



GAPSのNASA南極周回気球による打上げ(放球)

宇宙線中の稀少成分である反粒子の探索によって暗黒物質等の宇宙物理学的課題に挑むべく、GAPSの第1回フライトを実施した(p.4参照)。JAXA宇宙科学研究所からは職員1名が南極に赴き、本国からのリモート支援のもと、現地での実験運用に従事した。

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

事故に学ぶ —宇宙機の非破壊信頼性評価—

宇宙飛行工学研究系 専任教授 佐藤 英一(さとう えいいち)

はじめに

「神輿に乗る人、担ぐ人、そのまた草鞋を作る人」という言葉がありますが、科学衛星に乗って(?)天文観測をする理学の先生方、その衛星を運用するシステム系の先生方、その打上げロケットを作る輸送系の先生方、と来ると、我々材料屋は、その草鞋の藁を叩いているということになるのでしょうか。本来の仕事は、叩き方を研究して如何に強くしなやかな藁を提供するか、ということのはずですが、ひとたび藁が切れて神輿が転げたりすると、その対応に駆り出されることになります。

まだJAXA発足前の1990年代後半は、純国産ロケットH-IIや世界最大の固体ロケットM-Vが順調に運用を始め、日本もようやく宇宙先進国に仲間入りできたと皆が誇りに思っていた時期でした。ところがその直後、H-II-5号機(1998/2)、H-II-8号機(1999/11)、M-V-4号機(2000/2)、H-IIA-6号機(2003/11)

と、ほぼ連続して打上げ失敗が続いてしまいました。しかもその原因はそれぞれ、第2段LE-5エンジンノズルスカートのろう付け不良、第1段LE-7エンジン液体水素ポンプインペラーのチタンの極低温疲労、第1段M-14モーターノズルスロートの黒鉛の脆性破壊、固体ブースターSRB-Aノズルスカートの断熱材の不良という、何らかのものが壊れたというもので、それぞれ対策に多大な労力と時間がかかるものでした。

本来ならば、事故になる前に十分に予算をもらって信頼性保証をしっかりとっておかなければならなかったところですが、世の常として事故の後アタフタしてしまいます。当時の所長に、「おまえは事故が起きて商売繁盛で嬉しそうだな」と散々嫌みを言われ、それ以来、「我々材料屋は事故が起きると儲かる死の商人であります」と自称しています。

M-V-4号機の打上げ失敗

M-Vロケットは、全段固体ロケットモータの3段式ロケット

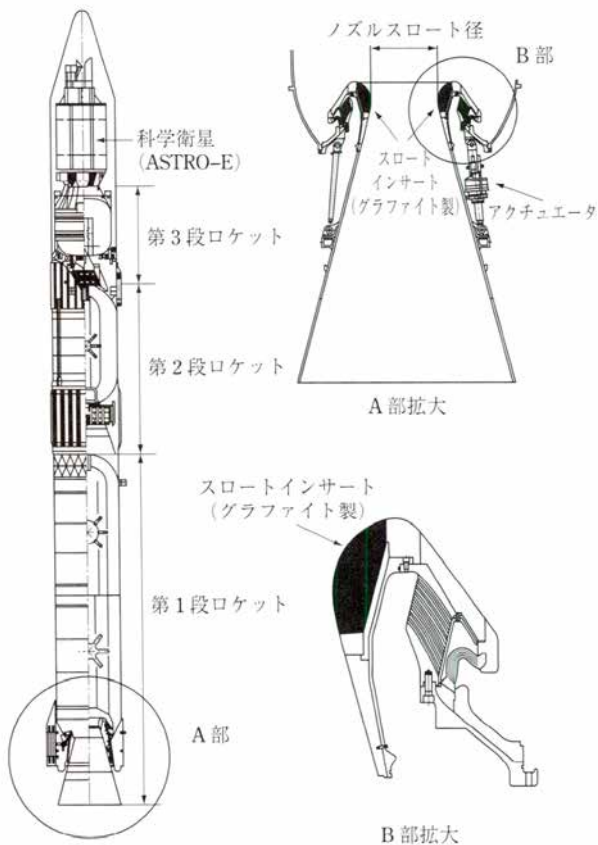


図1：M-Vロケット、第1段モータノズルおよびノズルスロット部の概要[1]

で、高度250kmの地球低軌道に約1.8トンの衛星を投入することができます。1997年に1号機が電波天文衛星「はるか」を、1998年には3号機が火星探査機「のぞみ」を成功裏に打ち上げています。3回目の打上げになるM-V-4号機は、X線天文衛星ASTRO-Eを搭載して2000年2月10日打ち上げられましたが、第1段モータの黒鉛製ノズルスロットインサートが破損脱落し、発射後55秒から姿勢が大きく乱れ、残念ながら衛星を軌道に投入することはできませんでした。

図1にM-Vロケットと第1段モータノズル部分を示します。固体ロケットモータでは、モータ本体がそのまま燃焼室になっており、燃料・酸化剤はあらかじめ練り合わされ燃焼室に充填されています。高温高圧の燃焼ガスは、ノズルを通過して超音速で吹き出し、推力を生み出します。ノズルの一番くびれた部分がスロットと呼ばれています。

