

CC-CTPのPhase-1実験において日仏共同で製作した冷凍機システムの内部

左手前の銅の円筒の中に ISAS からの 4K ジュールトムソン (JT) 冷凍機があり、右側上から降りてきている円筒状のものが 2K JT 冷凍機である。左奥にフランス CEA が製作した 50 mK まで到達する冷凍機があり、これらを結合する作業を行っているところ。この後すべての冷凍機を動作させ、50 mK を達成した。この冷凍機システムは将来の SPICA/LiteBIRD/Athena などの冷凍機のプロトタイプとなる (P.5 参照)。

© D.Morel / CEA

宇宙科学最前線

中性子星の織りなす物理の魅力

京都大学 白眉センター／宇宙物理学教室
特定准教授

榎戸 輝揚 (えのと てるあき)

中性子星は物理の宝庫

太陽からわずか 2,300 光年の近傍に、「竜の卵」という名前の X 線で輝く未知の中性子星が見つかった。その表面には、強い重力場に適応したミリメートルの小さな知的生命体「チーラ」が文明を築いている。チーラは生命活動は原子核物理に由来し、人類よりも遥かに短い時間で進化し、やがて人類と交信を始める…。これは、1980 年にアメリカで出版されたハード SF 小説『竜の卵 (原題: Dragon's Egg)』のストーリーだ。その末尾に添えられた専門的補遺も面白く、私たちが知る物理で許される生物が想像力たくましく描かれている。この SF 小説を取り上げたのには訳がある。作者は、物理学者で SF 作家のロバート・L・フォワード (Robert L. Forward)。彼はメリーランド大学での博士論文で重力波を研究し、指導教員は共振型重力波検出器で有名なジョセフ・ウェーバー (Joseph Weber) だった。重力波を検出したとする 1969 年の報告 (Weber, PRL, 1969) は追試ができず、今では否定的な結論になっているが、重力波物理学の黎明期を切り開いた人物とされている。その人間ドラマは、ジャンナ・レヴィン (Janna Levin) 著『重力波は歌う (原題:

Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space)』に詳しい。そして、中性子星の発見された 1967 年から半世紀にあたる 2017 年は、連星中性子星の合体からの重力波が検出された記念すべき年となった。

フォワードのように、中性子星は多くの天文学者と物理学者を惹きつける。中性子星は大質量星が超新星爆発を起こした後に残る特殊な天体である。半径 12 km の中に、太陽質量の約 1.4 倍の物質が閉じ込められ、きわめて重力が強い。そのため、星表面からの光は赤方偏移を受け、裏面からの光が曲げられて観測者に届いたりする。さらに中性子星の連星では、軌道運動を変えるほどの強い重力波も出る。この強重力で星が潰れないのは、内部が地上で実現できないほど高密度で、原子核同士が融けあって核力が星を支えるためである。中心に向けて密度は増し、コアではハイペロンなど、通常では見られない特殊な粒子が発生するとも言われる。この中性子星の内部がどうなっているのかは、現代の基礎物理学における重要な未解決問題のひとつになっている。

超新星爆発で星の半径が桁で小さくなると、中性子星は 1 秒に何十回転もの高速の自転をする。フィギュアス

ケートで回転しながら腕を縮めて回転が速くなるのと同じ要領だ。その高速の回転で荷電粒子が外向きに加速されて吹き出すパルサー風と観測されている。また、小さな空間に押し込められて磁場が強くなり、電子は磁力線に沿っては動けるが、垂直には動けずエネルギー準位が離散化する。その結果、星のスペクトル（色）にその証拠（電子サイクロトロン共鳴）が見えるようになる。このように、中性子星は「強重力」「高密度」「高速回転」「強磁場」あるいは「強い輻射場」など、極限的な物理を調べる上で魅力的な宇宙の実験室を人類に提供してくれている。これらの物理環境にある中性子星は、天文学者だけでなく物理学者にとっても、とてもワクワクできる天体である。

中性子星の多様性と磁気活動の星「マグネター」

中性子星は周期的な電波信号を出すパルサーとして、今から半世紀ほど前の1967年に発見された。現在では2,500天体ほどが知られ、多様な種族が見つまっている。私たちに身近な可視光で光る星は核融合をエネルギー源とし、どのようなタイプがどう進化するかは長年の研究でほぼわかっている。一方で中性子星は「どういう種族がいて、どう進化するか」は十分にはわかっておらず、宇宙科学における最前線になっている。中性子星にも個々の天体に大きな個性があり、それぞれ魅力的な観測対象であるが、幅広い視点で見れば「中性子星の多様性と進化の統一的理解」を目指すのが、現在の観測的研究

