

火の鳥「はやぶさ」未来編 その13

～LSS訓練：ひと月で小惑星の特徴を把握し試料採取地点を絞り込め～

石原 吉明¹・渡邊 誠一郎²，田中 智¹，山口 智宏¹，三浦 昭¹，
山本 幸生¹，平田 成³，諸田 智克²，坂谷 尚哉⁴，北里 宏平³，
松本 晃治⁵，藪田 ひかる⁶，はやぶさ2LSSデータ解析・検討チーム，
はやぶさ2LSSデータ作成チーム

(要旨) 「はやぶさ2」は、C型小惑星リュウグウ(Ryugu)にランデブーし、母船からのリモートセンシング観測及び小型着陸機によるその場観測を行うとともに、最大3回の表面物質サンプリングを行うこととなっている。サンプリング地点には、リュウグウそのものや母天体、さらには太陽系形成時の惑星集積過程と物質進化について、最大の情報を得られる場所を選定する必要があるが、選定のために必要となる情報はランデブー後取得されるリモートセンシング観測の結果を待たねばならない。そのため、限られた時間の中で小惑星の特徴を把握し、安全性と科学価値の評価を行い着陸地点選定(Landing Site Selection, LSS)を行う手順を確立しておくことは必須である。本稿では、来年に迫ったLSS本番に向けて、はやぶさ2プロジェクトが実施したLSS訓練について概説する。

1. はじめに

小惑星探査機「はやぶさ2」は、C型小惑星リュウグウ(Ryugu)にランデブーし、母船搭載機器によるリモートセンシング観測(ONC, NIRS3, TIR, LIDAR)、小型着陸機によるその場観測(MINERVA 及びMASCOT)、母船のサンブラを接地(TD)させて行う表面物質サンプリング、衝突装置(SCI)と分離カメラ(DCAM3)を用いた小惑星衝突実験、さらに(可能なら)高精度TDによるSCI生成クレータ周辺の地下物質についてもサンプリングを行ったのち、リュウグウを離脱して地球に帰還し、取得したサンプルを格納したサンプルコンテナをリエントリーカプセルを用いて地球に送り届け、持ち帰ったサンプルの各種地上分析を実施する予定である。探査機に搭載した各種のリモートセンシング機器のデータと地上でのリターンサンプルの詳細分析から、C型小惑星がもつ太陽系スノー

ライン(氷凝縮境界)付近での惑星集積過程と物質進化(特に水質変成や有機物多様化)の情報を読み出し、地球への水・有機物供給に関して制約を与えることを目的としている。この目的を達するためには、ただ闇雲にリュウグウからサンプルを採取すれば良いということではなく、リモートセンシング観測により取得した各種のデータから「リュウグウ上のどの場所の物質を持ち帰るべきか」を判断しなければならない。また、サンプリング時の探査機の運用計画・安全性評価を行うにも、現地でのリモートセンシング観測データを用いる必要がある。

一般に月や火星における着陸探査では、事前に取得された他ミッションによるリモートセンシング観測データを用いて、この種の安全性評価や科学評価が、場合によっては数年にわたって行われた後に着陸地点が決定される。一方、「はやぶさ2」のような小惑星探査の場合、地上望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた観測データは存在しても、事前にその場リモートセンシングデータが存在しないため、全てはランデブーし観測データを取得し始めてからのタスクとなる。「はやぶさ2」の場合、リュウグウの近傍観測は2018年7月に開始されるが、最初のひと月余りの内に、観測運用と並行して

1. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

2. 名古屋大学

3. 会津大学

4. 明治大学

5. 国立天文台

6. 広島大学

ishihara.yoshiaki@jaxa.jp

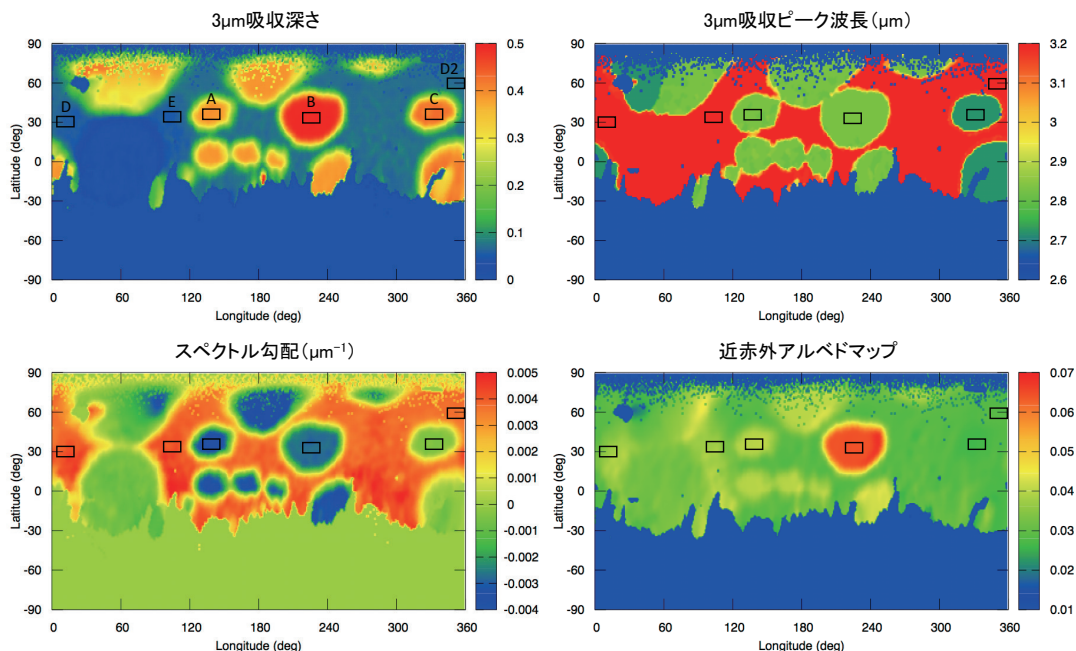


図1：近赤外分光計(NIRS3)によるスペクトル特徴量マップ。

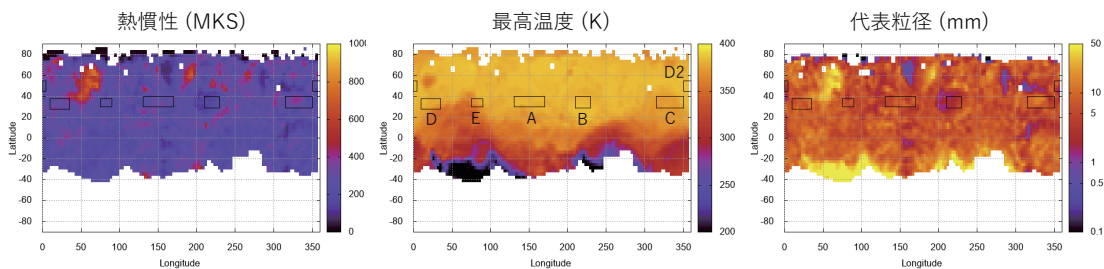


図2：中間赤外線カメラ(TIR)による熱慣性・最高温度・代表粒径マップ。

観測に基づく安全性と科学的価値の評価を行い、1回目のTD(TD1)候補点とMASCOT投下候補点の選定を行う必要がある。これら一連の着陸候補地点選定の過程をLanding Site Selection(LSS)と呼ぶ。このような極めてタイトなスケジュール(評価に必要なデータが全てダウンリンクされ、機器チームの手元に揃ってから結論を出すまでの猶予は数日程度!)の中で確実にLSSプロセスを進めるため、はやぶさ2プロジェクトでは、データ解析のプロセスと体制の確認、作業時間の見積り、ツール群のI/F確認等を目的として大規模なLSS訓練を2017年度晩春から盛夏にかけ実施した。本稿では訓練の概要についてまとめる。

