

はやぶさ2が還ってきた：

NECの深宇宙探査への取り組み

令和2年（2020年）12月6日、小惑星探査機はやぶさ2が、小惑星リュウグウより持ち帰ったサンプルを格納したカプセルを、地球に帰還させることに成功しました。

令和3年1月末現在、カプセル内のサンプルの開封作業が進み、すでに5グラムを超えるサンプルを回収できたことが判明しています。また、はやぶさ2は、地球スイングバイに成功し、次なる小惑星へ向けた11年間の新たな旅へと出発しました。

本文では、小惑星探査機はやぶさ2のミッションと、同ミッションにおけるNECの役割、運用におけるエピソードを紹介します。

1. はやぶさ2のミッションと、運用来歴

はやぶさ2は、2010年6月に地球に帰還し話題となったはやぶさ初号機の後継機として開発され、2014年12月3日に種子島宇宙センターより打上げられ、C型小惑星リュウグウの探査を行いました。2018年6月27日にリュウグウ近傍20kmのホームポジションに到着すると、2019年2月22日に1回目のタッチダウンに成功、同じく4月5日にインパクトによる人工クレータの生成実験に成功し、7月1日にはクレータ近傍へ2回目のタッチダウンを成功させました。その間、接近観測によりリュウグウの特性を明らかにするとともに、複数のローバ投下に成功するなど、計画された運用を順調に進め、2019年11月にリュウグウ近傍を離脱し、地球に向かいました。

そして、2020年12月6日、はやぶさ2は無事地球へと帰還し、サンプルを格納したカプセルを地球に届けることに成功しました。

カプセル内に入っていたリュウグウのサンプルは、目標サンプル収量の100mgを大幅に上回る5.4gが確認されています。C型小惑星は、水や有機物を含んでいると考えられてお

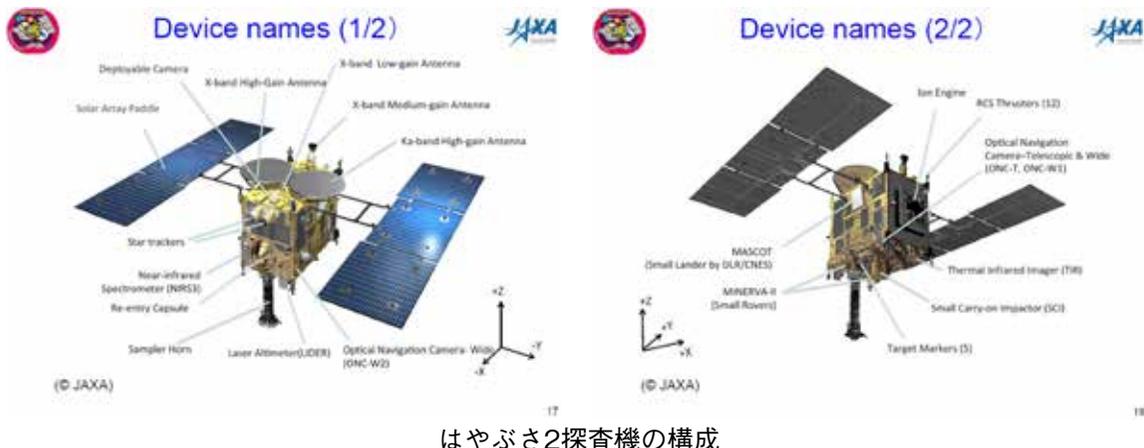
り、さらにクレータ生成実験によって露出した地下物質が採取できた可能性があります。太陽からの光や熱、宇宙線、隕石による影響の少ない新鮮な物質を調査することにより、太陽系の歴史や、地球の生命誕生の起源に迫る情報が得られることが期待されています。

また、はやぶさ2は、カプセル分離後、軌道変更・地球スイングバイを行い、1998 KY26という小惑星にランデブーすることを目指した拡張ミッション軌道へと遷移しました。直径30m程度と非常に小さく（参考：リュウグウは直径1km程度）、かつ高速自転しているとされる小惑星であり、いずれの特徴についても世界初の接近探査として計画されています。1998 KY26への到着は2031年に予定されており、打上げから現在までのミッション期間の1.5倍以上となる長旅の予定となっています。

