JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2025 11

No.536

2025年度 特別公開開催！

10月11日（土）、JAXA相模原キャンパスで、普段非公開の施設もご覧いただける「2025年度 特別公開」が開催されました。特別公開は、毎年、職員と皆さまの交流の場としても親しまれています。
当日はあいにくの雨模様・・・
それでも、6,798人の方々においでいただき、年1回のイベントは大盛況でした。
事前に予約が叶わなかった方々のために、14時以降は予約なしでもお入りいただける初めての試みをしたことも、功を奏したのかもしれません。

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

大気突入カプセルの姿勢不安定に挑む RERAの研究と教育的意義

北海道大学大学院 工学研究院 准教授　高橋 裕介（たかはし ゆうすけ）

「実ミッションで失敗になる現象の再現が、この実験における成功なんですね」、実験機放球前にいただいたこの言葉は、RERAプロジェクトの本質を端的に表していました。アイヌの言葉で「風」を表すRERA（レラ）は、Rubber balloon Experiment for Reentry capsule with Aeroshell（ゴム気球を用いた大気突入カプセルの自由飛行実験）のアクロニムです。JAXA気球実験機会を利用して、新しい大気突入技術である深宇宙サンプルリターンカプセルの姿勢不安定挙動を実際に近い環境で再現し、不安定のメカニズム解明、さらにはその低減化を目指します。実ミッションの大気突入においてカプセルが姿勢不安定に陥ることは、減速性能の逸脱や機体破損、パラシュート開傘不良などの深刻な状況を招きかねないため、避ける必要があります。これを実験時にあえて再現することで、姿勢不安定とは何か？に対する答えを探求します。

姿勢不安定現象とその危険性

近年はロケットを用いた宇宙輸送手段の確立が大いに進んでいます。一方でもうひとつの宇宙輸送、宇宙から地上に帰ってくる大気突入過程では、大気突入カプセルが主役です。たとえば「はやぶさサンプルリターンカプセル」はその代表例でしょう。宇宙機が安全に地上に帰還するためには、地球低軌道であれば7.8km/sの軌道速度を、何らかの方法で減じなければなりません。しかし、多くの大気突入カプセルは、自動車の車輪ブレーキのような減速手段をもちません。代わりに惑星大気の空気抵抗を用いた空力減速が主要な手段となります。そして空力減速を適切に行い、地表に無事にたどり着くのには、カプセルの姿勢安定性の確保がとても重要になります。

このような地に足がついていないカプセルにとって、姿勢安定の鍵は空気力です。しかし、これは案外むずかしいのです。図1に深宇宙サンプルリターンカプセルに働く空気力と機体運動の様子を示しています。姿勢安定には静的・動的の2種類あり、静的姿勢安定は重心位置調整によって比較的容易に確保できる一方、動的姿勢は機体姿勢運動と機体背後に回り込んだ気流が背面に衝突する時間差（位相遅れ）によって不安定化することがあり、残念ながらまだ十分な現象解明や低減に至っていません。

大気突入においてカプセル近傍の流れ場は、極超音速から亜音速、層流から乱流、希薄気体から連続流と、大きく変わっていきます。このような多様な速度域のすべてにおいて、予期した姿勢を空気力によって確保する必要があります。たびたび問題になるのは遷音速から亜音速にかけてです。カプセル近傍の流れ場からエネルギーを受けとるかたちで、カプ

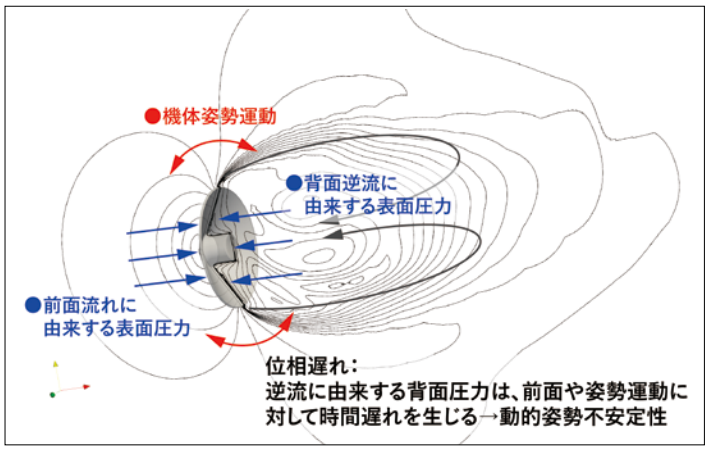


図1：深宇宙サンプルリターンカプセルにおける動的な姿勢不安定の概略図

図2：RERA-1実験概要

セル姿勢運動が成長し続けることがあります。これを適切に制御できなかった場合、飛行中に姿勢発散し、回転し続けるような事態に陥ることがあります。実際に米国Genesisカプセルでも深刻な姿勢不安定が生じました。このような課題に対し、大気突入ミッションを行う前に、実際に近い環境を再現して、姿勢安定の設計解を見出す入念な準備が肝要です。

不安定を理解するために不安定を再現する

姿勢安定や空力特性の研究では、従来から風洞実験と数値解析が主なアプローチとして利用されてきました。しかし、これらの方法だけでは、実際の飛行環境を完全に再現することは困難です。風洞実験は、模型を固定したり、特定の運動しか再現できなかったりするため、実際の飛行で起こりうるすべての現象を捉えることができません。また、風洞模型を支える支持部が、風洞気流に影響を与えてしまうこともあります。コンピューターを使った数値解析も現在は強力なツールですが、正確にシミュレーションするには、膨大な計算資源と緻密なモデリングが必須です。それはカプセル近傍の高速な非定常流れと、比較的ゆっくりした機体運動が共存することに由来します。また、解析モデルが正しいかどうかを検証するためにも実測データが不可欠です。