このノズルスロットは、過酷な環境で使用される固体ロケットモータの中核部品であり、燃焼ガスに対する高い耐熱性、耐熱衝撃性および耐浸食性が要求されます。黒鉛(グラファイト)はノズルスロットインサートとして広く用いられてきており、製造現場において十分な信頼性が確保されていると判断されていました。

しかしながら、M-V-4号機は、第1段モータのスロットインサートの破損脱落により、衛星を軌道に投入することができませんでした。不具合調査において、スロットインサートへの負荷(熱入力)の再評価と破壊統計論による強度解析を行った

結果、健全なスロットインサートが破壊する可能性はきわめて小さく、黒鉛固有の内部欠陥あるいは組み立て加工時に生じた表面欠陥が破損の原因であると考えられました。

黒鉛の破壊の多軸破壊統計論と非破壊検査

黒鉛やセラミックスのような脆性材料は、材料内にあらかじめ存在している微小欠陥からき裂が伝播して破壊が起こります。したがってある部材の強度はその部材に含まれる欠陥寸法によって定まり、欠陥分布を反映した確率で与えられることになります。その結果、たとえば部材が大きければ大きいほど、より大きな欠陥が存在する確率が高くなるので、材料強度はそれに応じて低下するといった、一見奇妙な挙動が現れます。また、スロットインサートの負荷は熱応力が主であり、圧縮成分を含む多軸応力状態となっています。引張に加えて別方向に圧縮された状態では、引張方向に斜めに傾いた微小欠陥も破壊の起点となり得るので、材料強度はさらに低下することになります。このような脆性材料独特の破壊挙動を表す理論が多軸破壊統計論と呼ばれるものです。

この破壊統計論はあくまで確率論ですので、脆性材料が使用中に破壊しないことを決定論的に保証するには、その材料中に許容されるある大きさ以上の微小欠陥が存在しないことを非破壊検査によって保証することが必要になります。燃焼中の熱入力、熱構造解析により、検出すべき欠陥はあらゆる方位を向いたφ3mmの割れであるとされました。黒鉛に対し、これまである程度の定量的な非破壊検査が行われたのは、日本原子力研究所高温工学試験研究炉(HTR)の炉心支持黒鉛構造物についてのみであり、軸および周方向のφ5mmの割れを対象としたものでした。黒鉛に対し全方位のφ3mm割れを対象とした探傷は、放射線探傷や超音波探傷を検討したところ、当時の技術レベルでは非常に難しいことが分かりました。

黒鉛の全部位全方位探傷方法の開発

そこで我々は、黒鉛をロケットで継続使用していくために、あらゆる方位の割れを検出できる非破壊検査方法を開発しました。探傷システム自体は、通常の一探触子・パルス反射・水浸法の超音波探傷システム*です。あらゆる方位の割れを検出するため、1つの入射面に対して平面の走査に加え独立した2つの入射角を変え、2軸の入射角走査と2軸の面走査、計

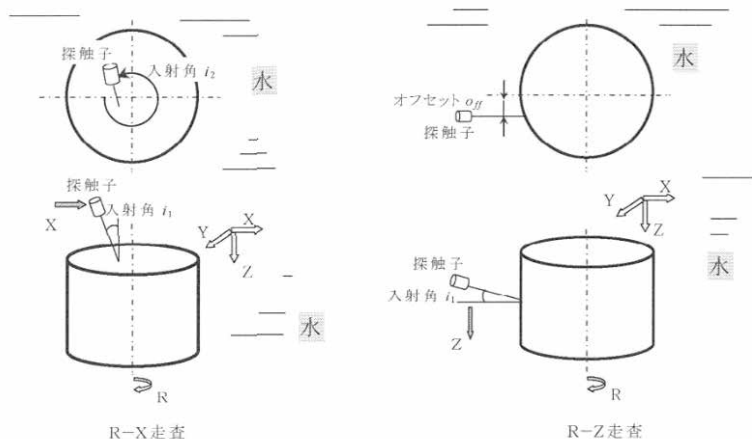


図2：円柱黒鉛素材の超音波探傷全方位走査方法[2]

*探触子(超音波振動子)からパルス状の超音波ビームを水中に置かれた試験体に向けて送信し、試験体内の割れで反射されてきたパルスと同じ探触子で受信し、割れのあることを検出する。

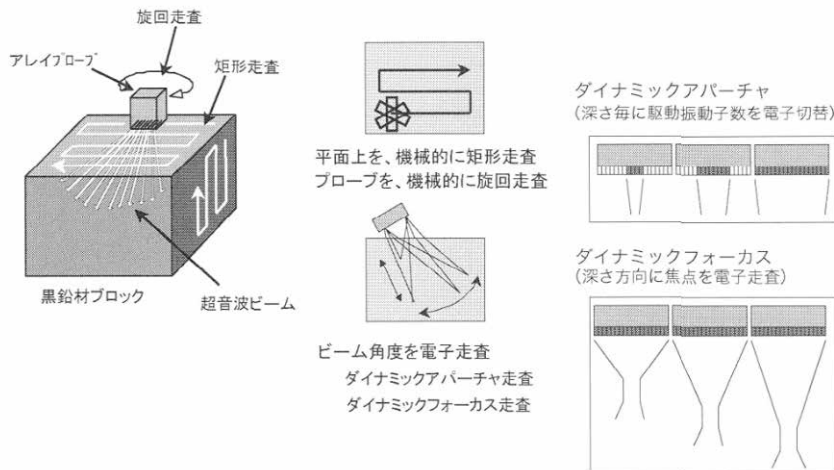


図3: 直方体黒鉛素材のフェーズドアレイ法による超音波探傷全方位走査方法[2]

