊飛行衛星観測が内部太陽圏から全太陽圏に広がり、それぞれの編隊飛行衛星計画が連携して太陽圏を理解するという世界が訪れます。

今回のシンポジウムでは米国、欧州、日本の研究者が新たな国際協力の枠組み作りを目指して協働しようという強い思いを抱いていることを確認することができました。30年間素晴らしい観測データを送り続けてくれたGEOTAILに感謝しつつ、将来に向けて新たに出発しようと強く感じることでできたシンポジウムでした。

(齋藤 義文)



GEOTAILシンポジウム初日の午後に撮影された現地参加者の集合写真。

XRISM 射場作業開始

2018年にプロジェクトとしての活動が開始したXRISMもいよいよ開発の最終盤にさしかかり、種子島宇宙センターでの射場作業が始まりました。XRISM衛星は2023年3月10日夜、ほぼ1年間過ごした筑波宇宙センターを出発しました。その後、専用船によって3月14日に種子島の島間港に陸揚げされ、種子島宇宙センターに搬入されました。

種子島宇宙センターでは主に第2衛星組立棟、衛星フェアリング組立棟、大型ロケット組立棟という3つの建屋で作業を行い、

打上げに備えます。

射場搬入後は第2衛星組立棟において24時間連続、3日間にわたる電気試験を実施しました。この電気試験は、つくばで実施した衛星システム試験でも熱真空試験中や機械環境試験後など節目節目で実施していたものです。同じ試験をして同じ性能が出ることを確認し、輸送後の衛星の健全性を確かめることができました。

(夏苺 権)

「あかり」(ASTRO-F)が大気圏に再突入

赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)は、2023年4月11日13時44分(日本時間)、北大西洋上空で大気圏に再突入しました。

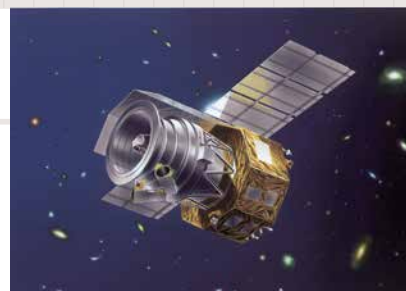
「あかり」は、JAXA宇宙科学研究所の第21号科学衛星として、1997年に開発が始められ、2006年2月22日(日本時間)にM-Vロケット8号機により打ち上げられました。高感度の赤外線観測を行うため、望遠鏡と観測装置は、機械式冷凍機と液体ヘリウムで、絶対温度6 K以下の極低温まで冷却され、空をまんべんなく観測する全天サーベイと、特定の天体、領域を詳細に観測する指向観測を数千回行いました。液体ヘリウムが枯渇した後は、機械式冷凍機のみによる冷却で可能な機能を用い、さらに1万回を超える指向観測を行いました。これらの膨大なデータは、世界中に公開され、天文学の進歩に大いに貢献しています。「あかり」の成果についてはISASニュース特集号(2009年4月号)*1をご覧ください。

ここでは、「あかり」運用の最後の半年について振り返ります。打上げから5年を経て、科学観測の終了を検討していた矢先の2011年5月、「あかり」はバッテリーが機能停止し、直後に地球の影に入って電源を断たれ、姿勢を喪失してしまいました。以前ならこれで運用終了だったかもしれませんが、宇宙デブリ防止のため、近地球周回衛星は打上げ後25年以内に大気圏再突入すべきであるという国際的なルールが2002年に設定され、「あかり」もそれを実現するため最大限の努力を行うことになりました。衛星は自由回転し、たまたま太陽電池パドルに光が当たったときのみ電源が入って通信ができるという状態で、通常の姿勢制御装置