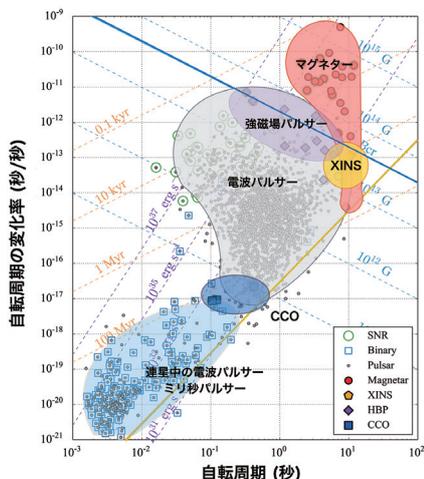


図1 これまでに発見されてきた中性子星の自転周期とその変化率 (Enoto et al., ApJS, 2017より改変 [ATNFカタログを利用])。

の大きな流れといえる。図1は中性子星の分類によく用いられる、自転周期とその変化率の「P-Pdotダイアグラム」である。大多数の中性子星は電波パルスを出す天体で、星の回転エネルギーが、外向きに吹き出る荷電粒子の流れや、電磁波放射に変換されている。中性子星はグリッジ※を除けば安定で静的な姿が想像されるが、近年の観測では、莫大なエネルギーをガンマ線で放出する巨大フレアや、ミリ秒のスパイク状の放射（ショートバースト）、突発的なX線での増光など激しい活動が数多く見つかると、動的な姿が明らかになってきた。こういった活動性の理解の鍵は、星の内部に潜んでいる強い磁場と、それに起因する磁気活動と考えられており、最も極端な例は、銀河系内などに20個ほど見つかった宇宙最強の磁石星「マグネター」である（図2）。さらに、マグネターと通常の電波パルサーの中間的な性質をもった強磁場パルサーや、超新星残骸の中心に見つかった軟X線点源 Compact Central Objects (CCOs)、突発

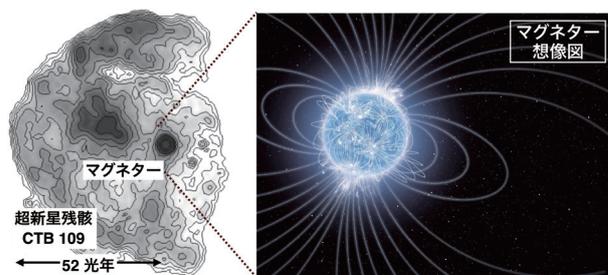


図2 (左) 超新星残骸とその中心に見つかったマグネターのX線画像 (Ryo & Petre, ApJ 1997より)、(右) マグネターの想像図 ©Ryuunosuke Takeshige and Teruaki Enoto (Kyoto University)。

的に電波パルスで発見された Rotating Radio Transients (RRATs)、X線で輝く地球近傍の中性子星 X-ray Isolated Neutron Stars (XINSs) など、多様な種族が見つまっている。XINSsなどは地球近傍の星と考えられており、まさに本稿の最初に紹介した「竜の卵」にそっくりだ。磁気活動を起こす活動的な姿が認識されるにしたがって、誕生後に徐々に磁場を減衰しながら進化する中性子星の姿が描かれはじめています。

日本の5代目のX線衛星「すざく」も、マグネターを中心に強磁場の中性子星を観測してきた。たとえば、2008年に発見されたマグネター SGR 0501+4516 を世界に先駆けて観測し、その特徴をいち早く報告している。突発増光したマグネター 1E 1547.0-5408 からは、図3のような、これまで知られていなかった硬X線も発見された。「すざく」衛星の広帯域という特徴を活かし、星の表面の熱放射とは明確に区別できる硬X線の放射を次々に検出し、その強度やスペクトルの傾き（光子指数）は磁場の強さに相関するとも指摘している。私たちが中性子星の統一に向けた大きなストーリーに挑んでいる。より詳しくは「宇宙最強の磁石星：マグネター観測で垣間見る極限物理」(『パリティ』2015年8月号)をご参照されたい。

国際宇宙ステーション搭載のX線望遠鏡 NICER

中性子星内部の高密度状態は、原子核と宇宙物理にまたがる重要な問題である。その状態を密度と圧力というミクロな物理量で記述する「状態方程式」は、積分すると星の質量と半径というマクロ物理量に対応する。したがって、質量と半径の観測が重要な意味をもっている。質量の測定は、中性子星が別の星と連星を組みお互いの周りを公転する場合に、星から出る電波ビームや表面からのX線パルスの観測から連星軌道パラメータを測定すれば、精度よく求められる。一方で半径を知るには、星の表面からのX線を観測する必要があり、天体までの距離の不定性や、星の大気、星間空間での吸収の影響も大きく、精度のよい測定がきわめて難しい。

そこで注目されているのが、強い重力場で近傍の空間が曲がり光の経路が歪んでくる効果である。同じ質量の中性子星でも、この効果は半径が小さいほど強いため、星の裏側のホットスポットからの光が回り込んで観測者に届く。そこで、星の自転に伴う明るさの変化（パルス波形）を精密に測定することで、空間の曲がり具合を測定し、星の質量-半径比を測るアイデアがある。この測定には数多くのX線光子を検出する必要があり、そのために開発されてきたのが NASA が主導する大面積X線望遠鏡 Neutron star Interior Composition Explorer