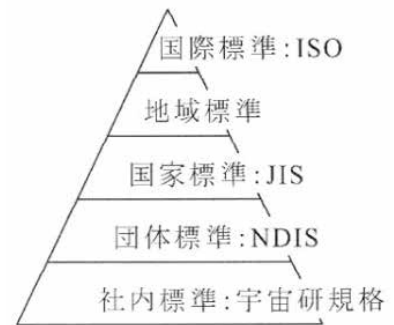


図4: 技術標準の階層[2]

4軸の走査を行います。具体的には、図2に示すように、試験体は円柱形状とし、端面入射と側面入射に分けて、端面入射の場合は上下角 i_1 と水平角 i_2 を組み合せ、側面入射の場合は上下角 i_1 とオフセット off を組み合せ、試験体を回転させながら探傷していきます。これにより試験体内の全部位全方位の探傷が可能となります。この手法はS-310観測ロケット30号機の実機の品質保証に適用され、2002年2月のフライト成功にまで辿り着きました。しかしながら、2つの入射角それぞれに対して通常の入射面の走査が必要であること、その条件設定が複雑であることから、長時間の検査作業、解析作業が必要であることが大きな問題として残りました。

そこで我々は並行して、フェーズドアレイ法による新探傷検査システムの開発を進めてきました。フェーズドアレイ法(電子スキャン法)とは、複数個の小さな超音波振動子からなるアレイプローブを用い、それぞれの素子の送受信タイミングをコントロールし、超音波ビームの角度や焦点を電子的に変えて探傷する技術です。システムの一歩の課題である、あらゆる方位の割れを見落とさなく検出する手法として、図3に示す全方位探傷自動探傷手法を開発しました。

公的規格化・ISO 10830

宇宙分野では、有用な技術が開発されても関係機関内に機微情報として留められ、外部に公表されるケースが極めて少ないのが通常です。これに対し、本研究成果は積極的に公的な規格化(標準化)の働きを続けてきました。技術標準は、図4に示すように、社内標準、団体標準、国家標準、地域標準、国際標準という厳しい階層構造となっています。開発した探傷手法も、まず社内標準に相当する宇宙科学研究所報告を2003年9月に纏めた後、団体標準に相当する日本非破壊検査協会規格(NDIS 2425)を2004年7月に、国家標準として日本工業規格(JIS Z 2356)を2006年6月に制定・発行しました。最後に、国際標準であるInternational Standard(ISO 10830, Automatic ultrasonic inspection method of graphite ingot for solid rocket motors)を、時間はかかりましたが2011年7月に制定・発行しました。

NDISは、日本非破壊検査協会(JSNDI)の標準化委員会で審議し、制定されます。JISは、日本工業標準調査会(JISC)で制定

されます。今回はJSNDIで原案を作成してJISCに提出し、JISC内の調査審議を経て制定されました。ISOは、国際標準化機構International Organization for Standardization(略号は頭文字と異なっています)のTC20:航空機・宇宙機専門委員会、SC14:宇宙システム・運用分科会で制定されます。SC14はいくつかの参加国(米・露・中・仏・英・独・伊・加・ブラジル・ウクライナ・日)から構成されておりますが、日本の代表機関は日本航空宇宙工業会(SJAC)になります。SJACからTC20/SC14に、筆者をプロジェクトリーダーとした新規プロジェクトとして提案した後、TC20/SC14のメンバー国間での投票を経て新作業項目提案、作業原案作成、委員会原案作成、国際規格原案照会、最終国際規格案という手順を経て、これらがすべてメンバー国間の投票で承認された後に、国際規格として制定されました。TC20/SC14会合は各国持ち回りで開催されていまして、この審議期間中は年2回の会合に参加し、ブラジルのサン・ジョゼ・ドス・カンボスなどめずらしいところへ行く機会にもなりました。

おわりに

本記事では、M-V-4号機の打上げ失敗への対策として新しい非破壊検査方法を開発し、その後の継続的なロケット打上げに繋がったこと、およびこの非破壊検査方法は積極的に公開してISO規格まで持ち上げたことを紹介しました。ただし、この非破壊検査は非常に時間と手間がかかるものなので、並行してより洗練されたフェーズドアレイ法による探傷検査システムを開発し、運用しています。なお、運用実績が積み重なった現在、可能な部分は非破壊検査からプロセス保証に置き換える検討も慎重に進めております。最終目的は宇宙機の信頼性を保証することであり、それをできるだけコストをかけずに実現することを目指すのが、信頼性工学の発展として当然のことと言えます。また新たな事故にアタフタして、別の箇所の信頼性保証に慌てて取り組むことのないことを祈りながら。

文献

[1] 佐藤, 小野田, までりあ, 40(2001) 723-730.

[2] 佐藤, までりあ, 44(2005) 554- 559.

