JAXA宇宙科学研究所

ISAS News

ISSN 0285-2861

2022 9

No.498

高専／大学生も参画！観測ロケット打上げ成功！

発射点へと移動する観測ロケットS-520-32号機（下）とその打上げの瞬間（右）。S-520-32号機は、2022年8月11日に内之浦宇宙空間観測所から東南東に向けて打ち上げられました。当日の天候は晴れで、下の写真の中央上には満月に近い月が写っています。今回の打上げ実験で重要となる飛翔中のロケットの姿勢角は、この月の光の入射方向や赤外線カメラで取得した地球の中心方向などを組み合わせて算出します。（p4 参照）

The Forefront of Space Science

宇宙科学最前線

SLIMの月面ピンポイント着陸技術

SLIMプロジェクトチーム　石田 貴行（いしだ たかゆき）
伊藤 琢博（いとう たかひろ）

降りたい場所に降りる技術

21世紀に入り、日本の「かぐや」をはじめとして月に関する多くの高精度な科学データを得られるようになっています。こうした科学データは月面着陸探査にパラダイムシフトを起こしつつあります。すなわち、「降りられる場所に降りる」探査から「降りたい場所に降りる」探査へのシフトです。

これまでの着陸探査では地上の軌道決定結果などをもとに着陸点へ誘導していましたが、この方式ではkmオーダの着陸誤差が生じます。結果として「それくらいの誤差が生じても大丈夫な場所」として月の海などの比較的平坦で障害物の少ない場所に降りるのが一般的でした。しかし、これからの探査では険しい地形の場所にも安全に着陸できることが求められ、一桁高い精度が必要となってきました。SLIMプロジェクトではこれを実現するために長年ピンポイント着陸技術を開発してきました。その主なキー技術は、探査機の目である「画像照合航法」と、探査機の頭脳である「航法誘導制御」です。本稿ではSLIMが降りようとしている場所と、このピンポイント着陸技術について紹介します。

SLIMの目指す場所

月の東側、赤道の少し南側に「神酒（みき）の海」があります。そこを拡大するとひときわ白く明るく見える直径300mほどのクレータがあります（図1）。これがSLIMの目指す「SHIOLI*」クレータです。

SHIOLIは比較的新しく形成されたクレータであると考えられます。また、「かぐや」の観測データから、SHIOLIの放出物にはカンラン石が多く含まれていることがわかっています。SLIMは着陸後、近赤外マルチバンド分光カメラを利用して、カンラン石の組成推定を試みます。カンラン石中の鉄とマグネシウムの比率は、マントルを作り出したマグマの海の組成情報を反映していると考えられ、月形成時の材料やその後の進化を考える上で非常に重要なパラメータです。

一方で、科学者が観測したいクレータの放出物などの観測対象は、一般的に工学の観点では近寄りたくない「障害物」として認識されます。もし大きな石を踏んでしまったら安全

＊SLIMで実証を目指す高精度着陸技術は、月探査の新時代を切り開くことが期待されています。SLIMが、歴史のターニングポイントに挟まれる「栞（しおり）」となるよう願いを込めて、名付けました。

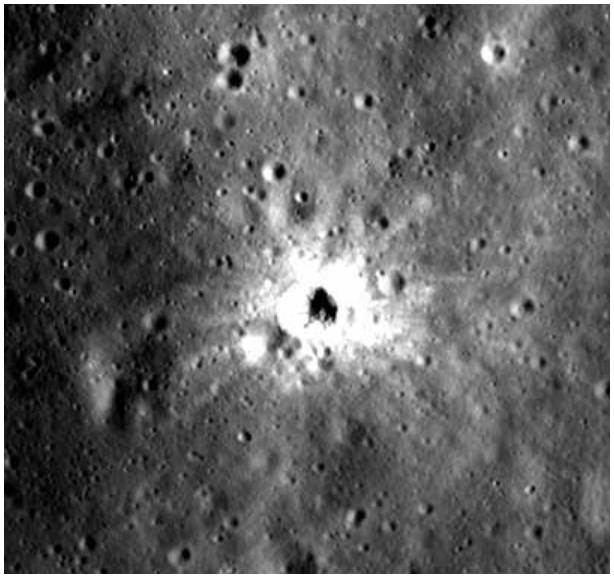


図1：SLIM着陸目標地点周辺のようす（3km四方）。中央付近の明るいクレータが「SHIOLI」。 ©SELENE/JAXA

に着陸できない可能性があるからです。着陸後に放出物が観測可能な視野範囲に十分あり、かつ着陸に適した安全な場所、というのは限られています。こうした場所へ正確に降りるには高度な着陸技術が必要になります。

どのように降りるか？ SLIMの着陸降下シーケンス

SLIMの着陸降下シーケンスを見てみましょう（図2）。SLIMは1,000km近い距離を飛行しながら約20分間減速を続け、精度100m以内で着陸します。日本上空で例えると、北海道の新千歳空港を秒速約1.7kmの速度（飛行機の数倍の速さ！）で出発し、兵庫県の阪神甲子園球場内（100m以内）にピンポイント着陸するイメージです。SLIMプロジェクトでは、減速を開始してから目標地点上空に探査機を誘導する段階を「動力降下フェーズ」、続いて月面までの距離や速度をより正確に把握しながら降下を継続し、軟着陸を行う段階を「垂直降下フェーズ」と呼んでいます。