※ 規則的なパルス信号の到来時間が急に乱れる現象で、中性子星の回転が急に速くなり、その後ゆっくりと元の状態に近づいていく。

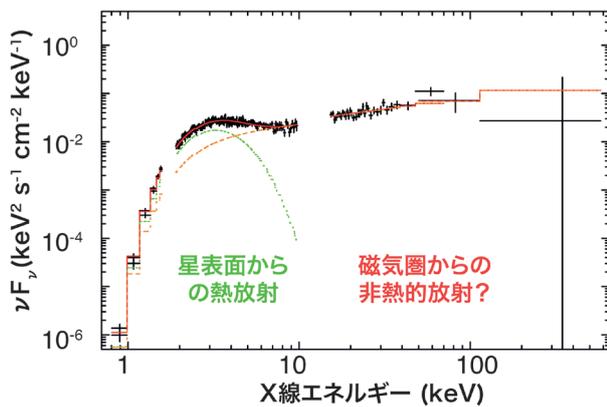


図3 X線天文衛星「すざく」によって発見されたマグネターの硬X線放射 (Enoto et al., PASJ, 2010)。

(NICER)だ。これはX線を集める直径14 cmほどの集光系と、その焦点面に設置するシリコンドリフト検出器を56個束ねた装置で、中性子星の表面からの熱放射に特化した1.5 keVで最も多くのX線を集めるよう設計されている。私はNASAでの研究員時代に、このプロジェクトに誘われ、X線集光系の開発・製作から、打上げに向けた較正作業やサイエンス解析に携わってきた。図4のNICERは、かわいい我が装置である。

2017年6月3日にケネディ宇宙センターからSpaceX社のFalcon 9ロケットでNICERは打ち上げられ、国際宇宙ステーションに搭載されて観測を開始した。打上げにも招待され、人類で2番目に月に降り立ったバズ・オールドリンのトークに感動し、開発メンバーの一人として紹介された嬉しさは格別だった。NICERは現在、国際宇宙ステーションで順調に観測を続けており、中性子星の質量・半径測定を目的とする主要ターゲットの観測はもちろん、日本が誇る全天X線監視装置MAXIが見つけた突発天体を追跡観測するなど、大活躍している。まさにサイエンス結果を出す時期に差し掛かっており、私は、6つあるサイエンス検討グループのひとつである「マグネターと磁気圏」のリーダー役を仰せつまっているため、チームメンバーとともに結果に繋がれるように頑張っていきたい。

これからの中性子星の観測的研究

中性子星には「多様性」と「基礎物理」の両方を視野に入れた魅力がある。この数年で、中性子星連星の合体に伴う重力波が見つかり、それにより状態方程式を解明する可能性が開けるなど、研究も新しいフェーズに入ってきた。では、X線による中性子星の観測から、これまでの延長線上の発展を超えて、質的に新しい進展は期待



図4 中性子星を主目的にしたX線望遠鏡NICER(左)は、国際宇宙ステーションに搭載すべくSpaceX社のFalcon 9ロケットで打ち上げられた(右)。©NASA

できるだろうか？

ひとつ魅力を感じるテーマとして、高速で自転している中性子星からの定常重力波がある。磁場が減衰して弱くなった中性子星では、質量降着に伴って角運動量が持ち込まれ、スピナップして高速で自転ようになる。これらの高速自転する中性子星は、サブミリ秒まで回転周期が早くなると、遠心力で破壊されてしまうはずである。実際には、これらの中性子星は壊れることなく高速回転しており、何らかの機構が角運動量を外に持ち逃げしている。降着円盤が寄与するという考えもあるが、中性子星の表面に小さな山があるなど球対称から形状が僅かに歪んでいると、高速自転に伴って放出される重力波が角運動量を持ち逃げするというアイデアもあり、重力波干渉計LIGOでの精力的な探査が行われている。しかし、この種の天体の多くでは自転周期がわからないため、探査の計算リソースが莫大で、現時点では定常重力波は見つかっていない。

最も有望なターゲットは、全天で最も明るいX線天体のひとつ「さそり座X-1」である。この中性子星は高速自転していると考えられるが、磁場が弱くパルスが見えないため自転周期はわかっていない。しかし、2つの準周期振動が見つかっており、その差分周波数が自転に対応するのではと考えられており、重力波探査もその情報に基づいて行われている。残念なことに、差分周波数は質量降着率に伴い変動するので、モニタリング観測が必要になる。この天体は最先端のX線望遠鏡では明るすぎ、稀にしか観測も行われない。そこで私たちは、この条件を逆手にとり、NICERのモジュールのひとつを転用し、さそり座X-1だけを専用に観測できる小型衛星の検討を進めている。巨額の予算をかけリスクのとれない大型衛星で挑戦的テーマは難しいが、小型なら機動的に挑戦的テーマを狙える。

小規模なチームで夢は描けるだろうか？ 実際には私たちは、X線天文学で培った放射線検出の技術を地球科学に援用し、学術系クラウドファンディングのサポートも得て、雷雲や雷で発生する高エネルギー大気物理現象の観測から「雷で生じる光核反応」を検出した(Enoto et al., Nature 2017)。わずか10人ほどのチームでも、英国物理学会が選定する2017年における十大物理学ブレイクスルーのひとつに、中性子星の連星合体に伴う重力波の検出と並んで選ばれた。この経験から、小さなチームでも、小型で機動的なサイエンステーマを適切に狙うことで、巨大プロジェクトに負けないピリリと意義のある成果を出せると信じている。今後は宇宙科学で中性子星を舞台に、研究者のみならず、社会の多くの人々の好奇心を満足させるような研究プロジェクトを展開したい。これまでの研究を応援して下さった皆様に改めてお礼を申し上げると同時に、今後の中性子星にまつわる研究の展開にもご期待いただきたい。

