

はやぶさ2による小惑星着陸の達成

津田雄一 Yuichi TSUDA

宇宙航空研究開発機構 はやぶさ2プロジェクトマネージャ

Key Words : Solar System Exploration, Sample Return Mission, Precision Landing

1. はじめに

小惑星探査機はやぶさ2は、2019年2月22日に、小惑星 Ryugu への着陸に成功した。達成した着陸精度は1m。想定よりはるかに険しい Ryugu の地形に適応するため、当初計画を4カ月遅らせ、じっくり作戦を練り直してからの挑戦であった。本稿では、はやぶさ2の第1回着陸運用の実現までの道のりと、着陸当日の様子を紹介する。

2. 着陸実現の下準備：2つの訓練

はやぶさ2は小惑星 Ryugu 近傍に1.5年滞在することになっており、その間に3回のタッチダウン、3回の着陸機投下、1回の人工クレータ生成を行う計画であった。これだけ多くの毛色の違う運用をこなしていくためには、事前の準備が極めて重要というのが、はやぶさ2プロジェクトチームの危機感にも似た認識だった。はやぶさ初号機の経験から、ひとつ目標天体に到着した後は、新しいことを考える余裕などないことが目に見えていたからだ。

そのため、はやぶさ2では打ち上げから小惑星到着までの3.5年の巡航期間を利用して、2つの訓練を企画し実施してきた。

その一つ目は「着陸点選定訓練」。これは、Ryugu を模擬した仮想的な小惑星モデルを使って、技術的に成立し科学的に意義の高い着陸点を時間内に選定できるようにするための訓練。この時期 Ryugu 自体は未知だったので、「Ryugoid」と名付けた仮想小惑星モデルを科学チームが創り上げた。この Ryugoid は、1億ポリゴンの形状モデルを形成史から仮定して作成したもので、その一つ一つのポリゴンに化学的・地質学的な属性が割り当てられた本格的なもの。それを使い、はやぶさ2の観測機器の性能と観測スケジュールを考慮して、あたかも実際に探査機から得られたかのようなデータセットを用意した。

はやぶさ2に参画する国内外約100名のエンジニア・サイエンティストが1年をかけてそのデータの扱いに習熟しつつ、最終的に Ryugoid 上の着陸点をチームの総意として選ぶことができた。ちなみに、Ryugoid は本物の Ryugu とは似ても似つかないものであった。

訓練の2つ目は、「実時間運用訓練」だ。これは着陸のようなクリティカル運用を模擬した訓練を、実際の管制室

の環境とはやぶさ2のシミュレータを接続することにより実現するものである。はやぶさ2のシミュレータは、開発時に EM や BBM として製造したコンポーネントを寄せ集めて組み立てた、実機と電氣的に等価なもの。着陸のような小惑星近傍の運用状況を模擬するために、はやぶさ2シミュレータのカメラに Ryugoid の CG を入力した。また、訓練のリアリティと難しさに決定的に効く、地球=小惑星距離3.6億kmに相当する約20分の時間遅れも模擬した。このような模擬度の高い深宇宙運用シミュレータの実現は、日本では初めてである。

実時間運用訓練は、小惑星到着前の1年で合計47回行われた。訓練には約50名の管制メンバーが参加。訓練の内容は、低高度降下から始まり、着陸や人工クレータ生成運用等、すべての計画上のクリティカル運用を網羅した。訓練に際しては、運用(人間)チームと出題(神様)チームに分かれ、出題チームが故意にトラブルを生成し、運用チームがそのトラブルに迅速に対処することが求められた。

プロジェクトチームは、「訓練で良質な失敗をできるだけ多く経験することが Ryugu 到着後の運用成功に繋がる」という考えのもと、多重のトラブルに対処する訓練を積み重ねた。実際、47回中半数近くは、小惑星への墜落を含む「失敗」であった。この経験から管制メンバーのチームワークが醸成され、運用信頼性を高める運用シーケンスの改善が数多くなされた。

3. 険しい Ryugu 環境への直面：着陸点選定

はやぶさ2は2018年6月27日に Ryugu 上空20km(ホームポジションと呼ぶ定点)へ到着した。到着後の観測からは、Ryugu が「コマ型」という特徴的な形状であること、自転軸が黄道面にほぼ垂直であること、そしてボルダー(岩塊)が極めて多いことが判明した。

はやぶさ2の開発仕様上の着陸精度は50mであり、その仕様を守ろうとすると、直径100mに渡って安全な地形を探す必要があった。しかしながら、Ryugu にそのような地形がないことは一目瞭然。やむを得ず、まずは完全に安全でなくとも比較的平坦性の高い100m四方のエリアを探すことにした。

Ryugu 到着の2カ月後の8月17日に、国内外の全プロジェクト関係者が参集する「Landing Site Selection Meeting」が相模原で開催され、着陸候補地点として「L08」

と名付けた赤道域のエリアが選ばれた。また、バックアップとして中緯度帯の「M04」が選ばれた。この着陸候補点決定に際しての作業は、事前の「着陸点選定訓練」の経験が活き、意外な Ryugu 環境に直面しつつも 2 カ月で混乱なく合意形成に至れた。

さて、そのように選んだ L08 エリアも完全に安全とは言えない状況だったので、その後も観測を重ね、解像度の高い情報の取得に注力した。その結果、L08 エリア内の着陸可能なエリアとして、直径 20 m の地域「L08-B」を見出した。しかしながら、直径 20 m 円内に着陸するためには着陸誘導精度 10 m が必要でありはやぶさ 2 の当初の能力を超えていたため、プロジェクトとしては当初計画の 10 月着陸を延期し、着陸精度の大幅な向上策を考えることにした。