SLIMのカギとなる技術をさらに掘り下げて見ていきましょう。

探査機のスマートな目、画像照合航法・障害物検知

もしあなたが地図を一枚だけ持って知らない町にいて、ある場所へ行きたいとしたら、きっと自分の周りにある建物などの目印が地図上のどこにあたるかを探すことで、自分がどこにいるか知ろうとするのではないでしょうか。これと同じことを月でやろうというのが、SLIMのキー技術のひとつである「画像照合航法」です。SLIMの場合、目印は月面上に無数に存在するクレータ、目は航法カメラ、そして地図から探すのは探査機自身です。

画像照合航法は主に①クレータデータベース、②クレータ抽出、③クレータマッチングという3つの要素で構成されます。

①クレータデータベースとは、地上で事前に用意するクレータ地図です。SLIMは着陸の際画像照合航法を行う領域ごとに専用のクレータ地図を搭載しています。図3のように、かぐやなどから得たデータをもとに、クレータを抽出してデータベース化します。

②クレータの抽出には過去の月面探査機で観測した数多くのクレータ画像から主成分分析を用いて抽出した主成分ベクトルをクレータのテンプレート画像として使い、テンプレートマッチングする手法[1]を用います。着陸降下中にも航法カメラで撮像した画像から同じ手法でクレータを抽出します。この画像処理手法は画像の明るさの変動といったノイズに強く、かつ低計算量で処理時間も短いため、探査機への搭載に適しています。

③抽出されたクレータはマッチング処理部[2][3]に入力され、搭載されたクレータデータベース内で一致するパターンを探索します。画像ではなくクレータの位置情報を用いて探索するため、精度を保ったまま少ない計算量で処理することが可能です。また、クレータの誤検出・未検出にも強い手法になっています。

垂直降下の終盤には同じ航法カメラを用いて障害物検知[4]を行います。SLIMが安全に着陸するには高さ15cm程度の大きさの石まで識別し、回避する必要がありますが、画像中の局所的な明るさの変化を特徴量とすることで、そうした石を短時間で識別することが可能です。危険と識別された障害物の分布から視野内で最も安全な着陸地点を自動で探索し、SLIMは月面へと降りていきます。

これらの画像処理技術は明治大学の鎌田 弘之教授、電気通信大学の髙玉 圭樹教授、東京都立大学の小島 広久教授とISASが長年かけて開発してきたものです。これらの技術がもうすぐSLIMミッションによって実用化されようとしています。

複数センサから現在の位置や速度を推定する「航法技術」

航法とは、自分の現在位置や速度などを正しく知る機能を指します。画像照合航法（カメラ）を通してSLIMは「ある瞬間の時刻」における位置情報を正確に知ることができます。SLIMのカメラ（基軸方向と側面方向に2台搭載）は機体に固定されています。画像照合を行うにはどちらかのカメラを月面に対して