2. LSS訓練準備

「はやぶさ2」におけるLSS訓練の特徴は、仮想小惑星(以下Ryugoid)モデルを作成し、「はやぶさ2」に搭載された各種の観測装置によるRyugoidの観測で得られた仮想データの解析という形で、LSSにおけるデータ解析・選定プロセスをほぼ全て実施している点である。つまり、我々はリュウグウ探査に先立ってRyugoid探査を実施し、LSSプロセスの訓練・検証を行ったわけである。その為、訓練実施に先立ち、2016年8月より模擬データ作成チーム(LSSDP)、データ解

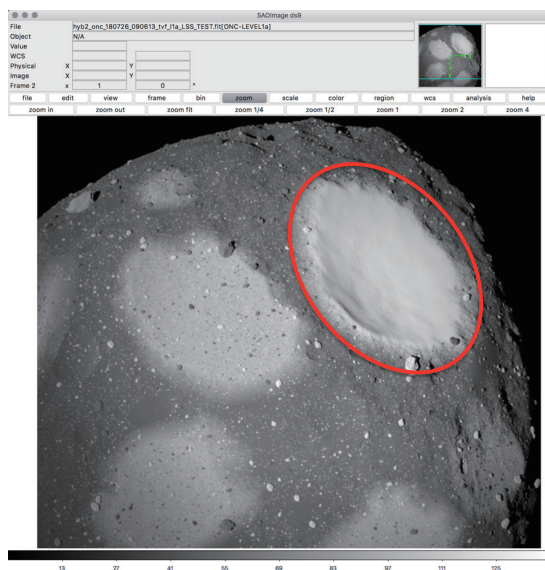


図3：光学航法カメラ(ONC)による安全性(ボルダー数)調査の例。この例では精円で囲われた白くスムーズなクレータ様の地域(Zone Bに相当)に直径3mを超えるボルダーはないと評価された。

析・検討チーム(LSSAA)に別れ、訓練本番に向けての準備が開始された。

LSSDPチームは約3.69億ポリゴンから成る非常に高精細な形状モデルを作成し、その上に仮想形成史コンテキスト(母天体での水質変性・熱変性、さらには母天体の破壊と再集積によるRyugoid形成など)と隕石分光データに基づく地質分布(粒径や宇宙風化の影響などは別途考慮して付与)、熱物性分布、クレータやボルダーを配置したRyugoidを作成した。さらにそれを「はやぶさ2」搭載の観測装置で観測した場合の模擬観測データを作成するツール群を準備した。

LSSAAチームでは、科学評価に必要な項目を網羅すべくLSSで使用するデータプロダクト(LSSプロダクト)と科学評価フローを定義し、作成ツールの開発・パイプライン化、依存関係のあるプロダクト間でのI/F確認、作業体制と手順の確認などを進めるとともに、各機器チームの作成するLSSプロダクトのチーム内共有・交換に用いる専用データディレクトリ等のインフラを作成した。