そこで重要になるのが、「実際の飛行環境を再現した実験を行う」ことです。これによって、風洞実験や数値解析では見過ごされがちな現象を直接観測し、データの信頼性を高めることができます。しかし、本物のカプセルを飛ばすことは、コストや準備期間の面で非常にハードルが高いのが現状でした。

小型成層圏気球投下による自由飛行環境

RERAプロジェクトはこのような背景に基づくものです。RERAでは、先に紹介した深宇宙サンプルリターンカプセルを対象とし、小型成層圏気球を用いることで実験のコンパクト化、すなわち低コスト性、迅速性、即応性を実現しました。この低コスト性は、バッテリーや電子回路、計測系などの実験機共通部をモジュール化し、開発要素を最小限に抑えたことにも起因します。さらに、実験場の北海道大樹町に入ってから一週間程度で放球、データ取得、撤収を行うといった迅速性にも繋がりました。これは小規模で目的を絞ったことにより実施機会の頻度が上がった帰結でもあります。一方で、軽量であることから自由飛行時の速度域は亜音速（低速領域）に限られます。ただ、パラシュートを使用しない今回のような大気突入機において、低速はむしろ未開拓の領域でした。

RERAは、JAXA気球実験機会を利用して2022年度から始め、現在まで学生が主体的に進めています。この実験概要を図2に示しています。北海道の大樹航空宇宙実験場にて早朝に放球を行います。実験は高層風に加えて、天候にも左右されます。大樹町の朝は、晴天の日もあれば、雲の散乱によって淡い光に包まれる日もあります。RERA-1では薄明の青い背景のもと放球されました。放球自体は静かに終わります。そのあと実験機は成層圏に向け上昇し、我々は地上でダウンリンクデータを確認しながら待機します。高度25kmにてカプセルを切り離し、自由飛行を開始します。加速度、温度や姿勢、画像データなどを見ながら、実験機がどのような状況か把握していきます。基本的に見ている以上のことはできず、この孤立系が宇宙ミッションらしさを感じさせるものです。

カプセル姿勢不安定化への軌跡

RERAでは、2022年から2025年までに、6機（RERA-1、RERA-2、RERA-3、RERA-4、RERA-5、RERA-MAW-1）の放球を実施しました。この中で、研究目的である姿勢不安定を再現する、という点で、RERA-1からRERA-4までは期待を外してしまったと言えるでしょう。RERA-1では、風洞実験において、静的には安定だが動的には不安定、と予測した質量特性の実験機を用意しました。ところが、実際に自由飛行実験を行うと、実験機は安定して飛行してしまったのです。すなわち姿勢運動を復元する効果が強く現れたことを示しています。この結果は、風洞実験が実際の飛行環境を完全には再現できていないことを示唆しており、改めて自由飛行実験の重要性を痛感しました。

翌年以降のRERA-2、RERA-3、RERA-4では、姿勢不安定化を起こしやすい質量特性の調整を重ねました。しかし、それでも実験機は安定したままです。これではミッションの目的である姿勢不安定化を再現することができません。「静的に安定な範囲では、動的にも安定なのだろうか？」と筆者は内々に不安を抱えながらRERA-5実験提案書を書いたのを覚えています。並行して、JAXA落下棟で短時間飛行試験を行うなど、様々な知見を統合しました。

RERA-5は、実際のカプセルと比べて背面の円筒部が長く、まるで椎茸のような形をしています。これでダメなら後がない、という思いを抱えつつ実験に臨んだところ、自由飛行中に姿勢振動が成長し、ついには実験機がひっくり返る様子が観測されました。図3がRERA-5の姿勢運動を表す履歴です。

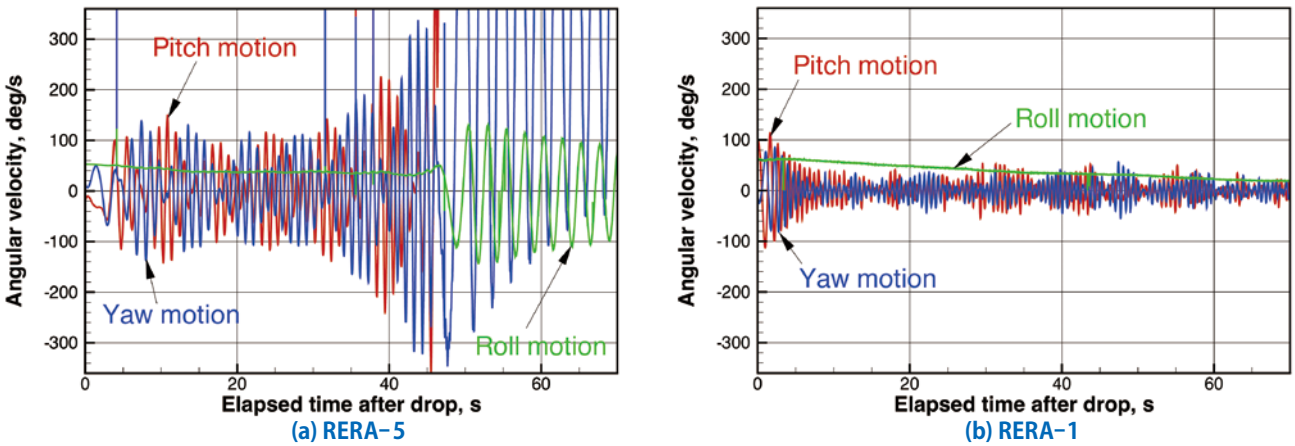


図3：自由飛行中におけるRERA-5とRERA-1の角速度履歴の比較（preliminary data）。なお、RERA-5のような姿勢挙動でも軌道予測内を飛行した。