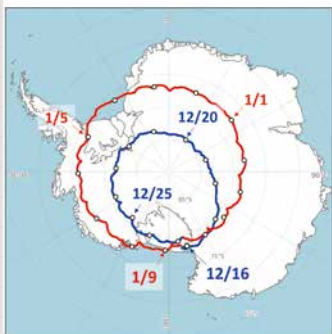
宇宙線反粒子探索実験GAPS 第1回南極気球フライトの実施

このたび、JAXA宇宙科学研究所の小規模計画の1つとして推進されている宇宙線反粒子探索実験GAPS (ギャップス、General Anti-Particle Spectrometer (汎用反粒子スペクトロメータ))の第1回南極気球フライトを実施しました。

GAPSは宇宙線中に僅かに含まれている反粒子(反物質)の高感度な観測・探索を通じて、暗黒物質(ダークマター)の解明等、現代の宇宙物理学・素粒子物理学における重要課題に迫ることを目的とする研究計画です。反粒子のなかでもとりわけ未発見の反重陽子は、暗黒物質の対消滅等を起源として宇宙線中に極僅かに存在している可能性があり、その検出に最適なエネルギー領域にて、エキゾチック原子(原子核の周りに反粒子を捕獲すること

で短時間のみ形成される通常とは異なる原子)を利用した独自の反粒子識別手法を用いて、世界最高感度での探索を行います。

GAPS観測装置は、日本時間2025年12月16日に、米国マクマード基地の気球実験実施拠点からNASAの大型気球によって放球されました(表紙参照)。気球は高度約35kmまで上昇した後、約25日間をかけて南極大陸上空を2周飛行し、その間、宇宙線の観測が実施されました。観測装置は日本時間2026年1月10日に



南極大陸上空を2周した気球フライトの航跡図。青色が1周目、赤色が2周目。各日付は世界標準時午前0時時点の位置を示す。

©JAXA made with Natural Earth

マクマード基地近郊のロス棚氷上にパラシュートで降下した後、1月23日までに回収され、観測装置内の記録媒体に蓄積された約15テラバイトの観測データも無事に確保されました。

今後、取得したデータを詳しく解析し、宇宙線反粒子に関する研究を進めていきます。また、回収され現在米国に輸送中の観測装置に関しては、2回目以降のフライトに向けた整備や性能向上を今後進めていきます。

GAPSは日本・米国・イタリアを中心とする国際共同実験です。国内機関としては、JAXAに加えて、青山学院大学、神奈川大学、大阪公立大学、情報システム研究機構、信州大学、東北大学、東海大学等が参加し、コロンビア大学を中心とする米国チームや国立核物理学研究所(INFN)を中心とするイタリアチーム等と共同で研究を進めています。日本では、JAXAの小規模計画経費や宇宙物理学委員会経費、日本学術振興会の学術研究助成基金助成金や科学研究費助成金、住友財団基礎科学研究助成費、三菱財団科学研究助成費等、米国ではNASAや国立科学財団(NSF)やハイジーン・シモンズ財団の研究支援プログラム等、イタリアでは宇宙機関(ASI)やINFNの研究支援プログラム等からご支援を頂いているほか、千代田空調機器(株)、(株)冷熱研究所、(株)島津製作所、(株)SUMCOグループ等からのご協力を頂いています。米国南極気球実験事業はNSF米国南極事業(USAP)のもと、気球プログラム室(BPO)やコロンビア科学気球施設(CSBF)等によるNASA気球実験事業として実施されています。実験実施にご協力頂きました関係者の皆様に深く感謝いたしますとともに、引き続きのご支援をお願い申し上げます。(福家 英之、青山 一天)

Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡の打上げ迫る

Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡(以下Roman)の組み立てが完了し打上げに向けての準備が進められています。Roman望遠鏡はJames Webb宇宙望遠鏡に続く米国・NASAの基幹望遠鏡計画であり、2.4m広視野望遠鏡・装置によりダークエネルギーの解明など宇宙論研究や太陽系外惑星の質量・軌道分布の全貌を明らかにしようとする研究を行います。また、コロナグラフ装置を搭載し、次世代望遠鏡による地球型系外惑星の直接観測に向けた技術実証を行います。NASAは、公式には2027年5月までの打上げを約束していますが、順調に進む現在の計画では、2026年初秋の打上げを目指しています。

Roman本体は、2025年中頃から主要最終試験として、振動・音響試験、そして、65日間にわたる熱真空試験を行い、打上げおよび宇宙環境での機能試験を完了しました。その後、望遠鏡のカバーと太陽電池パネルが取り付けられて、同年11月には宇宙望遠鏡衛星としての組み上げが完了したことが報告されました。順調にいけば2026年初夏にはケネディ宇宙センターに移動し、スペースX社のファルコン・ヘビーロケットによって、太陽-地球L2軌道にむけて打ち上げられる予定です。

打上げに向けて、日本の貢献部分・科学協力についても精力的に準備が進められています。コロナグラフ装置には偏光光

学素子を設計・製作し提供していますが、技術実証観測における偏光モード試験計画の策定、偏光解析ソフトウェアの開発を自然科学研究機構・

アストロバイオロジーセンターとの協力などで進めています。同・国立天文台とも協力して進めるすばる望遠鏡を用いた協調観測では、観測テーマの選定・公表が行われました。大阪大学・PRIME望遠鏡による銀河バルジ領域の協調観測も順調に進んでいるところです。美笹深宇宙探査用地上局を用いたデータ受信・伝送については、追跡ネットワーク技術センターとの協力で、2025年7月までに開発完了審査を無事に終え、運用準備が行われています。本番の地上系通信環境を用いた模擬データの受信・伝送試験も2026年2月までに完了し、長期的な受信スケジュールの調整もすでに始まっているところです。いよいよ打上げに向けた最終段階となり、JAXA貢献部分を担うプロジェクトとしても緊張感を持って準備を進めてゆきたいと思っています。(山田 亨)