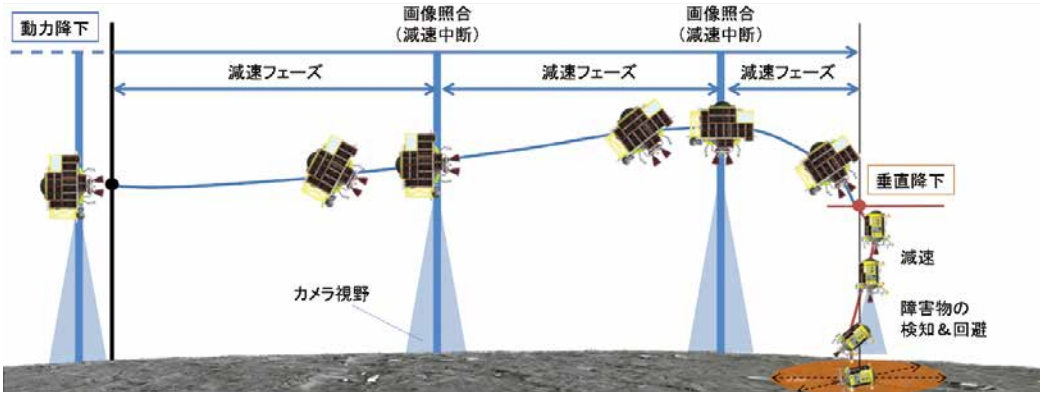


図2：SLIMの月着陸降下シーケンス。

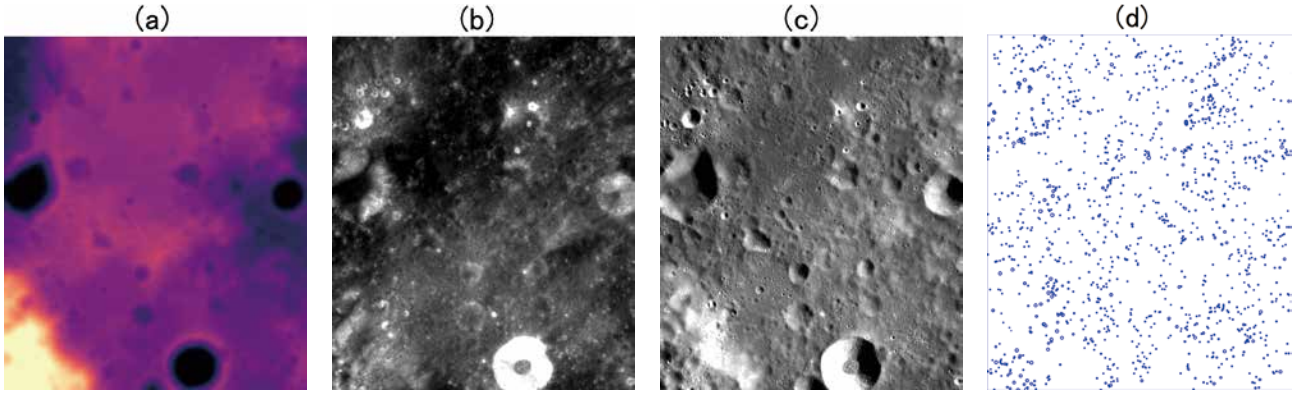


図3：クレータデータベースとその元となるデータの一例。左から（a）数値地形モデル、（b）反射率マップ、（c）a,bを使って作成した模擬月面画像、（d）cから抽出したクレータの中心位置を示したデータベース。 ©SELENE/JAXA

正対させて撮影する必要があります。ただ減速中は飛行制御に基づいて姿勢を決めるので、減速中はカメラが月面を向いているとは限りません。このため、減速を中断して機体を回転させて月面を撮影し、再度回転させて減速を再開する動作を何回か繰り返す予定です（図2）。ではカメラを使用できない期間は、どのように自身の位置や速度を把握するのでしょうか？ここで活躍するのが「複合航法」と呼ばれる、複数のセンサ情報を統合処理して位置速度などを推定する演算技術です。

SLIMには、画像照合航法を行うカメラに加えて、機体の加減速を計測する「加速度計」が搭載されています。従って、画像照合航法が推定した「（ある瞬間時刻の）正確な位置情報」を起点として、その後は加速度計の「加減速情報」を積分することで、探査機は常に高精度な位置速度を把握できます。また、月面との距離や速度を計測することが可能な「着陸レーダ」、近距離での距離計測が得意な「レーザ測距計」、探査機の姿勢を計測する「恒星センサ」や「ジャイロセンサ」など、多数のセンサが搭載されています。高精度月着陸では、降下中の場面に応じて、特徴が異なるセンサをいかに上手く使い分けて降下するのかがポイントです。

その場で軌道を作り、目標地点へと導く「誘導制御技術」

誘導制御とは、自身の現在位置や速度と目標地点に到達するための経路（軌道）を比較し、ずれがなくなるように修正する機能を指します。高精度月着陸を達成するためには、画像照合航法からわかる位置誤差を修正する能力に加えて、燃料が枯渇しないうちに素早く降りることも大切です。「精密に」かつ「素早く」到着したいという相反する要望は、車で例えると、全開アクセルor急ブレーキのみを用いた豪快な運転で、目標地点にピタリと駐車するイメージです。このような難易度の高い芸当が、SLIMの誘導制御には求められていました。

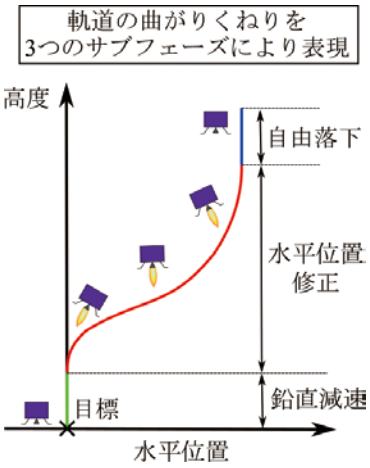


図4：SLIM垂直降下誘導則の概要。

この課題は、現在地点から目標地点に到達する最適経路をその場で計算し、計算した経路周辺で更なる微修正を行うことで、解決が図られています。再び車で例えると、カーナビの道案内機能が「誘導」、ドライバーのハンドルやアクセルの操作が「制御」に相当します。中でも道案内機能に相当する「誘導則」の性能がカギであり、日本の大学研究者とISASが一体で研究に取り組んできました。

動力降下、垂直降下フェーズそれぞれに対して誘導則を構築しています。動力降下では、横浜国立大学の上野 誠也教授・樋口 丈浩准教授が主導される研究室との長年に渡る共同研究を通じて築かれた「多項式誘導則」が搭載されています。多項式誘導則は、探査機が飛行する軌道を多項式（例：$\chi^2+2\chi+3$のように、数字と文字の足し算・掛け算からなる式）で表現し、この軌道解をリアルタイムで計算する方式です。アポロ計画で採用された月降下誘導則にも通ずる手法です。軌道が多項式で表現しやすい場合、つまり比較的長い距離を長い時間かけて飛行するフェーズに適した誘導則と言えます。一方、垂直降下フェーズでは、より短時間で大きな位置修正を行う必要があること、これに伴い目標地点に辿り着く軌道が必ずしも多項式で表現しきれない、曲がりくねりの大きい軌道になるなど、特有の配慮が必要でした。研究を重ねた末、「自由落下」「水平位置修正」「鉛直減速」の3つのサブフェーズの順に飛行するように区間を分割し（図4）、各区間で生成した軌道を結合する方式を考案することで、解決しました。

終わりに

SLIMは、挑戦的かつ科学的価値の高いSHIOLIクレータに確実に着陸するために、精度よく自分の位置を知る「スマートな目」と、目標地点への経路を自律的に導き出し飛行する「優れた頭脳」を併せ持った探査機です。世界でも例を見ない高精度月着陸の実現に向けて、チーム一丸となって奮闘しているところです。どうか応援のほど、宜しくお願い致します。