比較としてRERA-1結果[1]も載せています。RERA-5において機体角速度が増加し、ついに発散する様子が確認できます。実際の大気突入としては失敗となる挙動ですが、研究目的としては成功として再現することができました。もちろんRERA-4までの飛行データが無駄になるわけではありません。姿勢安定・不安定データいずれも分析することによって、姿勢挙動の理解の深化に繋がります。さらに、カプセルとして姿勢安定は必須であり、それを確保するための信頼できる設計パラメータを得られたことになります。

学生のための実飛行実験教育プログラム

RERAは、研究成果だけでなく、若手研究者の育成という面で教育的効果の創出も意図しています。図4に示すように、この実験の中心メンバーは学生や若手研究者で、飛翔機会を多く獲得することによってメンバーが短期間で飛翔試験を経験できます。実験終了後の研究室学生の様子を見るとたしかに一定の良い影響がもたらされているようで、頼もしく感じることもあります。

翻って、筆者の大学院生時代を思い出すと、シミュレーションのためのプログラミングに没頭しており、それはとても楽しい時期でありましたが、実際の飛行実験やハードウェア開発にはあまり関わってきませんでした。だからこそ、いまの学生には実際に飛ぶものを体験し、何かしら作り出してほしいとも考えています。現在は徒弟制度のような研究室はほぼなくなっていますが、青は藍より出でて・・が示すように、学生が教員を越えていくことは大きな喜びであり、この取り組みを継続する糧にもなります。

図4：大樹航空宇宙実験場にてRERA-1実験チーム

現行の多くの大学のカリキュラムでは、実際のフライト実験を経験する機会はなかなか得られないのではないでしょうか。しかし、宇宙工学の分野で活躍するためには、座学や解析、シミュレーションだけでは不十分です。複雑なシステム全体を見通し、現場で発生する様々な問題に対応できるシステム工学人材の養成が不可欠です。

RERAでは、複数の大学や研究機関から学生が集まり、計画立案、実験機組み立て、飛行実験、データ解析のすべてを数か月で体験できます。こうした経験は、将来の宇宙開発を担う人材にとって大きな財産となると信じています。これは、研究を進めるプラットフォームであると同時に、若手研究者が実機開発の醍醐味と難しさを肌で感じ、成長するための教育プログラムでもあります。

次のステップ：剛体構造と柔軟構造の共通項・相違項とは？

大気突入カプセルの姿勢不安定は、いまなお主要な課題として研究が続けられています。今回は我々の研究グループが取り組んでいる、ゴム気球投下による自由飛行実験について紹介しました。今回の新しい形状のカプセルについては姿勢不安定も再現できたので、ゴム気球実験として一区切りしたと感じています。一方、このカプセルは空気力による形状変形が生じない剛体でしたが、形状変形してしまう柔軟構造大気突入機でも姿勢不安定は大きな課題です。いま我々は、姿勢挙動において剛体と柔軟構造カプセルの共通点・相違点とはなにか？について気球実験を遂行しています。2025年7月に柔軟機を対象としたRERA-MAW-1の放球も実施しました。やはり安定飛行しましたが、また継続して姿勢不安定やその低減方針を探求していきます。

謝辞

RERA実施にあたり、JAXA大気球実験グループメンバーの皆様に、計画から実験機開発、フライト実験に至るまで、多大なご協力やご支援を継続していただきました。深く感謝申し上げます。

文献

[1] Takasawa, et al., "Balloon Flight Demonstration for Deep Space Sample Return Capsule with Thin Aeroshell", Journal of Spacecraft and Rockets, 2025. https://doi.org/10.2514/1.A35787

XRISM International Conference 2025を開催！

去る10月20日から24日にかけて、XRISM International Conference 2025（第1回XRISM国際会議）を、京都駅近くの会議施設『京都テルサ』にて開催しました。これまで半年に一度のペースで開いてきたXRISMコラボレーション会議とは異なり、コミュニティに広く開かれた初めての国際会議です。会議には、世界17ヶ国から約330名の参加登録をいただき、うち約300名の方に現地参加をいただきました。筆者の山口は本会議の科学組織委員会（SOC）の代表を、榎戸は現地組織委員会（LOC）の代表を、それぞれ務めました。