(中央) 組み上がったRoman望遠鏡* (左上) 美笹局54mアンテナのRoman機器が置かれるキャビン(右) その中に設置されたKa26 GHz帯の受信・伝送系の機器(左下) はコロナグラフ装置の偏光光学素子(WallastonPolarizer Assembly)

* NASA: <https://www.nasa.gov/missions/roman-space-telescope/nasa-completes-nancy-grace-roman-space-telescope-construction/>

Artemis IV 月面観測機器として地震観測装置を選定 — 日本の能動地震探査技術が国際有人月探査へ —

NASAは、有人月探査ミッション「Artemis IV」において月面に展開する科学観測機器として、South Pole Seismic Station (SPSS) (南極域地震観測装置)を選定しました。SPSSは、月南極域における地震観測と地下構造探査を目的とした国際共同観測システムであり、本装置に日本の研究機関が開発する観測機器が組み込まれることになりました*。

SPSSは、月内部で発生する自然地震を高感度で観測するための地震計システムです。フランス国立宇宙研究センター (CNES) およびパリ地球物理研究所 (IPGP) が中心となって開発する広帯域地震計が搭載され、Apollo計画以来となる本格的な月面地震観測が、最新の観測技術を用いて実施される予定です。

本計画において日本は小型震源装置 PASS (Portable Active Seismic Source) の開発を担当しています。PASSは東京大学およびJAXA宇宙科学研究所 (ISAS) を中心に研究・開発が進められており、人工的に微小な振動を発生させ、その伝わり方を地震計で観測することで、着陸地点周辺の地下構造を詳しく調べる装置です。宇宙飛行士が月面で設置・操作できるように、小型・軽量で扱いやすい設計となっています。

SPSSでは、自然地震の受動観測に加えてPASSによる能動的な

探査を組み合わせることで、月表層から浅部地下に至る構造を高い分解能で明らかにすることが可能になります。これにより、月の形成史や内部構造の理解が進むとともに、将来の月面探査や長期滞在に向けた地盤評価、さらには資源探査の基礎データとしても重要な成果が期待されます。

Artemis IVにおけるSPSSの選定は、日本の地震・地下探査技術が国際的な有人月探査の科学観測に組み込まれることを示すものです。今後の月探査において、本観測から得られる知見が、月科学および探査技術の発展に広く貢献することが期待されます。(田中 智)



小型震源装置 (PASS) のプロトモデル。上側の取手を宇宙飛行士が地面に押し付けて下部の振動装置を駆動させます。

* <https://www.exploration.jaxa.jp/news/newspage/20251222.html>

Comet Interceptor (長周期彗星探査計画) の JAXA・ESA合同試験再び

欧州宇宙機関 (ESA) と共同で実施しているComet Interceptor ミッションの続報です (過去の報告はISASニュース2025年1月号*¹、7月号*²、8月号*³、10月号*⁴)。本ミッションはESAが担当する親機Aおよび子機B2と、JAXAが担当する子機B1の3機の探査機で長周期彗星をフライバイ観測する計画です。冬季オリンピック開催がせまる2025年12月に、子機B1のシステムメーカーおよびJAXAの技術者は、親機Aのシステムメーカーがあるイタリア・ミラノへ赴きました。目的はJAXA側が開発した構造検証モデル (Structural Qualification Model: SQM) を、ESA側の試験モデルと結合して機械インターフェースの確認、所謂かみ合わせ試験を行うことでした。打上げに際して、子機B1は親機Aのバンパーの上



SQM かみ合わせ試験完了後の記念写真。人と人のあるオレンジとグレーの物体 (矢印) が子機B1のSQM。

に結合されます。この結合の作業工

程やケーブルの形状・長さ、周りの構造物との干渉、必要工具といった項目の適合性を本試験で確認しました。

2024年11月には電気的なインターフェースの確認のための試験*¹を行っており、今回はそれに続く2回目のJAXA側とESA側による合同試験になります。試験に際してはJAXA側とESA側とで十分な意思疎通をし、必要な物品リストや詳細な手順書を作成し合意した上で臨みました。そのような入念な準備をしたとしても、当日の現場で作業に取り掛からないと判明しない見落としはあるものです。例えば分離に必要な電源装置がない、インチに対応した工具の品ぞろえが不十分などのトラブルが起きました。こういったトラブルは日欧代表で協力しつつ現場の知恵で乗り越えて、最終的には予定していた試験項目を、妥協することなくすべて終えることができました。本試験を通じて、機械的インターフェースが適合していることに加え、フライトモデル (FM) 開発に向けた修正項目やFM納入後の結合作業についての課題を洗い出すことができました。今後もチーム一同子機B1の引き渡し・打上げに向けて邁進していきますので、引き続きのご支援・応援をどうぞよろしくお願い致します。

(宇佐美 尚人、白鳥 弘英)