2. はやぶさ2探査機の構成

はやぶさ2の外観図を以下に示します。

+X面にはイオンエンジンが搭載されています。4台搭載中、3台までの同時運転が可能です。



はやぶさ2探査機の構成

であり、イオンエンジンの特徴である高いIsp（比推力）により総質量600kg程度の軽量の探査機での深宇宙探査を実現しています。

機体下部（-Z面）に配置された特徴的なホーン構造がサンプラーホーンであり、これを小惑星表面に押し付け、その瞬間に弾丸を発射し、小惑星地表を破碎、舞い上がらせることによって、サンプルを採取する設計となっています。

機体上部（+Z面）には、眼鏡のような2枚の高利得アンテナ（HGA）が配置され、太陽電池パネル（SAP）も+Z向きに配置されています。

-X面には、観測機器やスタートラッカー（STT）が搭載されている他、地球帰還カプセルもこちらの面に搭載されています。

3. NECの役割／探査機設計・製造と運用支援

NECは、JAXA殿のご指導の下、はやぶさ2の設計・製造を担当しました。

イオンエンジン・太陽電池パドル・データ処理ユニットなどの主要機器を含む、全コンポーネントの8割程度の設計・製造を担当し、また、電源系、データ処理系、通信系、姿勢制御系、熱制御系、構造系といった主要なサブシステム設計・検証、および全体システム

の設計・組立・検証を担当しました。

また、運用についても、打上げ～帰還までの全フェーズにおける運用の設計、および実運用にあたっての技術支援を担当しました。

筆者は、はやぶさ2全体の運用担当として、設計フェーズ～実運用フェーズ、帰還完了までにわたり、運用設計、運用技術支援を担当しました。

打上げから帰還まで6年という非常に長い運用となりましたが、振り返ってみると、やはりリュウグウに滞在していた1年半（2018/6～2019/11）というのは非常に山あり谷ありであったと感じています。その大きな山場であった、1回目のタッチダウンについてのエピソードを紹介したいと思います。

リュウグウは、地球からの観測では、正確な形状がわかりませんでした。当然タッチダウンに適した地形があるかどうかは全く分からない状態です。一方、はやぶさ初号機が滞在したイトカワの形状から、半径50m程度の平地はあるであろうという前提を置いて、運用設計を進めていました。

ところが、2018年6月、いざリュウグウに到着してみると、半径50mの平地、などとい

うものは全くなく、とにかくゴツゴツした岩だらけの星だということがわかってきました。

まずは「観測だ」ということで、7月、8月に、小惑星表面から5kmまで接近、続いて1kmまで接近、と段階を追って接近し、小惑星表面を観測しましたが、平地が見つかりません。

2018/8のお盆休み前、JAXA殿から招集がかかり、「これは半径50mの平地はなさそうだ、別の手を考えなければならぬ」と告げられました。

「着陸精度をあげられないか」「大きな岩の上にタッチダウンするのはどうか・・・」

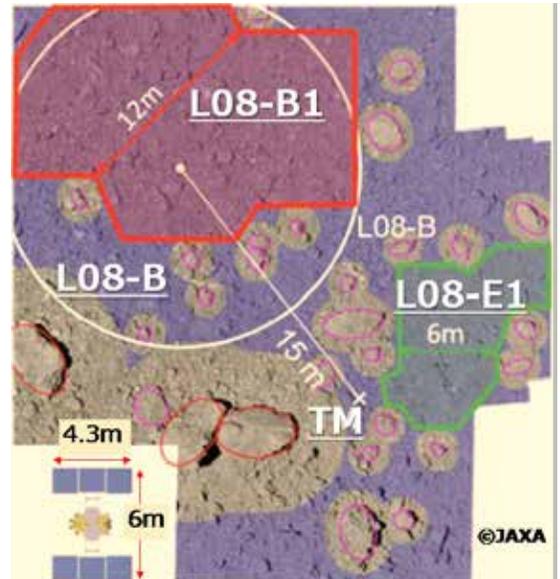
いろいろな意見がでましたが、最終的には、ターゲットマーカを先に落とす方法を選択しました。