【参考文献】
[1] 岡田 怜史、中浜 優佳、森部 美沙子、他、主成分分析によるクレータ座標・サイズの検出とその評価、航空宇宙技術、Vol. 17, pp. 61-67, 2018
[2] 石井 晴之、村田 暁紀、上野 史、他、相似な三角形に基づくクレータマッチングによるSLIM 探査機の自己位置推定とその精度向上、航空宇宙技術、Vol. 17, pp. 69-78, 2018
[3] 狩谷 和季、石田 貴行、澤井 秀次郎、他、高精度月着陸のためのクレータで構成する線分情報を用いた位置推定手法とその評価、航空宇宙技術、Vol. 17, pp. 79–87, 2018
[4] 久我 共生、小島 広久、福田 盛介、小型月着陸機のための画像を用いた安全着陸領域識別に関する研究、日本航空宇宙学会論文集、Vol. 64, No. 6, pp. 303–309, 2016

観測ロケットS-520-32号機の打上げ

電離圏擾乱発生時の電子密度鉛直・水平構造の観測を目的としたS-520-32号機は、2022年8月11日の23:20（JST）にJAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました。

今号機には、大きく2つの特徴がありました。1つは、スマートフォンの位置情報アプリなどに用いられる全球測位衛星システム（GNSS）を利用した、電離圏での全電子数観測（ロケット上でのGNSS-TEC）の実践です。GNSSを構成する数十基の人工衛星の各々からは複数の周波数の電波が送信されており、その伝搬経路の上の電子の存在により、ロケットに取り付けられた専用のアンテナへの到来時刻がずれます。そのずれを測定することで伝搬経路上の全電子数の推定が可能になり、さらにロケット飛翔中の様々な位置において測定することで、地上観測だけでは得られない立体的な電離圏での電子密度構造を明らかすることが出来るのです。2つ目は、奈良工業高等専門学校、東北大学、富山県立大学、東海大学、京都大学に所属の学生さん達が自ら、それぞれ異なる5つの観測機器を設計・製造して行った実験であったということです。いずれもハード／ソフト両面における既存の宇宙インフラとのコラボとも呼べるもので、前者はGNSSとロケット上でのGNSS-TEC観測、後者はJAXA職員や関連会社さん（の知識や経験）と学生さん達との協働などがこれに該当します。

ISASの大学院生やJAXA若手職員も研修生として参加しました（写真は筆者が実機の部品を目の前に研修生からの質問に応じる様子）。

打上げの2ヶ月前には、観測機器のロケットへの組込みとその機械的・電気的チェックを相模原キャンパスで実施しました。その後、満を持して7月の打上げに臨んだつもりでしたが、その直前に技術的に確認すべき事象が検出されたため、改めて8月の打上げを目指しました。電離圏の擾乱現象は、打上げ直前にならないと観測条件を満たしているかどうかが判らないため、その現象が発生し易い23:00～24:00の間、いつでも打上げが可能な状態で待機しました。8月8日の打上げ初日は期待した現象が発生しませんでしたが、幸いにも11日の23時過ぎに絶好の観測機会を得ることが出来ました。相模原キャンパスでは少し緊張気味であった学生さん達も、いざ打上げ！の時には自信に満ちた面持ちとなり、ロケットの飛翔中に送られて来る観測データを冷静に確認していました。比較的小規模でありながら、大型のロケットと殆ど変わらない運用体制を必要とする観測ロケットにおいて、次世代を担う学生さんが1人でも多く携わり、その実務を一部でも体験することの重要性を垣間見た気がします。（増田 純一）

2022年度気球実験

5月中旬から9月初めまでを2022年度気球実験の期間として設定し、大樹航空宇宙実験場での実験実施に臨みました。近年、地球温暖化の影響なのか、昔の典型的な描像とは全く異なる高層風が吹いて実験を実施できない日が頻発し、悩みの種となっています。しかし、今年は様々な工夫を取り入れることで、以下に述べる2回の飛翔を計画通りに実施することができました。

6月6日に実施したB22-07実験は「新バラスト搭載法の飛翔試験」を主目的としつつ、ピギーバックとして「極限環境ウイルスDNAの成層圏曝露」、「高精度変位計測装置の実証」、「分散配置9軸姿勢ロガー群による飛翔中の気球各部の挙動測定」の3つの実験機器も搭載しました。実験方法の立案にあたっては、ポリエチレン製としては比較的小型（満膨張体積1万5千立方メートル）の気球を用い、飛翔高度・時間などの要件を緩和することで、飛翔機会を得やすくしました。また、小型軽量化された4つの実験を混載することで、限られた飛翔機会から創出される科学成果の最大化を図りました。

7月1日には「新型大気圏突入カプセルの飛行試験」を目的としたBS22-07実験を実施しました。前述のポリエチレン気球よりもさらに小型ながら飛翔機会を大幅に増やし得るゴム気球を用いることで、僅か4日間という実験チームメンバーの短い現地滞在期間中に準備から実験実施までを完遂することができました。

一方で、大型のポリエチレン気球（満膨張体積10万立方メートル）を用い「火星探査用飛行機の高高度飛行試験」を目的としたB22-06実験は、実施のための気象条件が厳しいこともあり、6月上旬には準備を整えたものの実験期間中に飛翔機会を得られず、今年度の実施を見送ることになりました。