*1 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews526.pdf

*2 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews532.pdf

*3 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews533.pdf

*4 https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews535.pdf

ISAS / JPL ワークショップ開催

2026年2月16日(月)から18日(水)までの3日間、ISASにNASAジェット推進研究所(JPL)および関連するカリフォルニア工科大学のIPACから20名の研究者が来訪し、ISASや関連する研究者と総計58名を集めて、ISAS/JPLワークショップが行われました。

このワークショップは2024年2月にJPLをISAS所長・副所長(当時)が訪問した際に、探査分野だけでなく天文分野でもより交流を活性化させたい、という議論に端を発し、2024年10月にはISASから10人程度がJPLを訪問し、1回目が開催されました。次は2025年12月頃にISASで、という話をしていたのですが、昨年前半はNASAの予算問題などで具体化が進まず、結局一番寒い頃の開催となってしまいました。1週間ずれると雪だったんだな、と思うと恐ろしいです。

当初、JPL側は5~10人は行きますよ、というくらいの感触でしたが、プログラムの具体化を進めるにつれ人数が増え、結局20人もの研究者が相模原キャンパスに集い、会議室では予備の椅子を出すほどの盛況ぶりでした。肝心のプログラムは、「これからの宇宙物理学の可能性」「これからのキー技術の種」を2大テーマとしました。宇宙論、初期宇宙観測から系外惑星までの様々な天体形成の具体的過程について、現在の観測結果よりも将来の観測手段をどう実現するか、というところに主眼を置いて、それぞれのセッションで双方から、また若手からシニアま

で、発表と議論を行いました。

もうすぐ打ち上げられるNancy Grace Roman宇宙望遠鏡での日米協力の話から、2040年代のHabitable Worlds Observatory (HWO)ではどのような協力があろう

るか、さらに量子計測技術から重力波観測にどう繋がっていくかという20~30年先を考える話まで、また観測手段としてもミリ波から遠近赤外線、可視光から紫外線での光学や分光デバイスなど様々な話題で共通の関心が見つかりました。

セッションの合間には昼食やコーヒープレイクを共にし、その間にも今後の協力、あるいは宇宙科学のよもやま話で盛り上がり、セッションの後では、宇宙探査フィールドやキュレーション施設の見学も実施しました。どちらも会議室から徒歩1分、建屋入って扉2枚通れば世界最先端の施設がある、という宇宙研のコンパクトさを味わっていただきとても好評でした。関係の皆様には大変ご尽力、ご協力をいただきありがとうございました。(山崎 典子)



会議初日にとった集合写真
(撮影:エリザベス・タスカー氏)

第1惑星保護クリーンルーム(PPCR-1)完成

火星や氷天体といった生命が存在する可能性のある天体の探査をする際には、微生物汚染管理を伴う惑星保護、すなわち「地球の微生物で生命生存可能な天体を汚染しないこと」「他天体の生命で地球を汚染しないこと」の双方の対応が求められます。例えば火星着陸探査では、探査機の組み立て/試験から打上げまでの一連の工程をクリーンルーム(CR)で行い、付着した微生物量を評価し、基準値以下であることをクリアした上で、初めて打上げ許可が得られます。惑星保護チーム(自称)の調査の結果、種子島宇宙センターの設備は万全。一方、ISAS側に課題が残されているとわかりました(鈴木、ISASニュース2023年12月号*)。

これを受けてISASでは、新たなCR整備を決定しました。

天井をぶち抜き、柱を削ってスペースをひねり出す——なかなか豪快なスタートでした。2025年に設営を開始してからは、完成に向けて一歩一歩前進。気がつけば、濃密な日々の積み重ねがかたちになっていました。

こうして誕生した「第1惑星保護クリーンルーム(Planetary Protection Cleanroom 1:PPCR-1)」は、以下のような特徴があります。

- 直径3m級の展開型エアロシールドの伸展、格納が可能
- 空気清浄度、温湿度、室間差圧を常時監視、記録
- 無菌服使用やアルコール拭き取り等で微生物持ち込みを抑制
- フライト機器の熱殺菌が可能なオープン有する

最初のミッションとしては小型火星着陸を想定していますが、海外ミッションへのコンポーネント提供を含め、今後さまざまな探査計画で活躍してくれるはず。もちろんCRIは完成して終わりではありません。微生物との真剣勝負はむしろこれからが本番ですが、まずは、ご協力下さった多くの方々、根気強くやり遂げて下さった関係各社の皆様に、深く御礼申し上げます。

(木村 駿太、小澤 宇志)



外観：構造機能試験棟に突如出現した惑星保護クリーンルーム。周りの方々は困惑されたことと思います。



内観：小柄ながら本格派。作業中もISO Class 7 HC (Highly Controlled) を達成。



MMXはフォボスを目指す!