これは、当初計画においては、1回目のタッチダウンを行った後、インパクトで作成した人工クレータもしくはその周辺に、ピンポイントでタッチダウンを行うために検討していた方式（PPTD方式）でした。この方法であれば格段に精度が上がるということは、関係者の共通認識でしたが、落ちていたターゲットマーカの上空に正確にはやぶさ2を誘導し、上空からターゲットマーカを「見つける」運用が必要になり、はやぶさ初号機の方式に比べ、難易度が格段に上昇します。しかし、これにチャレンジするしかない。そう結論づけ、PPTD方式の採用が決定されました。

2018年9月、PPTD方式の実装前倒しを検討しながら、ローバ（MINERVA-III）やランダ（MASCOT）を投下する運用を行いました。

そして、2018年10月、L08-B領域（下図白い円）にめがけてターゲットマーカを投下しました（TD-R3運用）。L08-B領域は、半径10m強ほどの領域で、それまでの観測では大

きなボルダ（岩）はないだろうと見込まれていた領域でした。ターゲットマーカは、L08-B領域から5mほど離れた領域に着地しました（×TMで示す位置）。しかし、半径10mの円に降りるなら十分近い領域である、そう考え、運用計画を検討し、成立の見込みを得ることができました。

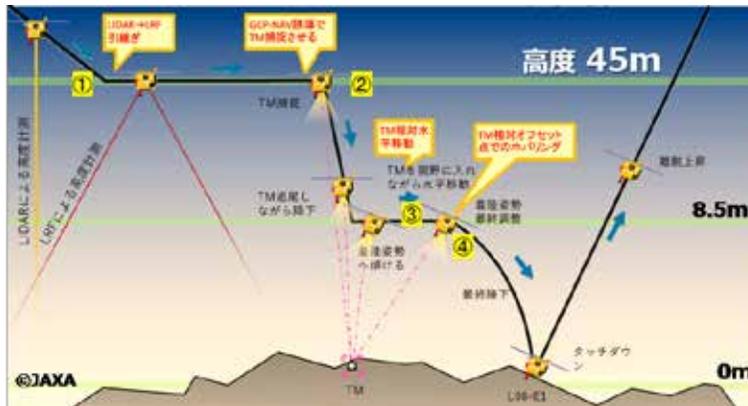


1回目タッチダウン周辺領域の図

ところが、その成立見込みを携えて臨んだ2018年11月の打合せで、「L08-B領域の中には、やはりボルダがあったことがTD-R3運用時に得られた画像からわかった」とJAXA殿から告げられました。

この時は正直非常にショックを受けました。これは厳しいのではないかと・・・ここまで頑張ったのに、やっぱり無理なのか、と思う自分がいました。

しかし、その打ち合わせで、すぐに次のプランの検討が始まります。「L08-Bの中でボルダがない領域（L08-B1）を狙う」、「多少狭くてもターゲットマーカの近くにある平地（L08-E1）を狙う・・・」みんなまだあきらめ



タッチダウン前後の自律シーケンス

ていません。自分もすぐに気持ちを切り替えて議論に臨みました。

議論の結果、ターゲットマーカのすぐ脇にあったL08-E1領域を狙ってタッチダウンを行うことが決定しました。L08-E1領域は直径6m程度。はやぶさ2の両翼は6m。求められるのは超高精度のタッチダウンでした。

2018年11月～12月にかけて、探査機が見かけ上太陽に近づいて通信できない合（ごう）期間を活用し、小惑星の詳細な地形や、ここまでの運用で取得できた高度計（LIDAR／LRF）の性能を最大限評価し、高精度化の検討を繰り返しました。万が一にも激突を回避できるように、シーケンスを作りこみ、評価を繰り返しました。