朝焼けのなか放球された大気球B22-07号機。

大樹実験場での大型ポリエチレン気球の飛翔機会をいかにして増やしていくか検討を進めているところですが、実験をできるだけコンパクト化し飛翔機会を最大化できるよう実験を立案することも重要であると再認識させられました。

なお、気球実験は、最先端の宇宙科学研究の場であるとともに、若手や学生がミッション遂行の本番を経験できる貴重な機会でもあります。今期も、JAXAに入ったばかりの新人を含む9名が短期研修などの目的で参加しました。今後も同様の取り組みを継続し、人材育成にも貢献していきます。

世界中で供給不足になっているヘリウムガスに関しては、今年の実験の必要量は確保できたものの、ロシア・ウクライナ情勢に伴い供給不足が一層深刻化しており、今後も先手を打って対応する必要があると考えています。

今年も新型コロナウイルス感染拡大防止策に努め、内外の関係者のご理解もいただくことで、実験を実施することができました。実験実施にご協力いただきました関係者の皆様に深く感謝します。（福家 英之）

NASA SLS Artemis I 打上げ延期

OMOTENASHI、EQUULEUS両探査機が搭載されたArtemis Iの打上げが8月29日21:33～23:33(日本時間)に予定されていたため、両探査機チームを始め、地上系・運用系の各担当者は夕刻からスタンバイしていました。打上げにあわせて「JAXAとみる、国際宇宙探査の夜明け」イベントも行われ*、盛り上がっていたところでした。チームメンバーはNASA TVにて打上げカウントダウンの様子を見ていましたが、打上げに備えて冷却していた4つのエンジンのうちの1つが所定の温度範囲に入らず、21:44に打上げ中止との発表がありました。

その後の調査で、これは温度センサの故障とわかり、実際にエンジンは冷えていることから、9月3日(米国東海岸時間。日本時間では4日3:17)に再打上げ日が設定されました。事前には、「8月29日の次の打上げ機会は9月2日または5日(全て米国東海岸時間)」と言われており、我々はこれら打上げ日については検討をしていたのですが、予期していない9月3日打上げとなったため、大変驚きました。打上げ日に応じて軌道が全く異なりますし、地上局の割り当て時間も異なります。従って、運用手順の細かいところが変わってきますし、担当者の勤務シフトも考え直さないといけません。関連部署とも連携し、様々な詳細検討を開始し、なんとか3日の朝(日本時間)までに準備が整いました。

9月4日は早朝の打上げのため、3日の深夜から準備を開始すべくNASA TVを見ていたところ、今度は液体水素が漏れているので作業が中断しているとのこと。結局、水素漏れが止まらず、今回も打上げ中止となりました。最新の情報では、次の打上げ日は9月27日(日本時間28日)となっています。

打上げが延期になったことは大変残念であり、またこれまで行って来た打上げ日に依存する多くの作業が無駄となってしまったことは悲しいのですが、打上げ直前までのリハーサルができ、しかも2回もできたことは大きな成果と言えるかも知れません。OMOTENASHIとEQUULEUSは電源オフ状態で打ち上げられるので、打上げ約4時間後のロケットからの分離までは、我々は何もすることはないのですが、前日の過ごし方、厳しい運用に備えた食料の買い出しなどは十分なリハーサルができました。一方で、プロジェクト室に集まった、大量の差し入れのお菓子を賞味期限までにいかに消費するかが喫緊の課題です。これからもご支援、よろしくお願いします。

(橋本 樹明、船瀬　龍)

＊ 当日のアーカイブは右記でご覧になれます。 https://www.youtube.com/watch?v=GdPE39i6weo

第21回「君が作る宇宙ミッション(きみっしょん)」開催

8月1日から8月5日の5日間、高校生向け体験型プログラム「君が作る宇宙ミッション」(きみっしょん)を開催いたしました。新型コロナウイルスの影響で一昨年度は中止、昨年度はオンラインということで今年度こそは、と現地での開催を目指して準備してきましたが、7月に入ってからの感染急拡大によりやむなくオンラインでの開催となりました。

きみっしょんでは、「自ら考え、自ら決定し、自ら作業する」を理念として掲げており、高校生が主体的に宇宙ミッションの立案・検討を行います。また、今年度はコンセプトを「宇宙に挑む初めの一歩」と定め、きみっしょんで高校生に一歩を踏み出してもらいたいという想いのもと、大学院生スタッフは準備を進めました。今年は、課題作文で選抜された高校生18名が3班に分かれ、約50名の院生のサポートを受けて、ミッションの背景・目的・実現手段等について検討しました。最終的に生命探査ミッション、月居住ミッション、系外惑星観測・探査ミッションと高校生ならではの柔軟な発想と頑張りにより、魅力的なミッションが3つ提案されました。

高校生とスタッフ全員で写真撮影。

8月5日の昼に行われた最終発表会では、多くの職員や大学院生の方々にご参加いただき、活発な議論が行われました。JAXA研究者の方々から貴重な意見をいただき、高校生たちは多くの学びや刺激を得たことと思います。