MMXのシステム総合試験

MMXでは、2026年度の打上げを目指し、現在、探査機システムPFM(プロトフライトモデル)のシステム総合試験を進めています。

システム総合試験は、探査機インテグレーションと、探査機システムの組立が完了した以降のシステムPFT(プロトフライト試験)の2つのフェーズから構成されています。本稿では、システム総合試験の概要と状況についてお話しします。

探査機インテグレーション

システムPFTにおける一連の試験に先立ち、コンポーネントや探査機構体などのフライト品を用いて探査機システムを組み立てる作業工程である、組立およびDCインテグレーション(DC-INT)を実施します。組立は、復路/探査/往路各モジュールのシステム構体上にコンポーネントの搭載および計装類の機械的なインテグレーション作業となります。DC-INTは、各コンポーネントの組立作業後、バスやミッション機器と探査機バス(主に、データハンドリングや電源系機器)間との電氣的インターフェースの確認や機器個別の機能確認を実施する試験を指します。

モジュール結合前には探査/復路モジュール間を試験ケーブルで接続し、結合状態を模擬して、サブシステム接続試験やシステム総合動作確認を実施します。

システムプロトフライト試験

システムPFTは、搭載機器(バス、ミッション)およびシステムPFM設計および製造結果が要求事項を満足させるに十分であり、かつフライトに供する品質を有していることを立証することが目的です。システムPFTにおける試験実施項目を表に示します。

MMXでは、火星衛星フォボスに着陸・滞在し、サンプル採取することがミッション目的の1つであることから、着陸脚展開試験やサンプリングミッション試験などのミッション特有な試験を実施します。写真は、機械環境試験前に全モジュールを結合した際の探査機システム外観です。

システム総合試験の状況

試験手順の準備においては、バスシステムは探査機システムメーカーである三菱電機が、ミッション機器やそれに関する設定に関してはJAXAおよびミッション機器チームがそれぞれ分担する形で進めてきました。試験当日は、三菱電機および各機器チームとのやり取り、ミッション機器の手順進行ならびに何か問題が発生した際の判断を担う試験のスーパーバイザーをJAXA側から現場に配置する形で参加し、協力体制のもと試験がスムーズに進行するように努めてきました。各種手順や機器の動作概要などの理解が深まり、軌道上での実運用に向けてスキルアップにつながったと考えています。

MMXで実施するシステム総合動作試験の実施項目として、軌道上運用で計画している運用シナリオ(定常運用、長時間日陰、降下・着陸/滞在・離陸/上昇運用、異常時ケース、探査モジュール分離後復路モジュール単独、等)をベースに構成しています。本試験シナリオは、初期電気試験、熱真空試験(低温/高温)、最終電気試験において共通のシナリオとして実施する計画です。この他にも、火星軌道投入/離脱シーケンスやモジュール分離模擬などの試験項目も個別に実施する計画としています。



全モジュールを結合したMMX探査機の外観

2024年初頭に本格的に組立・DC-INTが始まって以降、特に最初の頃はトラブルに見舞われることも多く、解決に向けて苦労する場面もあり、山あり谷ありのシステム総合試験でしたが、現時点では射場で実施する最終電気試験を残すのみとなりました。三菱電機鎌倉製作所での試験を全て終え、種子島宇宙センターへ向けての探査機の輸送を進めています。それが終わると、いよいよ打上げ準備に移行します。

嶋田 貴信(しまだ たかのぶ)

作業項目	実施内容
初期電気試験	<ul style="list-style-type: none"> ● PFMとして製作された探査機に、電氣的機能/性能についての異常が生じていないことを確認する。 ● バス、ミッション機器/システム総合動作試験に要求される項目に対し試験を実施する。
熱真空試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱平衡試験により、熱設計及び熱制御の機能/性能が妥当であることを確認する。 ● 熱真空試験により、熱真空試験環境下での供試体の電気性能に異常がないことを確認する。 ● 熱真空試験前後での電気試験を実施する。
機械環境試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 以下の機械環境試験を経ても、探査機の電気性能や機器のアライメントに異常がないことを確認する。 <ul style="list-style-type: none"> - 正弦波振動試験 - 音響試験 - ミドルゲインアンテナ、太陽電池パドル保持解放/モジュール分離衝撃試験 ● 機械環境前後での電気試験を実施する。
電磁適合性確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 電波暗室にて、アンテナからのRF放射を行い、電磁適合性設計の妥当性を確認する。 ● ROVERのRF通信に関するエアリンクを確認する。
End to End試験/運用手順検証	<ul style="list-style-type: none"> ● 地上局側機能を接続させ、各システム動作、モード動作が実施可能なことを立証する。 ● 運用手順書を探査機実機にて検証する。
着陸脚展開試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 探査機システムの機械環境試験終了後、着陸脚の健全性を確認することを目的に、脚伸長さなどのテレメトリを取得・確認する。
サンプリングミッション試験	<ul style="list-style-type: none"> ● サンプリング収集からカプセル収納までの一連の動作が、干渉なく実施できることをEnd to Endで確認する。
推進系機能確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 推進系の機能/性能が、一連のシステムPFTを実施後においても推進系サブシステム試験時の状態を維持していることを確認する。
最終電気試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 供試体の電氣的機能/性能について異常が生じていないことを確認する。 ● 一連のシステムPFT実施後においても供試体がPFT開始時の電氣的状態を維持していることを確認する。