が一切使えない状態でしたが、唯一使える磁気トルカ*2により衛星の姿勢を少しずつ変え、太陽面に太陽電池パドルを向けた状態でスピン安定させる、という作戦を立てました*3。衛星の姿勢に応じて適切な磁気トルカ運用を判断する手順を確立し、8月に入って、軌道上どこでも常に衛星に太陽光が当たる状態となるのを待って、復帰運用を開始。約1ヶ月かけてこの運用を成功させて常時電力を得たのち、衛星各部の機能を順番に回復させ、再び3軸制御姿勢に復帰しました。しかし、同年11月25日に「あかり」の軌道上で日食が起きることが予測されており、そうするとまた姿勢を失ってしまいます。ぎりぎりのスケジュールで、「あかり」は3回に分けて軌道変更運用を行い、近地点高度を700kmから450kmまで下げてから、2011年11月24日停波し、運用を終了しました*4。そして今回、打上げから17年で、「あかり」は大気圏再突入となりました。想定外の電源遮断から復帰し、無事期限内の大気圏再突入まで達成したことに、あらためて感慨を覚えます。

「あかり」の開発・運用に関わった多くのメンバーから、それぞれの立場での思い出と寂さを語る声が寄せられました。改めて、「あかり」に関わったすべての皆さまに、そして「あかり」に心からの感謝を申し上げます。

(山村 一誠)



赤外線天文衛星「あかり」。

*1 <https://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.337/ISASnews337.pdf>

*2 衛星に搭載された電磁石と地球の磁場により衛星の姿勢を変える装置。3軸ある。

*3 この特殊な姿勢運用の確立には、坂井真一郎教授(現SLIMプロマネ)の協力をいただきました。詳細は、坂井他、2012、第56回宇宙科学技術連合講演会講演集、JSASS-2012-4427にて報告されています。

*4 「あかり」の衛星運用については、一般向けの漫画で紹介されています。<https://www.isas.jaxa.jp/AKARI/misc/comic/index-j.html>

SOLAR-B(「ひので」)プロジェクト終了

2006年9月23日に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)は、これまでJAXAの機構プロジェクトとして運用・観測を続け、2011年、2013年、2016年、2020年と4回の運用延長を重ねることで、世界の研究コミュニティに貴重な観測データを提供し続けてきました。一方で、現在進行中の次期太陽観測衛星計画(高感度太陽紫外線分光観測衛星SOLAR-C)に「ひので」の成果や教訓を引き継ぎ、また、SOLAR-C計画に一段と注力して推進する観点から、このたび機構プロジェクトとしての

SOLAR-Bプロジェクトを終了し、後期運用体制への転換を図ることとなりました。

SOLAR-Bプロジェクトチームは今年の2月に宇宙理学委員会での審査、続いて3月にJAXA宇宙科学研究所の所内審査を受審しました。両審査では、「ひので」のこれまでの科学成果や社会・学問・教育分野に対する貢献、宇

宙機技術に対する寄与、ならびに開発や運用段階で得られたさまざまな知見の整理状況など、プロジェクトの総括に関して多角的な視点からの評価・検討が行われ、プロジェクト終了は妥当であると結論されました。今後「ひので」はJAXA宇宙科学研究所内に後期運用チームを設置し、その下で観測運用を継続していく予定です。

打上げから18年目となる「ひので」は、世界の研究者からの観測提案を受け付ける、開かれた軌道上の太陽天文台として運用を続けています。現在までに1700編を超える査読付き論文を生み出し、「ひので」による博士学位の取得も100件を超え、今なおそのデータは広く活用されています。今回の審査を通じて特に印象的だったのは、「ひので」の観測やデータ利用に対する、太陽分野にとどまらない太陽圏科学分野からの非常に高い期待でした。近年の活発化する太陽系探査に対し、磁場や太陽風プラズマの動圧など、太陽圏のありようを規定している太陽の情報、むしろ以前より関心を集めているようにさえ感じます。前述の観測提案では、「あかつき」、BepiColombo/「みお」など日本が主導ないしく深く関わる太陽圏探査機群との共同観測も近年増えており、「ひので」は太陽系探査の一翼を担う新たな役割を持ちつつあります。プロジェクト終了を一区切りとし、今後も「ひので」の活躍にご期待ください。

(坂尾 太郎)