4. 作戦変更：ピンポイントタッチダウン方式

精度向上策を考える上でのとっかかりは、ターゲットマーカ (TM) の使い方であった。TM は再帰性反射素材で覆われた直径 10 cm のボールである。これを小惑星の地表に落とし、探査機からフラッシュ光を照射することで、探査機が自律で行う対地誘導航法の目印となる。当初は、第 1 回の着陸はこの TM を着陸シーケンスの途中で投下し追尾することで、対地相対速度のみを打ち消しながら着陸する計画であった。

しかしその作戦を変更し、着陸はせず TM を投下するまでを先に実施することにした。その目的は、①探査機の“身代わり”として TM を投下することで、我々の対地誘導航法精度の実力を直接的に把握することと、②投下後の TM を探査機のカメラで自動追尾することで探査機の TM 追尾制御の性能を実地に評価することであった。

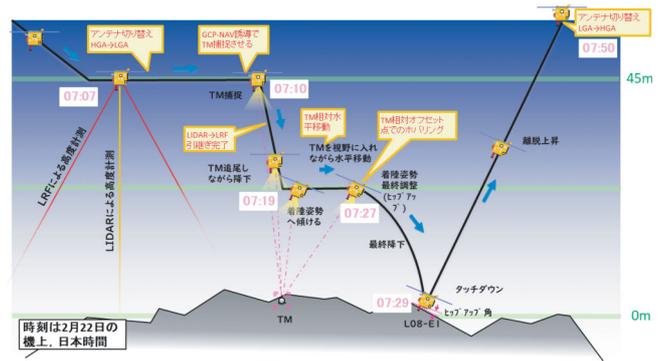
その目的で 10 月 22~25 日に実施された運用 (運用名: TD1-R3) では、TM を狙った点から 15 m の地点に落とすことができ、さらに自律 TM 追尾制御は高度 8.5 m という超低空で ± 50 cm の精度でできていたことがわかった。

プロジェクトチームは、この結果に大いに自信を持ち、その後はこの既に落ちている TM に相対的な地点に着陸を目指す「ピンポイントタッチダウン」方式の実現に舵を切ることになる。

着陸目標点としては、TM から 4 m の地点に直径 6 m の「L08-E1」と名付けた平坦地を見つけた。つまり目指す着陸精度は 3 m 以下。数カ月前まで広さ 100 m の平坦地を探していた状態からは信じられない程のステップアップだ。この時期のエンジニアとサイエンティストの「これこそ探査！」とばかり丸となった協業は、高レベルかつ崇高な光景であった。

5. 着陸技術の完成：第 1 回タッチダウン運用

2019 年 2 月 21 日に、はやぶさ 2 は当初予定の 5 時間遅れで高度 20 km のホームポジションを離脱し 1 m/s で Ryugu へ降下を開始した。この遅れの理由は、降下開始直前に発覚した探査機シーケンスの誤作動であった。プロジェクトチームは即座に問題を特定・解決し、降下を再



第 1 図 第 1 回タッチダウン低高度シーケンス

開。当初計画より降下速度を 2 倍速めることで、遅れを取り戻し計画軌道へ追いつくことができた。問題への迅速な対処と高速降下の決行は、先述の「実時間運用訓練」の経験があったからこそできた決断であった。

はやぶさ 2 は高度 5 km 通過時に降下速度を 10 cm/s に落とした。高度約 500 m の着陸 Go/No Go 最終チェックポイントにて地上から「Go」コマンドが送出され、以降探査機は完全自律モードに入った。高度 45 m で地表に落ちている TM を捕捉、捕捉した TM を搭載カメラの視野中心に捉えつつ高度 8.5 m まで降下。高度 8.5 m にて地形に探査機底面を沿わせる最終着陸姿勢をとり、かつ着陸降下開始ポイントへ水平移動。姿勢・位置がともに収束したらフリーフォールを開始。日本時間 2 月 22 日午前 7 時 29 分 10 秒にタッチダウンを検知しサンプリングのための弾丸発射、そして上昇が行われた (第 1 図)。なお、高度 45 m 以下のシーケンスは地表相対姿勢が重要なため、高利得アンテナを地球へ向けられない。そのため、管制室ではテレメトリデータではなくダウンリンク電波の周波数変化 (ドップラーシフト) にてシーケンスの進行を見守った。その波形からは文句なしの成功が見て取れた。

上昇後、探査機は自動的に高利得アンテナを地球に向けなおし、タッチダウン時の状況を地上へ下ろし始めた。そのデータからは、タッチダウンシーケンスが正常に進行したこと、弾丸発射に伴う火工品温度上昇があったこと、探査機各部は正常であることが判明し、当日のうちに第 1 回着陸は完全成功の判定に至った。

事後解析によると着陸精度は 1 m であった。また搭載カメラにより、美しくダイナミックな着陸プロセスを写すことにも成功した。

6. おわりに

はやぶさ 2 は、その後 2019 年 4 月 5 日に人工クレータの生成に成功、同 7 月 11 日には人工クレータの近傍へのタッチダウンに成功した。これらによりはやぶさ 2 は、小天体への高精度着陸、人工クレータ生成、多地点サンプリング、地下物質サンプリング等、宇宙探査上の試金石となり得る数々の世界初を樹立できた。はやぶさ 2 は、2019 年 11~12 月に Ryugu を離脱し、2020 年 11~12 月に地球へ帰還する計画である。