きみっしょんでは、高校生の進路選択の幅を広げることを目的に、ミッション作成以外にも様々なイベントを実施しています。今年度は、「DESTINY^{+}」PM、高島 健教授による宇宙ミッション作成に関する講義、尾崎 直哉特任助教と兵頭 龍樹国際トップヤングフェローによるミッション作成における理学と工学の関わり合いに関する講義を実施しました。また、大学院生の研究を紹介する「院生講義」を実施しました。実際に進行中のプロジェクトについてもお話ししてくださり、高校生たち(大学院生スタッフも)の目も輝いていました。また、普段関わることのない大学院生や研究者との交流は、高校生たちが進路を考える上で大いに参考になったはずです。

一方で、運営に携わった私たち大学院生にとっても、きみっしょんは大きな刺激になりました。高校生への指導を通して、自身の研究を振り返る良い機会になったと思います。また、高校生のパワーに感化され、多くのスタッフがもっと自分も頑張ろうと思ったようです。きみっしょんスタッフの今後の研究活動にも、皆さまご期待ください。

最後に、きみっしょんの運営・開催にご協力いただいた皆様に御礼申し上げます。ありがとうございました。

(第21回きみっしょん事務局長　杉浦 圭佑)

～松本 敏雄名誉教授の叙位・叙勲～

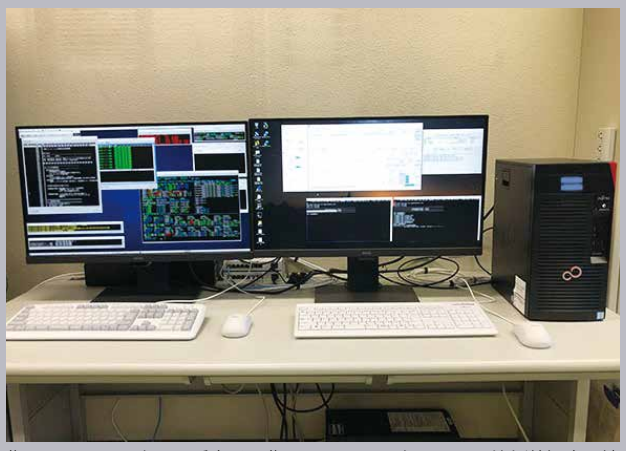
8月号で訃報をお伝えしました松本敏雄名誉教授に、生前の功績を称え、「従四位 瑞宝中綬章」が授与されましたのでお知らせします。(科学推進部)

XRiSM X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission

銀河を吹き渡る風をみる

連載 第5回

XRISMでの衛星運用準備活動



衛星シミュレータ。一番左は、衛星シミュレータにコマンドを送信する端末。一番右が衛星シミュレータの本体ハードはごく普通のパソコンです。

XRISMプロジェクトでは、ASTRO-H「ひとみ」衛星の運用中に異常事象を起こしたことからの教訓として、「運用準備」の活動にプロジェクトの初期の段階から力を入れてきました。これまでの宇宙研の科学衛星では、「運用準備」と銘打った活動はあまりなかったかもしれません。昨今、開発するシステムが大きく、複雑になり、設計・開発・運用を分業せざるを得ない状況です。そのため下手をすると、設計・開発したシステムは、運用できないシステムだったということが起こりかねません。そうならないように、設計段階で、運用のことを考慮した設計になっているか、設計ではどういう運用を想定しそれは無理なく運用できるか、を確認する必要があります。また、開発試験段階では、ミッション達成に対して制約が発生していないかを確認し、「ヒト」が運用を行えるように準備を行うという「運用準備」活動が不可欠です。ちなみに、科学衛星だけでなく、JAXA全体でもこの「運用準備」の重要性が認識され、2020年3月に「運用準備標準（JERG-2-701：一般公開）」という文書が制定されています。

さて、ここからはXRISMでの運用準備活動を振り返ってみたいと思います。まず、最初は、「運用コンセプト」の制定です。これは、システム要求の前提となっている運用方針の大枠をまとめたものになります。運用コンセプトの中で、「科学運用」についても「科学運用準備」として、前もって行なっていくプロジェクト計画としています。（「科学運用」、「科学運用準備」については後日、この連載で紹介予定です。）

「運用コンセプト」制定の次に行ったのが、「XRISM運用計画書」の作成です。ASTRO-HのリカバリーミッションでもあるXRISMでは、衛星システムの設計は基本的にはASTRO-Hのそれを踏襲します。そこで、ASTRO-Hの運用シナリオを改めて見直して、XRISMではどういう運用を行う計画なのかを明文化しました。併せて、初期段階の運用方針、異常発生時の対処方針、運用体制の方針をまとめ、総括PDR（Preliminary Design Review）時点で、初版の「XRISM運用計画書」を制定しました。また、XRISMでは、NASAがプロジェクトレベルでの国際協力となっていることを踏まえ、NASAの運用担当エンジニアにこの運用計画書をレビューしていただきました。

続いて、運用計画書をもとに、運用の成立性を確認する運用設計解析を衛星システムメーカーに行ってもらい、衛星運用文書の作成に入りました。衛星運用文書は衛星システムメーカーが取りまとめます。が、ミッション機器サブシステムについては、ミッション機器チームに協力してもらい、JAXAが取りまとめ、源泉文書を作成します。また、運用に関して、衛星運用チームが実際に行う手順を、衛星運用マニュアルという文書にまとめます。現在、これらの文書作成、整備という作業を行うとともに、運用者が確実に運用できるような訓練計画、リハーサル計画の策定を、進めているところです。