その結果、タッチダウン成立の見込みを得ることができ、2019年2月12日に、タッチダウン運用手順がレビュー会を通過。同2月22日に、第一回タッチダウン運用が実施されました。

小惑星表面近傍では、地球からの指示は間に合わず、すべてを探査機に任せるしかありません。姿勢が変わるため、探査機からのデータも受信することができず、わかるのは地球からの相対速度（ドップラ）のみで、小惑星

からの離脱を確認することしかできません。皆がかたずを飲んで見守る中、予定されていた小惑星離脱上昇速度の発生が確認されました。タッチダウン成功。管制室が大いに盛り上がりました。

その後、探査機からのデータを受信し、サンプラーホーンからの弾丸発射成功も確認。タッチダウン時の画像も取得でき、完璧と言える成功だったことがわかりました。

振り返って重要だったと思うことがいくつかあります。

○初号機の経験を活かすことができたこと。

初号機の運用をベースとすることで、0から運用を作り出すのではなく、皆が共通のイメージを持って運用を形作ることができました。結果として多くの目を通して運用が磨き上げられ、初号機から格段に進化した運用を実施することができました。

○柔軟性の高いシーケンスプログラム

上記のエピソードの中でも、幾度となく探査機の実行シーケンスを変更しています。その裏では、探査機の異常シーケンスへの移行などの対処も柔軟に設定し、探査機の安全を担保しながらシーケンスを変更することを短期間にこなしています。

この柔軟性の高いシーケンスプログラムも、初号機からの設計資産でした。小惑星に到着し、観測データを得てから短期間にシーケンスをくみ上げる必要がある、という小惑星探査の特性を踏まえた、非常に先見性のある設計であると考えます。

○プロジェクトのチームワーク

JAXA殿／メーカーの垣根にとらわれず、すべてのチームメンバーが自律的に考えながら、与えられた役割を着実にこなし、一方で互いの結果をあらゆる角度でチェックし合う、という素晴らしいチームワークが形成できていました。こうしたチームワークは、長期にわたる運用設計・計画、そして訓練を経て醸成されてきたものでした。1回目のタッチダウンを経て、チームワークはさらに高次元へと成長し、インパクトによるクレータ生成実験、2回目のタッチダウンの成功へとつながっていきました。

4. 今後の展望

はやぶさ2は、2020年12月6日にカプセルを地球に届けたことにより、当初のミッションを完遂し、小惑星探査及びサンプルリターン技術の有効性を実証しました。

これは、様々なトラブルを抱えながら地球に帰還したはやぶさ初号機での経験を反映し、技術を継承・改善したことによって得ら

れた成果であり、単発の探査に留まらない継続的なプログラム型ミッションの有効性を示しているものであると考えます。

特に科学・探査領域の衛星・探査機は、非常に特殊なミッション要求により、特殊な技術・コンフィグレーションとなってしまうことが多い傾向がありますが、その中でも共通化可能な技術を選定し、技術を繰り返し継承・改善可能とすることが、進歩的な成果を得るために極めて重要であると考えます。また、科学ミッションそのものについても、技術の改善・成熟を考慮した、プログラマ的な観点で構築されることが重要であると考えます。

はやぶさ／はやぶさ2の成功は、イオンエンジンや光学航法（OPNAV）、柔軟かつロバストな姿勢軌道制御シーケンスプログラムと、それによる高精度位置制御といった、「小天体探査のプラットフォーム技術」を確立したといえます。また、リュウグウが広義の意味で非協力物体であると捉えれば、「非協力物体へのアプローチ技術」を獲得したといえます。

NECは、小惑星探査機DESTINY+の開発等を通じて、これらの技術を継続的に活用・改善していき、将来のさらなる深宇宙探査ミッションへと貢献していきます。

[NEC 宇宙システム事業部 はやぶさ2システムマネージャ 益田 哲也]

NEC 宙への挑戦 <https://jpn.nec.com/ad/cosmos/>