謝辞

本稿は、第10回宇宙科学奨励賞の成果に関連して執筆されたものです。学生時代から研究を手ほどきいただいた牧島一夫先生、中性子星の研究で目をかけて下さった堂谷忠靖先生、寺澤敏夫先生、柴田晋平先生を始めとする諸先輩、共同研究者とともに、本稿に目を通して下さった木坂将太さんにもこの場を借りてお礼申し上げます。

SPICAがESAのM5ミッション候補に

これまで日本が中心になって推進してきたSPICAは、日欧を中心とした合同チームで、欧州宇宙機関ESAの宇宙科学プログラム中型ミッション5号機（Cosmic Vision M5）に提案されました（2016年10



オランダで開催されたコンソーシアム会議にて（5月31日）。

月）。このM5ミッション提案募集に対して宇宙科学の様々な分野から全25件の提案があり一次選抜の審査が続いていましたが、ようやく5月7日に審査結果が発表され、SPICAはミッション候補3件の一つに選ばれました。2021年の最終選抜に向けて、より詳細な検討を進めることとなります。

SPICAの目的は、地球や生命まで存在する現在の多様な豊かな宇宙が作り上げられた過程を、超高感度の宇宙赤外線観測によって研究することです。超高感度の赤外線観測を実現するためには、極低温に冷却した大スペース望遠鏡と、高感度・高効率の焦点面観測装置が必要です。SPICAは口径2.5mの望遠鏡を絶対温度8K以下まで冷却します。口径は「あかり」や「Spitzer宇宙望遠鏡」の3、4倍にもなります。SPICAには波長12ミクロンから350ミクロンまでの赤外線の高感度の撮像・分光装置が搭載されます。

SPICAは、ESAがリードしJAXAがメジャーパート

ナーとして参加する日欧共同のミッションです。JAXAはこれまで「IRTS」、「あかり」で培ってきた宇宙望遠鏡冷却技術を提供するとともに、H3ロケットでの打上げを担当します。ESAは望遠鏡本体とバス機器を担当します。衛星運用は両者の共同作業です。一方、観測装置としては、名古屋大学を中心とする日本チームが中間赤外線観測装置（SMI：Spica Mid-infrared Instrument）を、欧州を中心とした2つのチームが遠赤外線分光装置（SAFARI：Spica FAR-infrared Instrument）と遠赤外線偏光撮像装置を製作・搭載します。

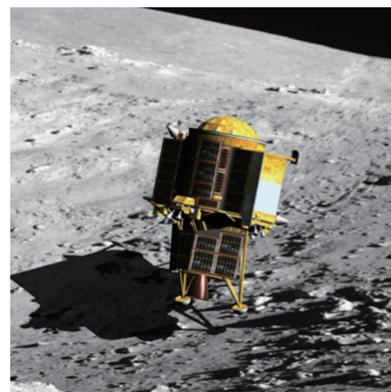
JAXAのプロジェクト化とESA最終選抜までに、衛星設計などの技術的検討活動はもとより、JAXA内外の体制整備、国内大学・研究機関からの参加・協力の推進、他波長天文学分野や理論分野との共同でのサイエンス検討深化などを行う必要があります。より大きく強い体制で「しっかりと」SPICAを進めるべく、チーム一丸となって再始動しました。（芝井 広）

SLIM「プロジェクト計画変更審査」終了

小型月着陸実証機SLIMは、月面上の狙った所に降りるための「ピンポイント着陸技術」を開発・実証すること、また、これを小型着陸機で行うための小型軽量化技術を開発・適用すること、この2つを大きな目的としたプロジェクトです。これまでの各国の月面着陸機は、予定された着陸地点の周囲数km～十数kmの範囲内のどこかに降りられればよいように、設計されていました。一方で2000年代に入ると、「かぐや」（JAXA）、「LRO」（NASA）といった月周回機が、例えば分解能50cmといった高解像度データを大量にもたらしてくれました。そのため、今、月科学の研究や探査計画の検討をしている人は、「このクレータの隣にある岩石を調べたら月の起源が分かる」「月南極にあるこの狭い台地の上に降りたら水資源の探査ができる」といった検討を進めています。そのためには、狙った地点に正確に降りるための新しい技術が必要です。しかも、これらの地域は一般に、「海」と呼ばれる領域とは異なり複雑な地形をしているため、障害物のない安全領域を見定めて降りる技術も必要です。このような技術を「ピンポイント着陸技術」と呼んでおり、

SLIMは100m級精度での着陸を目指しています。

さて、その意義が認められ2016年4月から正式なJAXAプロジェクトとしての活動を開始したSLIMですが、その直後に、ASTRO-Hの軌道上事故が発生しま



月面へのピンポイント着陸技術を開発・実証するSLIM（想像図）。

した。そこで得られた知見や教訓を踏まえ、より確実なミッション成功のための見直しを行った結果、探査機の質量がやや増大する結果となりました。また、X線天文衛星代替機の検討が開始され、JAXA・宇宙研としてリソースの最適化を図る必要が生じました。これらの新しい状況を踏まえ、SLIM打上げ手段を、イプシロンロケットからH-IIAロケットによるX線天文衛星代替機との相