太陽観測衛星「ひので」。

木星氷衛星探査計画 JUICEの打上げ

2023年4月14日の現地時間午前9時14分にJUICE* (Jupiter Icy Moons Explorer) はフランス領ギアナ・クールーにあるギアナ宇宙センターからアリアン5ロケットで、予定より1日遅れて打ち上げられました。打上げ約3分後にはノーズフェアリングが開き、28分後には探査機が分離、JUICEは所定の軌道に投入されて打上げは成功しました。

私はこの打上げの際、ギアナ宇宙センター内にあるToucanと呼ばれる、射点から5.1Km離れた場所に居ました。前回、2018年に行われたBepiColomboの打上げの際には、JUPITER ROOMと呼ばれる打上げコントロールルームの近くに居て、そのバルコニーからBepiColomboを載せて飛んでいくアリアン5を無事飛んで行ってくれることを祈りながらみていましたが、今回もその思いは同じでした。

探査機分離後、会場では大きな拍手が起こり、集まった搭載機器関係者は皆大喜びしていました。しかしその後、打上げ33分後に予定していた探査機電波の初期捕捉が予定時間になってもできず、更に予定を10分超えても電波が捕捉できなかったのには焦りました。ようやく電波を捕捉できた事を会場のスクリーン上に投影されたスペアナの波形で確認できたときには、探査機分離成功時よりも喜びを感じました。その後、予定よりも少し早めでしたが、JUICEの巨大な太陽電池パネルの展開が正常に行われたことを確認してToucanを後にすることとなりました。

打上げ後の4月下旬にはブームやアンテナなどの伸展が行われ



発射台で打上げを待つJUICEが搭載されたAriane5 (VA260)。右に見えるタワーは打上げ時に放水するための給水塔です。

ており、その後日本が担当した機器を含む搭載機器の初期チェックが5月末から6月上旬にかけて行われる予定ですのでまだまだ気を抜くことはできません。この後、1年少し先の2024年8月に最初の月地球スイングバイが実施され、2025年8月に金星スイングバイ、2026年9月と2029年1月に地球スイングバイを経た後、JUICEは木星へと向う軌道に入り、2031年7月に木星周回軌道に投入される予定です。エウロパ、ガニメデ、カリストのフライバイ観測を含む木星周回軌道での観測を行なった後、最終目的地であるガニメデの周回軌道には2034年12月に投入され、2035年9月にJUICEはガニメデに衝突してミッション終了となる予定です。(齋藤 義文)

*https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews483.pdf

「はやぶさ」および「かぐや」の技術が航空宇宙技術遺産第一号に認定

2023年4月13、14日に日本科学未来館で行われた、日本航空宇宙学会第54期定時社員総会および年会講演会において、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が貢献した「はやぶさ」による世界初の小惑星サンプルリターン技術、および月の縦孔・地下空洞を発見したSELENE「かぐや」地形カメラによる観測ならびにデータ解析技術の2件が航空宇宙技術遺産第一号に認定され、認定証が授与されました。

— 認定理由は下記の通りです。 —

- 「はやぶさ」は、地球圏の月以外の天体において、着陸と離陸および試料採取と回収にいたるシーケンスの実施に世界で初めて成功した。これにより我が国は、イオンエンジンや光学航法を用いた惑星間航行、小惑星近傍誘導制御、惑星間軌道からの耐熱カプセルによるサンプル回収等の深宇宙探査技術面で世界の第1線に立った。一連の運用の中で遭遇した異常事態にも、卓越した運用技術で対応し全体シーケンスを完結した。理学分野では、当時世界最高解像度の表面画像を含む各種近傍観測データならびに回収サンプルの分析により、小惑星の構造・組成・生成過程等について画期的な知見をもたらした。本技術により、物質を地上設置の大型／高性能分析装置によって測定する「サンプルリターン観測方法」を確立し、宇宙科学の発展に大きく寄与した。
- SELENE (愛称「かぐや」) 搭載の地形カメラの撮像データの解