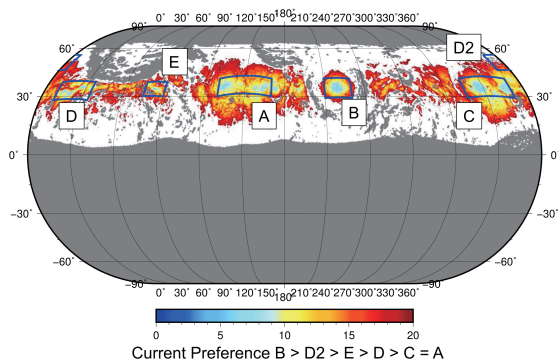


図4：システム側解析による安全スコアと候補領域。

3. LSS訓練の経過

訓練では、LSSDPチームにより作成された各種の模擬観測データ(ダウンリンクされた生データ相当)が提供され、LSSAAチームは設定された期日までに予定のLSSプロダクト群を作成・解釈し候補地点を選定するという形で行われた。なお本番ではおよそひと月の間に行うことになる作業を、訓練では約3倍に引き伸ばして実施した。そのため、フォーマットを定めた一次報告書という形で記録に残し、プロダクト作成の実作業に要した時間や人的リソースの把握を行なった。また毎週定例会を開いて各機器チームの解析状況の確認や発生した問題の把握・解決・スケジュール調整等を行い、当初LSSプロダクトとしては定義されていなかったプロダクトの作成についても、必要であれば対応するという対処を行なった。

LSSDPから提供される模擬観測データは、実際の「はやぶさ2」のリユグウ近接運用時の観測を模擬し、

- ・高度～20 km付近に設置されたBox Aからの観測
- ・高度5～7 kmに設置されたBox Cからの観測
- ・高度5 km付近に精密軌道制御された探査機からの中高度観測

の3種類の観測が設定され、実際のサイエンス観測運用のタイムラインと同様に作成された各観測機器の観測シーケンスに基づいて観測データが作成された。また探査機の位置・姿勢等についても、想定される誤差が付与されたのちLSSAAへ提供された。