会議開催の目的は、XRISMによる過去2年間の科学観測成果を総括した上で、未解決の課題を抽出し、今後の科学戦略を構築するための議論を行うことです。これを達成するため、19名の招待講演者による基調講演を軸に、XRISMの関連トピックを幅広く、かつトピック間の横の繋がりが活きるように、口頭講演とポスター講演のプログラムをアレンジしました。初日はX線連星や白色矮星の講演でXRISMによる精密分光の圧倒的な威力を皆で再確認し、2日目以降は宇宙の化学進化や銀河団の力学的進化、銀河と超巨大ブラックホールの共進化にまつわる講演を堪能しました。一言で言えば、会議は大成功・大盛況でした。開催目的は十分に達成され、今後の宇宙科学におけるXRISMの位置づけが明確になりました。ニュートリノ天文学など、X線天文学以外の分野からの期待が大きいことも確認できました。また、大学院生や若手研究者による口頭講演が多く、ポスター講演数も234件にのぼり、活気に満ち溢れていたことも印象的でした。唯一の心残りは、10月初めから続く米国政府閉鎖のため、NASAの研究者が来日できなかったことです。彼らは、XRISMの主力観測装置であるResolve（リゾルブ）の中心的開発メンバーです。今回の「お祭り」を、彼らとともに祝いたかった…。

ところで、今回の開催地である『京都テルサ』は、2006年にXRISMの先輩にあたるX線天文衛星「すざく」の第1回国際会議が開かれた場所でもあります。当時筆者らは大学院生で、まさか19年後に自分たちが次のミッションの第1回国際会議を主催することになろうとは、思いもしませんでした。当時は「すざく」の最新データがあったおかげで、未熟ながらもそれなりの科学成果を残し、XRISMに繋ぐことができたのかなと思います。そして今まさに、XRISMの素晴らしいデータが目の前にある状況です。今回の会議で活躍してくれた若手の皆さんには、是非XRISMを使い倒し、成果を挙げ、さらに次の世代へとバトンを繋いでもらいたい。そんな思いを強く感じた国際会議でした。

最後に、本国際会議は、宇宙科学研究所の他に、欧州宇宙機関、日本学術振興会、京都大学、東京大学 次世代ニュートリノ科学・マルチメッセンジャー天文学連携研究機構、東京都立大学、愛媛大学、宇宙科学振興会からの助成を受けました。ここに厚く感謝いたします。

（宇宙物理学研究系・XRISMプロジェクト／山口 弘悦
京都大学大学院理学研究科／榎戸 輝揚）

能代ロケット実験場南地区 本格始動！

10月に実施された大規模液化水素漏洩拡散試験の様子。液化水素の大量漏洩時における拡散挙動の取得に成功。ドローン映像は試験後に撮影。

能代ロケット実験場では、2023年度よりNEDO公募事業「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」の一環として、南地区の開発を進めてきました。2023年10月の事業採択を皮切りに、保安林解除や土地賃貸借などの行政手続き、並行して設計検討を進めながら、2024年12月に現地土木工事を開始。2024年4月には液化水素貯槽の設置が完了し、建築・機械・電気通信設備などの工事が急ピッチで進行しました。8月には高圧ガス設備工事が完了し、9月には全建屋が完成、試運転なども経て、10月には初回の大規模液化水素漏洩拡散試験に着手することができました。

南地区は北地区（既存の実験場）から南へ約2.5kmの地点に位置し、50m×150mのコンパクトな敷地ながら、保安距離1km以上を確保しています。NEDO事業では液化水素に係るシビアアクシデントを模擬する必要があり、ハイリスクな試験をいかに安全に実施するかが重要です。南北間は専用通信ラインで接続されており、場外に配置する最小限の保安･監視要員を除き、完全無人での試験が可能です。この環境により、「シビアアクシデントを模擬するような挑戦的な試験」も可能となり、革新的な技術開発に適した場となっています。NEDO事業終了後もJAXAにて継続利用が可能であり、宇宙航空分野の高リスクな試験にも対応できる設備です。

2025年末までかけて、高圧ガス保安協会、横浜国大と連携し、液化水素の保安基準策定に向けた試験を実施します。大量の液化水素を漏洩させた際の濃度分布の計測や、意図的な着火による爆風圧・輻射熱のデータ取得を計画しています。2026年度には東京大学と連携し、液化水素タンクの加圧・破裂試験や防液堤に関する試験を行う予定です。一連のNEDO公募事業に関わる試験は、液化水素を日常的に取り扱う我々にとっても、保安基準の見直しに資する貴重なデータを取得する機会となります。

今後は水素事業に加え、ISASが推進するATRIUMエンジン開発などにも南地区を活用し、「水素×ロケット」の両輪で能代の発展に貢献していきたいと考えています。この新規エリアの開拓は、秋田県、能代市、三種町をはじめとする行政機関、地元自治体と住民の皆様のご理解とご支援、施設部の皆様の多大なるご尽力、そして短い工期の中でやり遂げてくださった関連会社の皆様の協力があってこそ実現しました。また、日々現場を支えてくれている実験場メンバーにも、心より感謝申し上げます。

（坂本 勇樹）

「LiteBIRDのリフォーメーション(“改革”)」その後

LiteBIRD(ライトバード)は、宇宙の始まり(インフレーション)の瞬間を探るという挑戦的なミッションで、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の全天精密偏光観測を行います。参画機関の撤退という問題を契機に、LiteBIRD国際チームはこの1年、計画の実現性を高めるべくあらゆる角度から見直しに取り組んできました(ISASニュース2025年2月号*参照)。その進捗確認(KDP-2)が2025年9月に宇宙科学研究所で行われ、次のステップに向けて検討を継続することが認められました。本記事ではLiteBIRDの現状について報告します。