XRISMでは、安全、確実な運用を行えるように、地上の運用システムに新たにいくつかの機能を導入しました。そのうちの2つを紹介したいと思います。

1つ目は、衛星シミュレータです。この衛星シミュレータは、衛星搭載計算機である、データ処理系と姿勢軌道制御系の計算機を模擬し、同じソフトウェアが動くようにしたものです。初期のクリティカル運用のリハーサル（緊急事態のシミュレーションも可能）に活用するとともに、総合運用性試験での運用成立性の確認、運用チームの訓練に使用する予定で、さまざまなシナリオの準備を進めているところです。

もう1つは、衛星自動監視システムです。衛星の異常を即座に判定できるものです。宇宙研の衛星に共通のソフトウェアとして、すでに現行の衛星にも使用されていますが、XRISM用に、監視ルールを整備し、衛星総合試験（電気試験、熱真空試験）で使用しながら、監視ルールをブラッシュアップしているところです。

打上げまでは、文書用意、訓練、リハーサルとハードな「運用準備」活動が続きます。それで、打上げ後は余裕を持って、安全確実な「運用」を実施できればと考えています。

XRISMプロジェクト 運用マネージャ：
渡辺　伸（わたなべ しん）

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 7 回

実験専門職人の住処：能代ロケット実験場

能代ロケット実験場（NTC）は、内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられるロケットで使われる各種固体ロケットモータの地上燃焼試験を行うことを目的として1962年に開設された実験場です。以降、観測ロケット、ラムダロケット、ミューロケット、イプシロンロケットの開発試験を通じて、日本の宇宙科学ロケットの発展に寄与してきました。秋田県能代市浅内の日本海に面した南北に細長い敷地（南北430m、東西167m）の中央部には、固体ロケットモータの地上燃焼試験に必要な設備として、大気燃焼試験棟、真空燃焼試験棟、冷却水供給設備、火薬庫が設置されています。このうち大気燃焼試験棟は、推力500tまでの固体ロケットモータを試験可能な設備として整備されています。真空燃焼試験棟は、推力150tまでの固体ロケットモータの真空燃焼試験に対応し、棟内には内容積475m^{3}の大型真空槽と15t天井走行クレーン2基が設置されています。NTCでは、これらの固体ロケットモータ地上燃焼試験設備を定期的な点検、メンテナンスによって丁寧に維持管理しており、最近ではスペースワン社のカイロスロケットなど、民間ロケットの開発にも大きく貢献しています。また、固体ロケットの開発試験がない期間には、大型真空槽の低圧環境を利用する基礎実験などにも柔軟に対応しています。

NTC南側より、真空燃焼試験棟（右）と再使用ロケット離着陸場（手前）、水素試験エリア（奥）を望む。

NTCにおける実験の様子（大学と宇宙科学研究所の共同で、大気利用による再使用ロケットの高性能化に関する実験を実施しています）。

NTC敷地の北側では、1975年から液酸・液水エンジンの研究開発が開始され、その基礎実験を行うために極低温推進剤試験棟が設置されました。ここでは、推力7～10t液酸・液水ロケットエンジンを構成するターボポンプやガスジェネレータ等の機器開発試験が行われました。開発した機器は、エンジンシステムとして組み上げられ、最終的にタンクシステムと組み合わせたステージ燃焼試験までNTCで実施されています。極低温推進剤試験棟は老朽化したため、2011年から2015年にかけて段階的に更新を実施し、現在では、液化水素、液化酸素、高圧水素ガス、高圧酸素ガスを利用可能な汎用実験設備として再整備されました。液化水素の供給源としては、容量30m^{3}の液化水素貯槽が設置されています。本貯槽には常時液化水素を貯蔵しており、任意のタイミングでユーザーに液化水素を供給可能な状態を維持しています。貯槽付属の蒸発器によって最大0.3MPaまで液化水素を加圧し、1時間あたり最大20,000Lの液化水素を送液することができます。また、液化水素を最大93MPaまで昇圧し、供給するポンプ設備も付帯しています。2019年には液化水素貯槽を拡張して大規模水素供給技術実証用試験設備が整備され、様々な液体水素供給技術試験に活用されています。

NTCは、真空燃焼試験棟や大規模水素供給技術実証用試験設備など、日本ではここにしかないユニークな設備があり、さらに比較的市街地の近くにあるにも関わらず、最大1km保安距離を確保できるという安全面での特長が多方面で認識されるようになり、これによって、NTCにおける実験の数が年々増加傾向にあります。NTCの運営に関しては、5名の常勤職員に加え、宇宙科学研究所の専門・基盤技術グループ、研究系、および研究開発部門のNTC併任者による体制をとり、各実験における安全講習や環境教育の徹底、用水、電力設備、計測・通信機器といった実験環境の整備など、エリア管理業務を遂行しています。

最後に、JAXA外の大学や企業がNTCでの試験実施を要望する場合の手続きを簡単にご説明します。まず、宇宙科学研究所との間で共同研究契約を締結していただく必要があります。試験内容によっては高圧ガス設備の変更工事が必要になる場合もあり、NTC職員が法令に基づく諸手続きを担当します。その後、試験計画について宇宙科学研究所の安全審査を受け、プログラム会議において他計画との干渉がないことを確認の上、試験実施が承認される流れになっています。一連の手続きには通常2～3ヶ月かかりますが、JAXA職員がしっかりサポートしますので、お気軽にご相談ください。