乗りへと変更する判断に至りました。

打上げ手段の変更は、単に技術的な変更にとどまらず、経費やスケジュールにも大きなインパクトがあるため、規定に従い「プロジェクト計画変更審査」を受審することとなりました。打上げ可能質量の増加分の有効な活用方法など、様々な観点からの議論が行われた結果、約1年を要したものの最終的に JAXA としての承認を得ることができました。今後は、この変更を踏まえて SLIM 探査機の基本設計を固めて設計審査を受け、次フェーズで

ある「詳細設計フェーズ」へと進んでいく予定です。

最近、月探査を巡る動きは大変活発です。ISEF2*等では国際協力による大規模な月探査計画が議論され、また民間による月探査計画なども発表されています。SLIM で実証する技術は、これらの将来計画でもいずれ必須となる、重要かつ挑戦的な技術と自負していますので、その価値が色褪せることがないように、気を引き締めて進めていきます。
(坂井 真一郎)

CC-CTP Phase-1 実験終了

CC-CTP とは無冷媒冷凍機でセンサを 50 mK まで冷やす宇宙用冷凍機システムの開発を、フランスの CNES (フランス国立宇宙研究センター) および CEA (フランス原子力・代替エネルギー庁民生科学センター) と協力して行い、SPICA (赤外線天文台)、LiteBIRD (マイクロ波背景放射観測)、Athena (X



CEA (グルノーブル) に新設されたクリーンルーム内に設置された冷却システム実験機 (左側)。

線天文台) など様々なミッションの共通技術を開発する所内チームです、というご紹介を 2016 年5月の ISAS ニュースでさせていただいて早2年。あれから半年かけて国内での製作・試験、2017 年3月にフランスの CEA、グルノーブルに木箱8つを送りこみ実験にこぎ着けました。写真の箱形の真空槽の中で、日本から持っていったジュールトムソン冷凍機とフランスの 3 He ソープションと断熱消磁冷凍機が絶対温度 1.7 K を境界として組み合わされ、共同して 50 mK を作り出します (表紙写真も参照)。ジュールトムソン冷凍機は、最終冷却の際に排出される熱にも無事に耐え、様々なパターン (冷却にかかる時間と維持時間、電力など) で動作可能なことを示すことができました。内部での熱抵抗や冷凍機からの振動が問題になるなど、デジャブなこともありましたが、実験は 2017 年3~7月、9~10月、2018 年2~3月とのべ 203 日、それをほぼ2人体制でカバーし、SPICA の東谷さんの出張日数は 160 日以上、プロジェクト研究員の山本さんと研究開発部門の篠崎さん

は 80 日以上。怪我も故障も事故もなく、やり切れたことに本当に感謝しています。グルノーブルはリヨンから 100 km ほど東にある、アルプスの麓、イーゼル川のほとりの落ち着いた小都市で、市内はトラムで移動でき、食事や買い物にも不便はありません。CEA には新しいクリーンルームも作ってもらい、実験環境も整いました。フランスでの実験の特徴としては、事務手続や安全管理はしっかりしていて、クレーンやはんだ作業にはさっと技官さんが登場する。一方、昼ご飯の話題は「どこにバカンスにいかか」であって、スキー日和の金曜日には研究所全体で人が減る。冷凍機が動いていても夜間は実験スペースには立ち入り禁止。「働き方改革」の先をいくこのメリハリの利いた仕事の進め方は、いろいろ見習うべきところがありました。CTP はこれから次のセンサをいれる冷却系を作り、2年後くらいに実験を再開します。その時はフランス以外にも多くの国が参加できます。異文化体験 and/or 実験物理 and/or 宇宙開発 and/or 宇宙物理をしたい方はいませんか? (山崎 典子)

世界初「メインパイロード」になった超小型衛星「たすき」

宇宙科学研究所の観測ロケット改造型の SS-520-5 で 2018 年 2 月 3 日午後 2 時 3 分に打ち上げられた TRICOM-1R は無事に軌道投入され「たすき」という愛称がつけられた。研究室で 8 機目の超小型衛星である。

メインのミッションは地上からの弱電波を受信する Store & Forward。携帯電話などの地上の通信インフラがないところで地上設置センサーからの情報を集めるのに、衛星は

効果的な、あるいは時には唯一のツールである。水位、水質、土壌水分量などの情報を集める要望がある発展途上国だけでなく、日本でも山間部での地盤の移動や山登りの人の安否情報を集めるニーズがある。如何に送信電力を絞れるかがカギ。TRICOM-1R では LoRa を利用しビットレートを 300 bps と低速にすることで、送信出力 20 mW という免許のいらぬ「特定小電力無線局」の範囲内での送信

*第 2 回国際宇宙探査フォーラムのこと。2018 年 3 月に日本で開催された。各国の宇宙を担当する関係が集まり、国際的に協力して宇宙探査を進める方針をまとめた。
<http://www.isef2.jp/>

を目指した。内之浦からの 130 mW の受信に2月4日に成功、さらに同日の別可視において、内之浦からの 20 mW の受信に成功した。また海外への展開を目指し、ルワンダに送信機を送ってすでに 20 mW の受信に成功している。