まず、科学目的から観測装置の性能要求に至るまでの過程を一から見直しました。その際、インフレーション理論の検証という科学目的は維持しつつ、性能として譲れるところはぎりぎりまで譲って実現性を高めることを目指しています。3台あった望遠鏡を1台に集約し、極低温検出器も1台にした上で構成や採用する技術を見直しています。これにより極低温冷却装置もシンプルになりました。最大の懸案であった極低温検出器の調達に関しては、欧州検出器チームが欧州宇宙機関(ESA)の支援の下で開発を担当することになりました。この体制は宇宙科学研究所と関係宇宙機関の密接な連携により実現したもので、NASAを含む米国の宇宙科学の状況が見通せないなか、日欧の強力なパートナーシップが重要な役割を果たすことを示す1つの好例といえます。

技術面、体制面に加え、LiteBIRDの科学的意義と価値をさらに高めることにも力を注いできました。地上の大型CMB観測計画と連携して最大限の相乗効果が得られるように目指しています。また、LiteBIRDで作成するミリ波・サブミリ波の全天偏光地図は、インフレーション理論の検証以外にも様々な宇宙論、宇宙物理、また銀河系内や太陽系内のミリ波放射など広い科学的価値が期待できることから、これらを積極的にアピールし、広く天文・宇宙物理学研究者から賛同が得られるように活動しています。

2025年9月に宇宙科学研究所にて行われた進捗確認会後のLiteBIRDチーム。

1年前、LiteBIRDは存続に関わる危機的な状況であり、東京大学カブリ数物連携宇宙機構、岡山大学を中心とする日本の研究者、欧州・北米の研究者からなる国際LiteBIRDチームが力を合わせて見直しに取り組んできました。その結果、チームは新たな一歩を踏み出すことができました。ただし、計画見直しはまだその途上であり、今後さらなる検討を進めていく必要があります。チームの勢いを維持しつつ、来年夏に予定しているミッション定義審査に向けて、引き続き一丸となって取り組んでいきます。

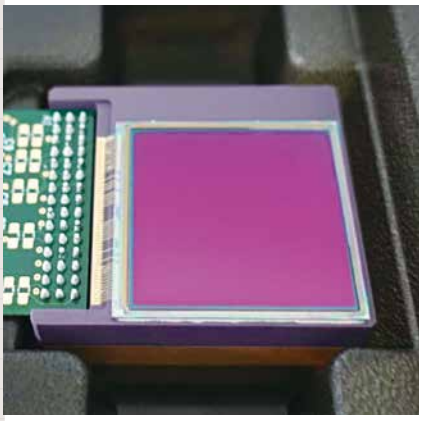
(LiteBIRDプリプロジェクト候補チーム長／藤本 龍一)

＊ https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews527.pdf

国産赤外線撮像センサで切り拓く　次世代の宇宙観測

赤外線で宇宙を観測すると、星や惑星の誕生の現場、銀河系の中心、遠方銀河など、可視光では捉えられない世界が見えてきます。赤外線は地球大気に吸収されてしまう波長もありますし、吸収されない波長でも大気揺らぎを避けるため、宇宙に打ち上げられた赤外線望遠鏡が活躍します。そこで必要になるのが、赤外線を受ける撮像センサです。

現在、宇宙科学用の高性能な赤外線撮像センサは、世界的にも海外メーカー1社へ大きく依存する状況であり、入手や利用を限定せざるを得ないといった懸念もあります。そこで、宇宙科学研究所では、国立天文台との協力の下で、国立天文台が地上からの天文観測用として国内メーカーと開発を進めてきた「InGaAs(インジウム・ガリウム・ヒ素)」を使ったハイブリッド型撮像センサを、宇宙でも使えるよう改良する開発に、2021年度から取り組んできました。


2024年度に試作した400万画素級のInGaAs赤外線撮像センサ。衛星搭載を想定した構造となっている。

このInGaAsは赤外線に高い感度を持つ化合物半導体素材であり、海外メーカーが用いている水銀やカドミウムといった有害物質を含まない利点もあります。今回、このInGaAs撮像センサを宇宙空間での使用に耐えるよう、放射線によって発光する基板(InP)を取り除きつつ、感度保持のため表面に反射防止コートを施しました。また、耐放射線性を高めた読み出し回路も新たに設計しました。

その結果、約2,000×2,000画素(400万画素級)の大フォーマットセンサを試作し、赤外線波長域(波長1.0～1.5μm)における量子効率も約70%と十分に高い感度を達成できました。不良画素率も3%以下と高い品質で、天文観測に十分な性能を持つことを確認しています。また、宇宙空間で晒される放射線や、ロケットでの打上げ時の振動にも耐えることを各種試験で検証しています。

この開発は、宇宙科学研究所の「技術のフロントローディング」活動の一環として進めてきたものです。これにより、天文観測用として世界最大級の画素数を持つ低ノイズInGaAs赤外線撮像センサの宇宙用化を実現しました。現在は、検討中の赤外線位置天文観測衛星JASMINEへの搭載に向けて、さらなるカスタマイズを進めています。天文学だけでなく惑星探査や地球観測など、幅広い分野に新しい可能性を拓く技術であると確信しています。

(国立天文台JASMINEプロジェクト 教授
宇宙物理学研究系 特任教授／鹿野 良平)

連載 第7回

世界初の火星衛星サンプルリターン計画

MMXはフォボスを目指す!