析により、月面基地として最も有利な条件を有する地下空洞へと続く縦孔を世界で初めて発見した。SELENEは我が国初の本格的な月周回観測機であり、地形カメラは月の全球にわたる10m/画素の解像度を持つ立体視画像・可視画像データを撮像した。最大50Gbit/日にも上るデータを地上へ効率的に伝送するため、DCT圧縮方式の採用や、符号化テーブルや量子化テーブルの工夫が行われた。こうして月全球について取得された様々な太陽光角度における膨大な観測データについて、計算機による自動認識技術を開発することにより、月面最大級で今後の基地利用・科学探査において最も重要な、月地下の空洞に通じる縦孔3つを発見することに成功した。

航空宇宙技術遺産認定制度は、日本航空宇宙学会が我が国の航空宇宙技術の発展史を形づくる画期的な製品および技術を顕彰して後世まで伝え、今後の航空宇宙技術の発展に寄与することを目的として2022年に創設されました。航空宇宙技術遺産第一号としては上記2件を含む6件が認定されています。(大山 聖)



日本航空宇宙学会会長 鈴木 宏二郎氏から認定証を受け取った國中 均宇 宙研所長。



前 JAXA 理事補佐

深井 宏 (ふかいひろし)

ドレイクの式と未来夢想

WBCで大活躍した大谷翔平選手が「どこの惑星出身？」とインタビューを受ける様子を見て、ふとフェルミのパラドックスのことを思い出しつつ、JAXA宇宙科学研究所の未来を夢想してみた。

7個の数値を掛け合わせるドレイクの式

$$N = R_* f_p n_e f_i f_c L$$

にご関心の向きも多いと思うが、天文学辞典*によると1961年のドレイク自身の計算結果は $N=10$ 、すなわち天の川銀河に我々と通信可能な高度な地球外文明が10個存在するという訳である。各項の数値は大胆に推定できるので、人によって N は1以下から1億を超えるものまで幅広いそうである。 $N=1$ とは唯一地球だけという意味になる。天の川銀河の大きさや長大な年齢を考えると「知的生命が存在すると予想される」のに、一方では彼らの兆しは全く見当たらない。いわば「大沈黙」の状態である。ドレイクの式に先立つ1950年夏、ロスアラモス国立研究所で昼食を取りながらフェルミが「みんなどこにいるんだろうね」と呟いた。このフェルミのパラドックスを一般向けに紹介したのが「広い宇宙に地球人しか見当たらない50の理由 フェルミのパラドックス」(青土社 スティーヴン・ウェブ著 松浦 俊輔訳)である。パラドックスの解として興味深い50件を選び、これらを大まかに3つに分類して紹介している。

1つ目の分類のタイトルは「実は来ている」。彼らが既に地球に来ている又は来たことがあるとする説。そうならばパラドックスは解決だ。「一般の人にはずば抜けて人気がある」のがこれ。私も大好きである。この分類の最初に紹介される解1が「彼らはもう来ている、ハンガリー人だと名乗っている」とのこと。フェルミ時代のロスアラモスではフォン・ノイマンなどハンガリー出身者の優秀さが際立っていたのでこのようなジョークが飛んでいたそう。現在に当てはめてみると、「彼はもう来ている、大谷翔平と名乗っている」と言えば分かりやすくなると思った次第。

2つ目の分類は、彼らが「存在するがまだ連絡がない」。多くの方はこの立場ではないだろうか。これに関しては地球外知的文明探査(SETI)の活動が知られている。

3つ目の分類は、彼らが「存在しない」。少し寂しくなってきた。いくつかの解の最後にウェブ自身の立場が述べられている。解50「フェルミのパラドックスは解決した」。すなわち天の川銀河には地球以外に高度な文明は存在しないとする説。まさに $N=1$ である。その根拠は単に観測事実がないからというだけではなく、ドレイクの式の各項を厳しく吟味すると N は小さな数にしかならないとする。地球というサンプル1つだけで結論を出すのは平凡原理を侵しているとの批判を受けるとしても、この立場にいたいとのことである。