キヤノン製カメラでは広視野で地球を撮像する実証実験を行った。東京理科大学には小型のカメラを5台共同開発していただき、いずれも撮像に成功している。また、打上げ後、衛星が GPS 情報などをベースに地上の場所を撮像し、最初の地上局の可視のタイミングでダウンリンクするという自律化機能の実験を行った。実際の打上げ直後には、CPU リセットなどもあり実現できなかったが、その後、衛星放出状態を模擬してスタートさせた実験では自律撮影+ダウンリンクに成功している。GPS は中部大学製のものを使用し、東京電機大学にも運用協力をしてもらうなど、多くの大学の協力を仰いだ。

衛星は民生品をできるだけ活用し、低コスト・短期開発を目指した。今回の実証成功で、3 U CubeSat の標準モデルができたので、さらに「つなげば確実に動作する」ように改良して、多くの国が容易に製造できるようにし、衛星開発教育に利用するとともに、S&F の受信機を搭載した多数機のコンステレーションを目指したい。貴重な実証の機会をいただき、今後の世界展開のベースを作らせていただいたことに、心より感謝する次第である。(中須賀 真一)



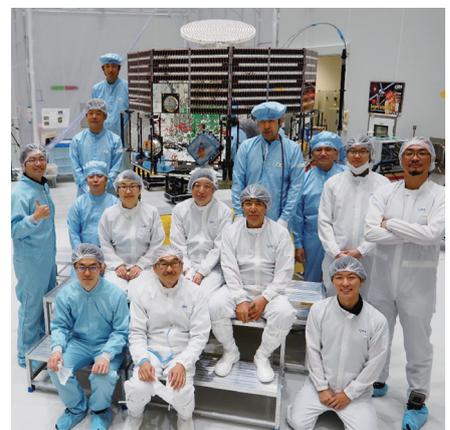
約10x10x30cm、3.2kg 超小型衛星 TRICOM-1R (「たすき」)。

BepiColombo MMOを仏領ギアナ・クーラーのギアナ宇宙センターへ輸送

ESA との共同で水星探査を行う BepiColombo 計画ですが、予定されている 2018 年 10 月の打上げウィンドウ開始までいよいよ半年を切り、緊張感がますます高まっています。そんな中、MMO は 2018 年 5 月上旬に、3 年間過ごしたオランダ ESTEC を離れ、ついに仏領ギアナのクーラーにあるギアナ宇宙センター (CSG) へと輸送されました。ここは ESA の主力ロケットであるアリアン5ロケットの打上げ場です。ちなみによく「場所はアフリカだよな？」と勘違いされる方がいますが、ギニアでも赤道ギニアでもなく仏領ギアナで、場所は南米 (ブラジルの北) です。MMO を含む BepiColombo のすべての機材は ESTEC から射場へ、専用のアントノフ輸送機 4 機と貨物船 1 隻で輸送されました。アントノフが離陸するアムステルダムスキポール空港では、BepiColombo のデジタルポスターが掲示されるなど、今回の輸送を大きくアピールしてくれていました。また MMO を輸送するアントノフには MMO が寂しくならないように、小川 博之先生が同乗し到着までお守りをして頂きました。

MMO のコンテナが無事に CSG へ到着すると、予めクーラー入りし到着を待ち受けていたプロジェクトメンバーやメーカー担当者ら総出で開梱作業を進めました。ところで筆者はアメリカ・メリーランド州で開催された水星の科学会議に出席していたため、MMO の到着後に

合流。北米から南米へ移動するのにパリ経由というルートで、初の世界周遊チケットという過酷な旅程でしたが体調を崩すことなく無事に乗り切りました。衛星を開梱するとまずは輸送後の健全性確認試験を行い、MMO の無事を確認しました。



CSG クリーンルームにて MMO と JAXA および NEC メンバーの集合写真。(一番左が筆者)。

今後は 6 月いっぱいまで MMO 単独作業が続き、その後は BepiColombo 全機結合作業、ロケットへの搭載作業、そして打上げカウントダウンへと進んでいきます。これからますます気の抜けない作業の連続となっていきますが、落ち着いて無事に打上げを迎えられるように引き続き気を引き締めて取り組んでいきたいと思ひます。

なお、クーラー生活記については紙面の都合上、別の機会にたっぷりと報告したいと思ひます。どうぞお楽しみに！ (村上 豪)

JAXA 相模原キャンパス 特別公開 2018

通常の見学では見ることができない施設の公開や、最新の研究内容をわかりやすく紹介します。衛星やロケットの模型展示、工作・実験など子どもから大人まで楽しめるイベントが盛りだくさんです。

日 時	2018 年 7 月 27 日 (金)・28 日 (土) 10 時 00 分～16 時 30 分 (両日共)
会 場	JAXA 相模原キャンパス / 相模原市立博物館 / 国立映画アーカイブ 相模原分館
交 通 ア ク セ ス	JR 淵野辺駅南口より直通の無料送迎バスが運行されます。(特別公開当日限定) 当日はたいへんな混雑が予想されます。できるだけ公共交通機関をご利用ください。JR 横浜線「淵野辺駅」南口下車徒歩 20 分。
問 い 合 わ せ	JAXA 宇宙科学研究所 広報 ☎ 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL : 042-759-8008