MMXの航法誘導制御系ISC(GNC)の挑戦:フォボスへの自律降下技術

火星衛星探査計画MMXは、2026年度の打上げと2031年度の地球帰還を目指し、現在、プロトフライトモデル(PFM)の製造とシステム総合試験が進められています。このミッションの最大の技術的挑戦の1つは、火星衛星フォボスからのサンプルリターンを実現するために、微小重力環境にある小天体への自律的な降下・着陸運用を成功させることです。

地球からの電波伝搬遅延が4～20分と非常に大きいため、フォボス近傍での運用、特に降下・着陸・離陸の一連のシーケンスは、探査機自身の統合化探査機制御サブシステムの1つの機能である、航法誘導制御機能ISC(GNC)によって自律的に実行されます。ISC(GNC)は、探査機の姿勢・軌道制御、および着陸を含む航法誘導機能の中核を担っています。

ISC(GNC)を構成する主要な機器には、システム全体を管理する統合化計算機(SMU)、データ処理や画像処理を担うミッションデータ処理装置(MDP)などの演算処理系に加え、姿勢決定用の恒星センサ(STT)、慣性センサ(IMU)、粗太陽センサ(CSS)、そして降下運用に不可欠なレーザ高度計(ALT)、広角航法カメラ(CAM-W)、狭角航法カメラ(CAM-T)などが含まれます(右上図参照)。

フォボス降下の難しさ:中間的な天体の特性と運用

フォボスは、地球の月と小惑星リュウグウの「中間的」な特性を持っています。重力は地球の月と比べると約1/300と小さいものの、リュウグウよりも50倍ほど大きいため、近接ホバリングによる時間をかけた降下は消費推薬量の問題で現実的ではありません。

MMXは、フォボス公転座標から見てフォボスを周回する力学的準安定軌道である擬周回軌道(QSO)をメインの観測軌道とし、上空(対地最小17km)から着陸前の地表面情報を得る設計です。

着陸運用は、QSOから接近降下フェーズ(ADP)を経て、着陸目標点上空での垂直降下フェーズ(VDP)へと移行します。ADP中の弾道飛行で蓄積した軌道誤差を、VDPでフルオンボードの航法誘導制御によって徐々に修正し、誘導精度とΔV(速度増分)の節約を両立させることが目標です。

SLIMの技術を継承した自律画像航法

VDPにおいて、探査機の位置・速度をリアルタイムに推定する航法システムが中核となります。これは、IMUやALTの計測値に加え、CAM-Wが取得した画像を処理した結果を拡張カルマンフィルタ(EKF)に取り込むことで実現されます。MMXでは、この画像航法アルゴリズムにおいて、小型月着陸実証機SLIMで開発された技術と知見を最大限に活用しています。

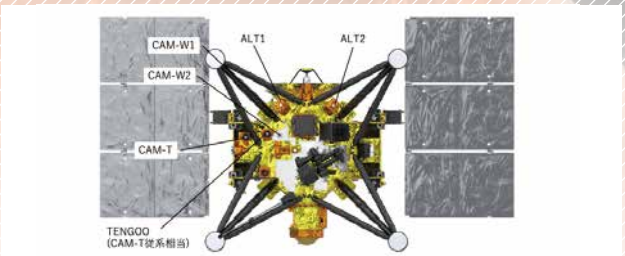


図:探査機ミッションパネル面に配置された降下着陸のための主要機器

VDP中の画像航法は、高度に応じて2段階で切り替わるのが特徴です。

1. CB(クレータベース)地形照合航法(高度2km～300m):CAM-W画像からクレータを抽出し、QSO周回中にCAM-Tで事前に作成したクレータマップとパターンマッチングを行います。フォボスの曲率影響を抑えるため、地表面法線方向を指向する姿勢を保つことが航法誤差を減らすうえで重要とされています。
2. 目標照合航法(高度300m～10m):着陸目標地点近傍のテクスチャ情報(テンプレート画像)とのマッチングを行い、ピンポイント着陸誘導を実現します。

さらに、高度300mおよび100mでは、CAM-W画像を用いて障害物検知機能が実施されます。これは画像輝度分散と地形起伏の相関性に着目し、30cm以上の段差を危険領域と識別するもので、もし障害物を確認した場合は、目標点を変更するかアボート(着陸中止・再上昇)を実施し、探査機の安全を確保します。

最終的に、土壌汚染防止のため、高度約10mでスラスタ噴射を停止し、探査機は自由落下で接地します。ISC(GNC)の誘導目標は、探査機重心を目標地点を中心とした水平10m四方以内に収めることです。

GCLT(Graphical Closed Loop Test):画像航法を含めたISC(GNC)の最終検証手段

ISC(GNC)の詳細設計と搭載ソフトウェア(S/W)の検証を確実にするため、GCLT(Graphical Closed Loop Test)と呼ばれる閉ループシミュレーション環境を構築・実施しました。このGCLTでは、システム全体を管理する統合化計算機(SMU)とデータ処理装置(MDP)にGNCの搭載S/Wが実装され、電気的に接続されます。この環境下で、DTS(Dynamics Test Software)が出力する探査機の位置・姿勢情報に基づき、画像シミュレータがフォボスのCGモデルを用いて模擬画像(CAM-W画像)を生成します。この模擬画像はMDPの画像処理S/Wでリアルタイムに処理され、拡張カルマンフィルタ(EKF)を通した航法値を用いてSMUの誘導制御S/Wで探査機を制御することで、接地時の位置精度要求を満足すること(例えば、あるケースでは10m四方以内の要求に対し十分な精度で接地)が確認されており、MMXの自律降下技術の成立性を裏付けています。