宇宙・夢・人

Space Human Dream

宇宙科学プロジェクトへ 飛び込んだ先に

理工一体ミッション全体を広く見渡す

——深宇宙探査技術実証機DESTINY+プロジェクトチームに所属されています。どのような役割を担当しているのですか？

DESTINY+は、ふたご座流星群の母天体である小惑星フェートンのフライバイ探査を行います。打上げは2028年度の予定です。私は、地上系システムの整備と探査機システムを担当しています。予算管理などのマネジメント業務にも携わっています。DESTINY+は、理工一体ミッションです。私は理学系の出身で、熱や構造など探査機の開発に必要な工学的な専門性は持っていません。また、大学院での研究分野は宇宙地球電磁気学で、小惑星が専門でもありません。だからこそ、プロジェクト全体を広く見渡すことができていると思っています。

——DESTINY+のどのような点に魅力を感じていますか？

DESTINY+は、私にとって2つ目の宇宙科学プロジェクトです。1つ目は、2016年に打ち上げられたジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)でした。「あらせ」は地球を周回する衛星で、このときもたくさんの新しい経験をしました。DESTINY+は地球を離れ、惑星間空間を飛行します。深宇宙探査機の開発・運用は私にとって未知の世界なので、また新しい経験ができるかと期待しています。それに、小惑星と聞いただけでワクワクします。しかもフライバイ探査とあって、フェートンの近くを秒速約36kmという高速で通過しながら2台のカメラでその表面を観測するのです。その一瞬を逃さないために、しっかり準備を進めています。

宇宙科学プロジェクトに携わりたかった

——「あらせ」には、どのような経緯で参加したのですか？

JAXAでの最初の配属先は筑波で、その後、宇宙研で行われているプロジェクトを支援する宇宙科学プログラムオフィスに異動しました。そこで担当したのがERGプロジェクトの立ち上げでした。実は、JAXAの採用面接のときから「宇宙科学プロジェクトをやりたい」と言い続けていました。ERGの立ち上げを支援する中でも、その思いがあふれ出ていたのでしょう。ERGのプロジェクトマネージャが「ウェルカムだよ」と声を掛けてくれ、上長も後押ししてくれたのです。

——宇宙科学プロジェクトに携わりたいと思うようになったきっかけを教えてください。

私が大学院時代に所属していた研究室では当時、人工衛星の運用当番がありました。私も宇宙研に行き、磁気圏尾部観測衛星

DESTINY+プロジェクトチーム 主任研究開発員

小川 恵美子 (おがわ えみこ)

大阪府生まれ。京都大学理学部卒業。京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士課程修了。2009年JAXA入職。宇宙利用ミッション本部、宇宙科学プログラムオフィス、ERGプロジェクトチーム、第二宇宙技術部門などを経て、2023年から現職。



GEOTAILの運用を1週間ずつ2回ほど担当しました。衛星にコマンドを送ったりテレメトリを確認したりするときには、専門の担当者が内容を1つ1つ読み上げながら操作していきます。当時は呪文を聞いているようで、意味はさっぱり分かりませんでした。それでも管制室に入って衛星運用の現場を体験したことが、宇宙科学プロジェクトに携わりたい、そのためにJAXAに入りたい、と思う大きなきっかけになりました。

吹奏楽団へ飛び込んで

——子どものころは、どんなことに興味がありましたか？

宇宙が好きでした。きっかけは、小学1年生のときに買った星の本です。そこに「星にも一生がある」と書かれていたのです。星も生まれて死んでいくということが、とても心に響き、星の研究をしたいと思うようになりました。その思いはずっと変わらず、大学は宇宙や天文を学べるところを選びました。

ところが大学に入ると、吹奏楽団の活動に夢中になり、勉強はおろそかに(笑)。高校時代、電車通学の乗換駅で、何度かサククスアンサンブルの路上ライブに出会いました。その演奏に感動し、「大学に入ったら絶対サククスをやる」と決めていたのです。

——吹奏楽の魅力は、どのようなところにありますか？

サククスを一人で吹くのも楽しいですが、サククス同士やほかの楽器、吹奏楽団全体など、人と合わせて演奏するのが好きです。それぞれが出している音はまったく違いますが、合わさることで1つの曲ができあがっていきます。それがとても楽しいのです。

——宇宙科学プロジェクトにも通じるところがありますね。

はい。宇宙科学プロジェクトも、それぞれが担う役割ややっていることは違いますが、みんなで取り組むことで1つのプロジェクトが形になっていきます。そのときに大事なのが、コミュニケーションだと思うのです。たくさんの人とつながりをつくり、顔を見てたくさん話すことを心がけています。

——面白いと思うことには、ためらわず飛び込んでいかれますね。

自分では活発な性格だとは思わないのですが、確かに、やりたいと思ったら行動に移すことが多かったですね。振り返ると、「あらせ」のとき、衛星の開発について何も知らない状態で、よく飛び込んだなと思います。がむしゃらに、全力で取り組んでいました。多少は経験を積み、年も重ねた今は、視野を広く持ち、落ち着いて取り組めるようになったのではないかと思います。でも、昔のがむしゃらさも少し取り戻したいですね。これからも、面白いと思うことには臆せず挑戦していきたいです。

編集後記

研究会参加のためインドに出張し、現地の学生や若手研究者の熱意に触れてきました。今月号のISASニュースも、行き先は月や火星衛星から小惑星や果ては彗星まで、乗り物も気球にロケット、探査機に有人ミッションまで、たくさんの熱意溢れる記事をお楽しみいただけたら幸いです。(鳥海 森)



ISASニュース No.540 2026年3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/JAXA 宇宙科学研究所長 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/>