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。

近日参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

乙姫殿、お宝をいただきます。

参上

「はやぶさ2」

HAYABUSA2

NIRS3によるリュウグウの含水鉱物探査 ～地球の水の起源を求めて～

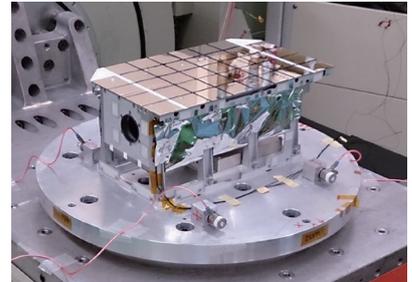
「はやぶさ2」が探査する小惑星リュウグウは、C型というスペクトルタイプの小惑星です。C型小惑星は、小惑星帯の中でも外側の、水が氷として存在できる領域に多くが分布しています。リュウグウもこの領域で誕生した後に、地球に近づく現在の軌道に移動したと考えられています。一方、C型小惑星に似たスペクトルを持つCコンドライト（炭素質の隕石）は、含水鉱物や層間水という形で水を含んでいることが知られています。これらのことからC型小惑星は、小惑星帯の外側に存在する水を地球に運んだ有力な候補と考えられています。もしリュウグウに水の存在が証明できれば、地球の水の起源を探る有力な手掛かりとなります。

「はやぶさ2」に搭載された近赤外分光計 NIRS3（ニルス・スリー）は、波長 1.8～3.2 μm の近赤外線分光観測して、3 μm 付近の水の吸収帯を測ることができる装置です。もしリュウグウの表面に水が含水鉱物等の形で存在すれば、太陽光のうちの波長 3 μm 付近の赤外線が水酸基や水分子によって吸収され、他の波長と比べて暗く反射されます。さらに波長毎の吸収の深さは、含まれる水の量（水質変成度）や過去の最高温度（熱変成度）によって変化することから、リュウグウ全体を観測すれば、リュウグウの水の総量や温度の履歴を推定する手掛かりにな

ります。また含水鉱物の分布は、「はやぶさ2」がタッチダウンしてサンプルを拾う場所を決めるための重要な指標になります。

NIRS3の開発では極力質量や電力を抑えながらも十分な性能を発揮できる装置を目指しました。このために、冷凍機を搭載しないでラジエータによる熱放射で温度 -85°C を達成し、その環境で十分な性能を発揮するインジウム・ヒ素（InAs）検出器を採用しました。「はやぶさ2」打上げ前の地上試験では、Cコンドライトなどの反射スペクトルを測定して、含水鉱物中の水を検出できることを確認しました。また「はやぶさ2」打上げ後の地球スイングバイでは、地球には大量の水が存在し月にはほとんど水がないことを、きちんと見分けています。そして今年6月のリュウグウ到着で、太陽系の新たな知見の幕開けをもたらすことが期待されています。

NIRS3サイエンスチーム 岩田 隆浩（いわた たかひろ）



振動試験中のNIRS3分光計ユニット。上面がラジエータ、左側が開口部。

TIRによるリュウグウの熱放射観測

「はやぶさ2」は中間赤外線（波長 8～12 μm ）のカメラ TIR を搭載し、小惑星リュウグウの熱撮像を行う、小惑星のサーモグラフィだ。小惑星リュウグウは自転にともなって昼は太陽光の加熱、夜は放射冷却によって、昼夜間で温度較差が生じる。その温度の変動幅や、最高温度に達する時刻の遅れから、小惑星表面の物理的な状態（熱慣性）を上空から非接触で調べることができる。一般に細粒の砂だと熱慣性は低く、温度較差は大きく時間遅れは小さい。逆に粗粒ほど熱慣性は高く、温度較差は小さく時間遅れは大きい。

熱放射観測は、惑星探査の初期から定番観測のひとつだ。周回機が直下点を連続的に計測しつつ、地域分布を調べるのが一般的だ。「はやぶさ2」は周回ではなく、ホームポジションに滞在する方式なので、TIRでは小惑星の半球をパシャリと2次元撮像する。TIRは「あかつき」搭載中間赤外カメラ LIR で開発された、2次元ボロメータの技術的進歩によって実現された。

TIRは、科学とミッション遂行の両面で重要な役割を担う。科学面は、リュウグウの形成過程に関わる小惑星表面構造の探査である。表層が岩盤から砂礫（レゴリス）のうち、どのような粒径の物質で覆われ、またどのよう

に形成されたかを調べる。クレータの底面の観測から、小惑星の表層だけでなく内部まで調査する。また、小惑星イトカワと同様に巨大な岩塊が表層に点在し

ていれば、リュウグウの母天体の内部で熱変成を受けたかつての内部物質を調べることができる。

ミッション遂行の面では、探査機が安全で、かつサンプル収率の高い地点の選定である。サンプル採取するとき、探査機が小惑星表面の温度環境に耐えられるかどうかをTIRの観測データを基に事前確認する。また、探査機が転倒するリスクを回避するため、岩塊の存在度の低い地域を選定する。さらに、サンプル回収率のよい、平均粒径1mm以下の地域をなるべく選定する。TIRが「はやぶさ2」の科学成果とミッション遂行に貢献する日はもう直ぐだ。

TIRサイエンスチーム 岡田 達明（おかだ たつあき）



TIRのフライト品。



ロケット打上げ現場での半世紀

元内之浦宇宙空間観測所職員

下村 和隆 (しもむら かずたか)