巳谷 真司(みたに しんじ)

【参考文献】渡邉 泰之(三菱電機)、「MMXの画像航法による降下着陸試験」、第69回宇宙科学技術連合講演会 4M11、2025

JAXA 名誉教授
明治大学特任教授
久保田 孝（くぼた たかし）

毎年、惑星探査に挑戦

開発した探査ロボット　©明治大学（加藤恵輔氏撮影）

以前はISASニュース編集委員として、原稿の催促やチェックをしていましたが、今度「いも焼酎」を執筆することになり大変光栄です。私は、昨年4月より、明治大学理工学部にて特任教授として、研究および教育に従事しています。JAXAを離れて、新しい世界で新しいプロジェクトに参加しているので紹介したいと思います。

明治大学にて推進しているプロジェクトは、「ロボットによる無人島探査」です。探査対象は、東京の南約1,000km、父島の西130kmに位置する小笠原諸島の西之島です。孤立性の高い海洋島で、活発な火山活動で生態系がリセットされたことにより、新たな生態系が観測できる特異な環境として、注目を浴びています。環境省は、人為的な影響を可能な限り与えないように配慮しつつ、西之島における生態系の変化や噴火の過程等、自然の遷移をモニタリングすることで、海洋島における原生状態の生態系の成り立ちを解明することを目的として、2019年より総合学術調査を実施しています。

西之島は、1973年に海底火山により新しい島が出現し、その後、何度かの噴火が起こり、特に2013年以降の大規模な噴火で、噴出物が堆積して新たな陸地ができ、従来の西之島と一体となりました。西之島は、海底比高4,000m、直径30kmの大火山体で、山頂部がわずかに海面上に露出して陸地を形成しています。2020年に、噴火による溶岩流や火山灰で旧島表面が完全消失し、動物や植物等の生態系が初期化されました。そのため、西之島は、原生状態の生態系がどのように遷移していくのかを確認できる世界に類のない科学的価値を有しています。

明治大学の自律型ロボット研究グループ（クラスター[*1]）は、西之島総合学術調査に協力し、無人探査機（ロボット）による環境調査プロジェクトを推進しています。プロジェクトの目的は、上陸が難しい西之島において、人間に代わって観察や採取を行う探査ロボットを実現し、生態系誕生の秘密の解明に貢献することです。

ロボット開発において留意する点は、西之島の地形が噴火等により常に変化しているため、地形や地質などの状況は行ってみないとわからないこと、探査ロボットは、調査船からドローンで運搬するため、重量5kg以下にすること。通信環境も現状は、1.5kmほど離れた調査船からのみであること、などです。小型軽量で低消費電力のロボットで、かつ未知環境を走破して環境調査を行う点は、月や火星探査を行うロボットと共通点が多いと考えます。また、宇宙プロジェクトと同様に、調査船の出航日も決まっており、限られたスケジュールや予算の中で開発しなければなりません。さらに、無人島も日中は炎天下での探査となるため、熱制御も重要となります。放射線環境は宇宙に比べて厳しくはないのですが、一方、雨や風、そして周りが海のため、塩害によるサビにも注意が必要です。無人島もロボットには過酷な環境といえるでしょう。

探査ロボットの初号機は、わずか3ヶ月で急ピッチに開発が行われ、2023年9月に西之島の調査に挑戦。調査船と約1km離れた島をドローンでロボットを往復運搬し、ロボット搭載のカメラ映像とドローンからの空撮映像を確認しながら遠隔操縦し、サンプリングアームを駆使して島の火山灰などの貴重な試料の回収に成功しました。2024年9月の調査では、生物系の専門家と協働して、新規機能を有するロボットを開発し、夜間探査を実施。また昆虫等を捕獲・回収するために製作した円盤型虫籠をロボットから射出し、多数の虫籠を配置しました。2025年7月には、ドローンや探査ロボット等を活用した遠隔調査とともに、今回は噴火警報発令範囲外の陸地において、2022年以来3年ぶりに上陸調査[*2]を行いました。さらに、長期モニタリングに向けて、調査期間終了後も一定期間情報を収集できるシステムの構築を行うため、西之島北部に試行的に無人探査機（ロボット）や衛星通信装置等を設置しました。このように、毎年ミッションがあり、経験と技術の蓄積のもと、さらに進化したロボットにより新たな探査が可能となることは、無人島探査の醍醐味といえるでしょう。

生態系の把握には、何十年という長期観測が必要となります。科学者が自由自在に調査できるロボットシステムの構築が次なる目標です。まずは、通信環境を整えて、長期間活動するための耐久性と発電・充電機能、そして自律探査機能を備えたロボットの開発を進めていきたいと考えています。

深宇宙探査で培われた経験を無人島探査に活かし、また無人島探査で獲得した技術を宇宙探査、さらにはさまざまな分野に活かすべく、地球という惑星の探査に毎年挑戦します。

＊1 環境省による西之島調査に明治大学自律型ロボット研究クラスターが協力（2025年1月31日）
https://meijinow.jp/meidainews/research/112176
＊2 令和7年度西之島総合学術調査の実施について（2025年7月14日）
https://www.env.go.jp/press/press_00199.html

宇宙・夢・人

Space Human Dream

宇宙研のすべての衛星・探査機と地上とをつなぐ

科学衛星運用・データ利用ユニット
研究開発員
西山 万里（にしやま まり）

神奈川県出身。東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士課程修了。2016年、JAXA入職。研究開発部門第二研究ユニット、航空技術部門次世代航空イノベーションハブ エミッションフリー航空機技術チームを経て2021年より現職。2024年よりSOLAR-Cプロジェクトチームを併任。