問い合わせ窓口：NTC所長 **小林 弘明**（こばやし ひろあき）

宇宙・夢・人

Space Human Dream

気球実験は宇宙への扉 その障壁を下げたい

学際科学研究系 助教
水村 好貴（みずむら よしたか）

1985年、埼玉県生まれ。東海大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士（理学）。京都大学大学院理学研究科研究員、京都大学宇宙総合学研究ユニット特定助教などを経て、2019年より現職。専門はガンマ線天文学。

MeVガンマ線天文学を開拓する

――2019年、宇宙研に着任されました。それ以前は？

博士号の取得前に京都大学大学院理学研究科の教務補佐員に着任し、それから7年8ヶ月で京都大学の9つの任期制ポストを経験して、10回目の着任で宇宙研に来ました。「研究者歴1桁年、着任回数2桁」という経歴を持つ人は、あまりいないのではないでしょうか。落ち着かず不安にもなりましたが、所属が変わっても自分の研究の柱であるガンマ線天文学に関わっていられたのは幸いでした。

――どのような研究をされているのですか？

私が注目しているのは、メガ電子ボルト（MeV、メガは10の6乗）領域のガンマ線です。MeVガンマ線は、特に原子核の反応と深い関係を持っています。それを観測することで、宇宙のどこで、どの元素が、どのように合成され、どのように拡散していくのか、元素の起源や進化が分かります。ただし、ほかの波長での観測と比べてものすごく難しいのです。

私たちの研究グループでは、固体や液体ではなく、ガスを使った検出器を開発しています。これによりガンマ線の到来方向の決定精度が格段に向上しました。しかし、新しいアイデアの検出器をいきなり大型の宇宙ミッションに仕立てることは大変です。そこで、これまでに2回、気球に検出器を搭載して実験を行っています。私が参画後の2回目は2018年にオーストラリアで実施し、かに星雲などからのMeVガンマ線を捉え、設計通りの観測感度を達成しました。MeVガンマ線を観測しようといくつもの研究グループがいろいろな検出器を開発していますが、設計通りの性能を達成できたのは私たちが初めてです。気球による観測の成果を積み重ねて人工衛星などを実現し、誰も見たことがない宇宙の姿を解き明かしたいと思っています。

気球の飛翔航跡を設計し制御する

――気球実験への参加は2018年が初めて？

はい、気球実験についてほぼ何も知りませんでした。科学成果を確実に上げる観測器だけでなく、安全に実験を実施するための準備にとても苦労しました。初めての気球実験に感動している余裕はありませんでしたね。それが実は今、気球実験の運用にも携わっています。

――どのような役割を？

気球は高層風に乗って飛翔し、実験を行います。このとき気球からのガス排気とおもりの投下によって、どの風にどの程度乗るかを調整して飛翔航跡を制御します。十分な観測時間の確保や安全な飛翔と確実な装置回収には、高層風の状態がとても重要になります。地上気象と高層気象の予報を元に、いつが最適な放球で、どう飛翔すべきかを、保安と科学成果創出機会の最大化の両面で設計し制御するのが、私の主な役割です。

――運用に携わって感じたことはありますか？

気球実験は宇宙への扉だと思います。しかし、人工衛星などに搭載する場合より実験装置への制約が緩いとはいえ、私が苦労したように、ものすごく簡単というわけではありません。宇宙への扉の障壁をもっと下げたい、と強く思うようになりました。

自分たちの実験装置を気球搭載用に改造するのですが、それには特有の技術が必要です。そこで、設計の一部分は個別に実施せずとも済むよう標準規格を決め、「相乗り実験」のように小型実験装置をまとめて搭載する機会の、より積極的な活用が効果的ではないかと考えています。技術的な障壁が下がるだけでなく実験機会も増え、宇宙との関わりが少なかった分野からも学際的な新しい宇宙実験が生まれるといいなと思います。

傘に当たる雨の音が好き

――子どものころは、どのようなことに興味がありましたか？

雨の日に傘を差して歩いていると、ポツポツとかポンポンとか、いろいろな音がしますよね。小学生のころ、傘に当たる雨の音が好きでした。それがきっかけで天気や天（そら）に興味を持つようになり、ゆっくりと空を眺めるのも好きでした。いろいろな形の雲があるなぁ、あんな遠くにも雲があるんだ、と飽きずに見ていました。そして今、高層気象にも関わっている。つながりを感じます。

――普段から心がけていることはありますか？

いきなり拒否はしないことです。「研究者歴1桁年、着任回数2桁」の中で、珍しい経験もたくさんしてきました。例えば、宇宙飛行士、軌道工学者、哲学研究者、芸術系の方などと協働して「有人宇宙学」という教育カリキュラムをつくりました。「お寺で宇宙学」という科学コミュニケーションイベントでは、お坊さんとお寺で対談をしました。違う分野や立場の人と接すると、知らない世界を知ることもでき、それが思わぬところで役に立つ。そういうさまざまな経験があったからこそ、今の自分があるのだと思います。

編集後記

今年も夏の暑さの残る中、東の夜空に浮かぶ丸い月にしばし見惚れました。見る 時々で表情が変わるように思うのは私だけでしょうか？ままならぬものをなんとかしようと悪戦苦闘する日々が続きますが、できるまで待つ忍耐や、ゆっくりと月を眺める時間も大事にしたいものです。（斎藤 芳隆）

ISASニュース No.498 2022年9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/