平成30年高野山にて。

さて、ドレイクの式に戻ってみると、天文学辞典の定義によれば、

R_* は天の川銀河で1年間に生まれる恒星の平均数、

f_p は惑星系を有する恒星の割合、

n_e は1つの恒星の周りの惑星系で生命の存在が可能となる惑星の平均数、

f_i は上記の惑星で生命が実際に発生する割合、

f_c はその発生した生命が知的生命体にまで進化する割合、

L はそのような高度文明が星間通信を行うほど高度な技術を獲得する割合、

L はそのような高度文明が星間通信を行い続ける期間

となる。 f_p や n_e の見積もりは、JAXA宇宙科学研究所も参加する「Romanプロジェクト」など系外惑星の観測研究の進展に期待がかかる。 f_i や f_c は惑星科学や宇宙生物学の飛躍によって何らかの示唆が得られるかもしれない。現に「はやぶさ2」のサンプル分析によって太陽系46億年の歴史を焼き直す研究が進行中である。最後の2つの項、 f_c と L はやっぱりである。ドレイクはとりあえず f_c を1%、 L を1万年と仮置したが、とても一般化できるようには思えない。我々の文明の寿命はわずか1万年しかないのだろうか。いやもっと短いと見るべきかもしれない。しかし考えによっては、人類の叡智でコントロールできそうな項でもある。JAXA宇宙科学研究所でも宇宙機の追跡管制や軌道決定の研究は日進月歩なので、未来には星間通信の技術に辿り着くことがあるかもしれない。ウクライナ侵攻などの戦争、新型コロナウィルスの蔓延、地球近傍天体の衝突可能性などの例を考えると、文明存続を危うくするリスクもあるが、「プラネタリーディフェンス」の活動など日夜情報が収集され、対策が研究されていて、我々はその成果を現に享受しつつある。打上げが迫っているSLIMをはじめ、MMX、LUPEX、Gatewayなどの月・火星探査計画は、我々の活動領域を地球以外にも拡大するものだから、文明存続のために未来の選択肢を増やすことにつながるかもしれない。JAXA宇宙科学研究所もささやかではあるが確実に貢献している科学や技術、芸術などの進歩発達が、我々の文明を一層心豊かで強靱な共同体に導くこと、そして L を延ばすことに期待しないではいられない。

*<https://astro-dic.jp/drake-equation/>

宇宙・夢・人

》宇宙で巨大な膜を広げ、 系外惑星を直接見たい

「しっかり」と「軽い」を両立

——専門は宇宙構造物の構造力学だそうですね。

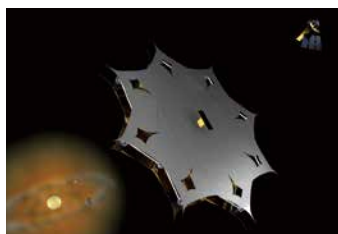
宇宙構造物という硬いイメージがあるかもしれませんが、私
が対象としているのは主に膜やケーブルなど柔軟な構造物です。
ロケットは格納できる衛星のサイズが決まっています。また、近
年は人工衛星の小型化がトレンドになっていますが、センサー
を付けたマストを長く伸ばして観測したいといった要望もありま
す。そこで、小さく収納して打上げ、宇宙で広げたり伸ばしたり
する技術が必要になります。そうした展開構造や伸張構造の研究
開発をしています。打上げ時の振動に耐えられなかったり展開や
伸展したときに歪んでしまわないように、しっかりしていること
が要求されますが、重くなると大型ロケットでなければ打ち上げ
られなくなってしまいます。「しっかり」と「軽い」という相反する
ことを両立させるのが難しく、苦労しています。