プロジェクトとC-SODAをつなぐ調整役

――科学衛星運用・データ利用ユニット（C-SODA）の所属ですね。

C-SODAは、宇宙を航行する衛星や探査機に指令を送り、観測データを下ろし、そのデータを利用するために必要な装置やシステムの開発・維持管理を行う部署です。私はプロジェクト窓口として、プロジェクトが何をやりたいかを聞き、それを実現するために必要な装置やシステムを提案するなど、プロジェクトとC-SODAをつなぐ調整役を担っています。アイデア段階のものから、検討中、開発中、運用中、そして運用が終了してデータ利用のみのものまで、宇宙研のすべての衛星と探査機が対象です。

――多種多様なプロジェクトをうまく調整するコツは？

プロジェクト側とC-SODA側では立場が違いますが、「プロジェクトを成功させたい」という思いは同じです。成功のためにC-SODAとして何ができるのか、何をすべきかを意識することで、調整がうまく進むと感じています。私は、前に立ってプロジェクトを引っ張るより、裏方として支える方が好きなので、プロジェクト窓口の仕事は自分に合っていると思います。

「だいち」の名付け親の一人です

――宇宙に興味を持ったきっかけや進路を教えてください。

家の近くにプラネタリウムがあり、小さいころからよく連れて行ってもらっていました。最初は、解説員さんが語る神話が好きでした。次第に星にも興味を持ち、やがて宇宙全般が好きになり、宇宙に関わる仕事をしたいと思うようになりました。

中学生のとき、JAXAの陸域観測技術衛星の愛称募集があり、私が応募した「だいち」が採用されたのです。名付け親の一人になれたことで、宇宙は遠い世界ではなく、自分の気持ちと努力次第で関わることができるのだと気づきました。そして、小さいころからものづくりが好きだったこともあり、エンジニアとして宇宙に関わる道を目指そうと、大学は工学部を選びました。

専攻を選ぶとき、まず航空宇宙工学を考えました。でも数学が苦手だったので、流体力学でつまずくことが目に見えています。悩んでいたとき「電気は宇宙で不可欠な技術で、宇宙に関わりたいなら、電気系は狙い目ですよ」と聞き、電気系工学専攻に進みました。

――2016年にJAXAに入り、最初の配属先はどちらでしたか？

研修後の本配属は、調布航空宇宙センターのエミッションフリー航空機技術チームでした。「えっ、調布？航空ですか？」と思わず聞き返してしまいました。大学院時代は宇宙研で月探査機の着陸地点を選定するアルゴリズム研究に取り組んでいて、航空分野とは無縁でした。

電動航空機の燃費性能を解析するプログラム開発を担当したのですが、小さいチームのため人手が足りず、機体の制御実験にも参加することに。しかし、私には学生実験の経験しかありません。さらに、プログラミングと実験とでは進め方が大きく異なります。プログラミングは、修正を前提にまず書いて動かしてみます。航空機の実験は風洞という特殊な設備で行われ、実験機会はとても貴重で、失敗しても簡単にはやり直せません。右も左も分からない状態からのスタートでしたが、実験を行ってデータを取得し、これを解析して制御シミュレータを作成しました。シミュレータを用いて得られたデータをもとに制御性能の向上を確認し、特許申請や論文発表までやり遂げることができました。

展示説明員。一番楽しかったアルバイト

――相模原キャンパス特別公開の実行委員をなさっています。

大学院時代、私の研究室も特別公開に出展していました。来場者と接するのが楽しく、特別公開が大好きだったので、宇宙研に異動した2021年から実行委員になりました。「宇宙は面白い」と多くの人に伝えたいのです。大学院生のとき、週末は宇宙研にあった展示スペースの説明員をしていました。大好きな宇宙の話を一日中していられて、話を聞いてくださった方々が見せる笑顔がうれしく、これが一番楽しいアルバイトでした。

――一般の人に話をするとき気をつけていることはありますか？

私は数学が苦手ですが、歴史は好きです。少なくとも私の場合、その違いにはエピソードがあるかないかに関係していると思っています。解の公式にはエピソードがありませんが、歴史には多くの登場人物がいて、さまざまなエピソードがあるため、記憶に残りやすいと感じるのです。そのため、事実を言うだけでなく、プロジェクトが始まった背景や、関わった人たちが何を考え、どんな問題が発生し、どのように解決していったかといったエピソードを交えて話すようにしています。

――趣味は？

読書です。読書家の父はSFやミステリーが好きで、私もその影響を受けています。そうした読書傾向が、宇宙好きに拍車をかけたのかもしれません。旅行も好きです。読書も同じですが、知らない世界やものに触れることが楽しいのです。宇宙には、まだ知らないことがたくさん残っています。だからこそ、私は宇宙に惹かれるのでしょう。

編集後記

先月の特別公開ご来場・ご視聴いただいた方ありがとうございました。相模原キャンパスには探査交流棟という見学場所もあります。手前味噌ですが、時事宇宙ネタに合わせてよく更新されていますので何度でもいらしてください。

今月のISASニュースも時事宇宙ネタたっぷりです。　（坂東 信尚）

JAXA Explore to Realize
ISASニュース　No.536　2025年11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/