打上げ作業に従事して50年、JAXAを退職して11年目に、願望であった「SS-520での衛星打上げ」再トライに立ち会えた感激は、予想していた以上のことだった。再トライ決定前後の羽生実験主任・関係者の苦勞は伝え聞いていたので、成功後、感動・感激のあまり充分に喜びの言葉を伝えることができなかった。

宇宙研が内之浦で打ち上げたS-520、SS-520を含め、ほぼすべてにKE・管制班として、またノルウェーアンドーヤロケット実験場、スバルバードロケット実験場ではRB管制・点火管制班として参加してきたが、その過程で推進系の教授に「SS-520は上段に球形モーターをつければ衛星打上げが可能では」と質問したことがある。そのときに明確な計画はなかったが、構想は引き継がれていたように想像する。宇宙研は伝統的に地上設備・輸送手段(ロケット)共、その時々最小・最低限のもので大きな成果を生み出してきたように思う。

過去の宇宙研には、貧乏ではあるが知恵でカバーする文化があった。搭載機器各班が動作チェックで手作りチェッカーを使うのは極めて普通のこと、また我々KE・管制班が設計製作したチェッカー・設備も、いまだ現役で稼働中である。観測ロケットに関しては、貧乏は現在も進行中とか。

再トライしたロケット・観測機器は様々であるが、その中で強く記憶に残っているのが、日本初の人工衛星「おおすみ」の打上げである。モーターと衛星の切り離しがうまくいかず、改良を加え再トライしたが、次は最終段モーターが衛星に追突。この時「残留推力」という言葉の意味をはじめて知った。宇宙での追突事故は驚きであった。次号機L-4S-5は様々な改良が施され、準備作業は順調に進む。「角度セット・点火系作業・動作チェック異常なし・バッテリー内部切り替え異常なし・着脱コネクタ離脱・搭載機器異常なし・間もなくコントローラスタートします。60秒前...」。秒読みを続けながら、いつも以上にのどの渇きを感じる。それを察してか、横から高中先生が冷めたお茶を出してくれた。打上げ後、順調な飛行の状況が指令電話から聞こえてくる。球形モーターの点火・衛星切り離しまで確認され、追突防止の小型モーターも正常作動。「成功だ！」思わず覗いた隣の実験主任野村教授は「内之浦で受信するまでは安心できないよ。」と言われているような顔でもあった。その後内之浦で電波を受信でき「おおすみ」の誕生を確認した。

私のJAXA退職の頃は「M-V」が役目を終え、後継機(現イプシロン)をどのような形で打ち上げるか、射場の場所

を含め議論の真っ最中であったように思う。町民の一人として、内之浦を引き続き射場として使用してもらいたい願いは強かったが、町民・行政の反応は満足するものではなく、「射場が他地域に変更されるのでは」という危機感日々強くなっていった。商工会、旅館組合の若手・町役場樋口氏・坂元氏等の一部職員・知り合いの橋野町議会議員に当時同僚の白坂氏と「M-V打上げ時の町に対する

経済効果」資料を作成し、町の議会で町当局に質問・働きかけをしていた。その後、町当局のJAXA/宇宙研に対する誘致陳情等認識が加速されたように思う。「後継機(現イプシロン)射場、内之浦に決定」の一報を聞いたとき、願いがかなえられた内之浦の関係者は喜びに沸いた。

最近各方面で民間ロケットが脚光を浴びている。最近、鹿児島大学のグループが観測所のKS台地でハイブリッドエンジンの燃焼試験を行う様子がTV放映された。担当教授のインタビューでの言葉が強く印象に残っている。「ロケット打上げの聖地で実験をできることに意味があります。」と。JAXA/宇宙研とのスケジュール調整・安全管理等大変な苦勞があつて実験にこぎつけられたと思う。放映の中で学生さんが作業する姿も映し出された。様々なことを体感して「優秀な技術者」に育つことを想像した。

実験場に隣接する所に町の総合グラウンドがある。利用者が少ないために「ソーラー設備設置」の噂が出たことがある。町の体育関係者を含め関係者が参加して今後の利活用について意見交換会が行われ宇宙研が様々な実験で使用させていただいた経緯を伝えた。その後町の一部関係者と有効利用について議論した。現在再使用ロケットの基礎実験を能代多目的実験場で実施していることを伝え、私見ではあるが将来「再使用ロケットの離発着場」もしくは九州管内の大学・研究機関が利用できる町営・県営「推進系内之浦多目的実験場」の誘致、夢物語かもしれないが、関係者に面会のたび「再使用ロケット施設誘致」を進行している。

小生の退職記念に茶目っ気のある担当教官から「総合グラウンド整備用スコップ」をプレゼントされた。このスコップの出番を待ちたい。



打上げ前日のSS-520 5号機とKE班



ISASニュース No.447 2018年6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/>)でもご覧いただけます。

デザイン制作協力/株式会社アドマス

編集後記

いよいよ、「はやぶさ2」が目的の小天体「リュウグウ」に到着する時がやってきました。まずは「リュウグウ」がどんな姿をしているのか、画像が送られて来るのが楽しみです。みなさまの応援も宜しくお願いします。(竹前 俊昭)

*本誌は再生紙(古70%)、植物油インキを使用しています。



古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