ソーラーセイルのトップであり続けたい

——現在取り組んでいる伸張構造・展開構造は？

宇宙研に来る前、大学に所属していたときに小型ソーラー電
力セイル実証機IKAROS（イカロス）のプロジェクトに参加しまし
た。薄い大きな膜を広げ太陽の光の圧力を受けることで宇宙空
間を進むソーラーセイルというコンセプトは私が学生のころか
らありましたが、誰も実現できずにいました。何が難しいって、
膜の展開に関する理論も技術も確立されていない上に、薄い大
きな膜の展開を地上で実験することができないのです。IKAROS
では実機サイズの膜の展開挙動の検証を主に数値シミュレー
ションで行い、私たちが展開挙動を予測する解析コードを開発
しています。IKAROSは2010年に打ち上げられ、宇宙空間で1辺
14mの薄膜を展開することに成功し、ソーラーセイルを世界で
初めて実現しました。

薄膜の展開構造についての理論や技術の基本的な部分は



系外惑星直接観測用オカルタのイメージ。

IKAROSで確立できた、
個人的には考えています。
より信頼されるものにす
るためには実績を重ねて
いく必要がありますが、
残念ながらIKAROSの後が
続いていません。一方、
アメリカではソーラーセイ

宇宙飛行工学研究系教授

宮崎 康行 (みやざき やすゆき)

1966年、福岡県生まれ。東京大学大学院工学系
研究科航空学専攻博士課程修了。博士（工学）。
日本大学理工学部航空宇宙工学科教授、同大学理
工学研究所次長などを経て、2020年より現職。



ルの打上げ計画が複数あります。せっかく日本が世界のトップに
立ったのに、追い付かれ追い越されてしまうのは悔しいです。負
けたくない、私たちの研究室でもソーラーセイルの開発を頑
張っています。

それは、収納時の大きさが縦10cm・横10cm・高さ20cmで、
宇宙空間で1辺5mの薄膜を展開します。IKAROSは本体を回転さ
せて遠心力で薄膜を展開し、広げた状態を維持するためずっと
回転させていました。回転によって薄膜が波打つことがあり、光
の当たり方が変わって姿勢が乱れ制御に苦労するという課題もあ
りました。私たちが開発しているソーラーセイルは、4本のマス
トを伸ばして薄膜をピラミッド型に展開します。光の当たり方の
影響を受けにくいなどの利点があるのですが、ピラミッド型に展
開するのは簡単ではなく、展開の精度を高めるための研究に取り
組んでいます。

——超小型ソーラーセイルの先は？

大きなテーマの1つが、系外惑星の直接観測です。地球型の系
外惑星も見つかって生命が存在している可能性があります
が、系外惑星を直接観測して大気成分など詳しい情報を得る
ことはできていません。恒星の光がまぶし過ぎるのです。その問
題を解決する方法として、宇宙望遠鏡と恒星の間に恒星の光を
遮る構造物（オカルタと呼ばれています）を置くというアイデアが
あります。その実現を目指しています。

恒星の光を遮るには数十mの構造物が必要です。円形では回
折した光が望遠鏡に入ってしまうため、花びらのような形がよい
とされています。どういう構造で、どのように収納して、どのよ
うに展開すれば、宇宙空間で望みどおりの形状になるのか。少し
でも歪むと回折した光が望遠鏡に入ってしまいます。究極的に難
しいので、究極的に面白く、私たちの腕の見せ所です。ただし、
私が現役の研究者でいるうちに実現するのは難しそうなので、若
い人たちに期待しています。

——研究開発でのこだわりはありますか。

「常に美しく」です。この電子基板は美しい、と感ずることがあ
ります。それをつくった人に、どうしてこういう配置・配線にし
たのかと聞くと、詳しく答えてくれます。どんな細かいことでも
1つ1つきちんと考えてつくられたものは、美しく感じます。です
から、何事も1つ1つきちんと考えることを心掛けています。美し
いというのは見た目の良さではありません。何が美しいのか、な
ぜ美しいと感じるのかを考えることも大切だと思っています。

編集後記

最近、宇宙関連ではあまりよいニュースが聞かれない中で久し
ぶりに JUICE 打上げ成功の朗報を聞いた気がします。最新線記事は
X線天文学関係でした。これもXRISMの打上げが間近にせまってい
ます。是非とも成功してほしいですね。

(田中 智)



ISASニュース No.506 2023年5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 isasnews@isas.jaxa.jp

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/>