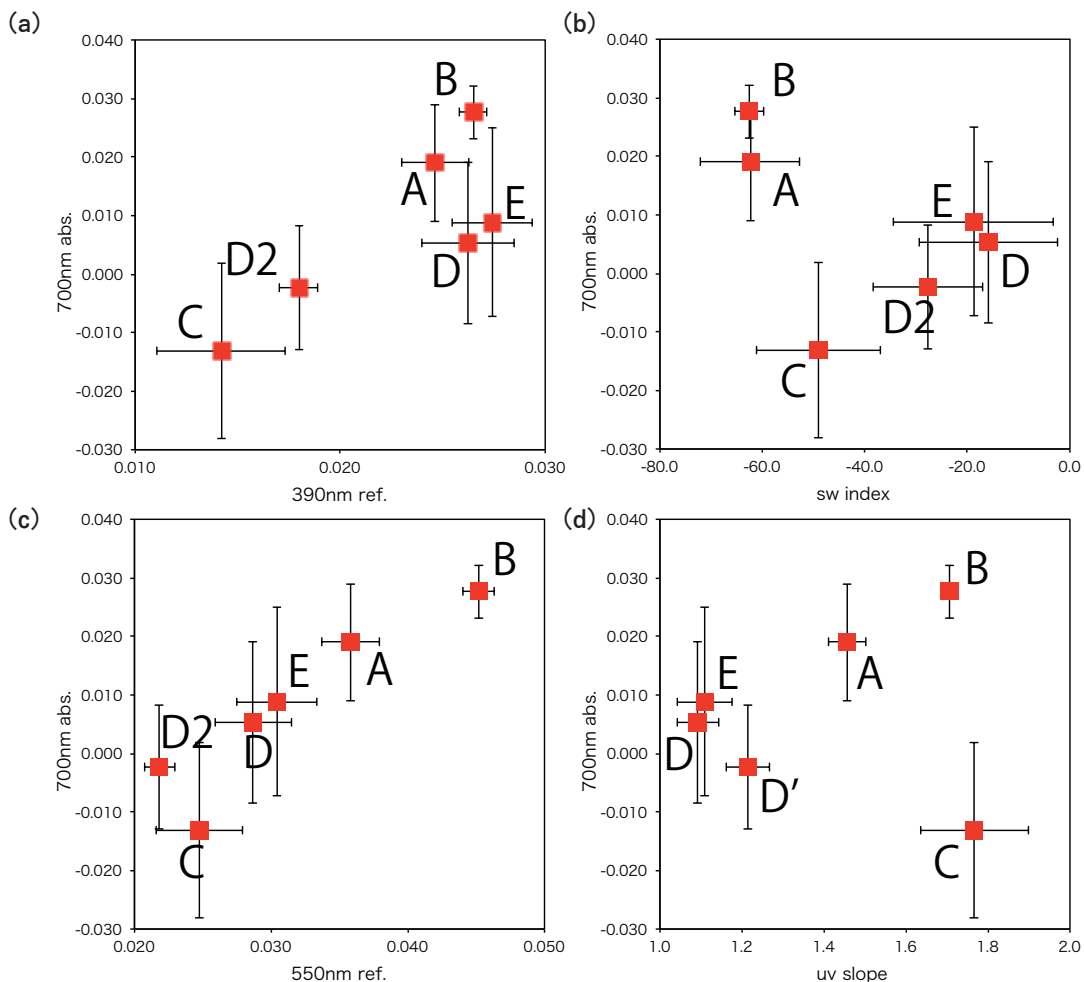


図5：TD1候補ゾーンのONC各種評価指標の比較：縦軸は共通で700 nmの吸収深さ（深い方が正）横軸は (a) 390 nm絶対反射率, (b) 宇宙風化度指標（注：隕石サブタイプが違う場合、この指標での比較は困難）, (c) 550 nm絶対反射率, (d) 紫外領域勾配。

表1：TD1ゾーンの科学評価と順位。

Potential LS	Meteorite group	High aqueous alteration	Low thermal alteration	Low space weathering	High total Carbon	High IOM contents	Low Boulder density	Total evaluation
Zone A	CM+dehydrated	○ (high T)	◎	○	△	○	×	
Zone B	CM	◎ (high T)	◎	◎	△	△	◎	1 st candidate
Zone C	CI	○ (low T)	○	△?	◎	○	×	3 rd candidate
Zone D	dehydrated CM?	×	×	×	△	○	×	
Zone D2	dehydrated CM?	×	×	×	◎	◎	○	2 nd candidate
Zone E	dehydrated CM?	×	×	×	△	○	×	

◎ : strong abs	◎ : few	◎ : strong abs	◎ : very low	◎ : very low	◎ : < 500
○ : weaker abs	○ : weak	○ : weak abs	○ : low	○ : low	○ : 500-10000
×		△ : normal	△ : high	△ : high	△ : > 10000
		×	×		

LSSAA チームは、これらのLSSDPから提供された模擬観測データを事前に準備した解析ツールを用いて解析し、形状・自転軸・自転周期を始めとするRyugoidの基礎的な情報を始めとして、多様なLSSプロダクト群(例えば図1, 図2など)を作成し、Ryugoid表層物質の同定並びにボルダー密度調査等の安全評価(図3)を実施した。さらにはLSSデータから読み取れるRyugoidの進化の推定を行い、LSS本番と同様にサンプリング候補地点及び評価結果を英文で科学評価書としてまとめプロジェクトに提出している。今回の訓練では、システム側の運用安全評価の結果残った6候補地点(図4)についてONC評価批評(図5)などをもとに科学面の評価を行なった結果、Zone Bが第一候補となった(表1)。

4. 訓練の効果(まとめにかえて...)

本稿を執筆している時点でLSS訓練の主要部分は終了し、LSSDP チームから提供されたRyugoidの真値とLSSAAチームの解析結果を比較しての精度検証や、訓練で把握されたデータ解析ツールの問題点等の対処を各チームで進めている。

例えば小惑星の自転軸・自転周期や探査機の精密な軌道は、形状モデルチームがONC画像から小惑星形状を復元するツールとして使用するSPC(stereo photoclonometry) [1]により同時推定される想定であったが、LSS訓練中の作業では想定された精度で推定出来ていないことが明らかとなった。これはツールの使い方の習熟が足りなかったためであったことがわかり、ツール開発元に問い合わせた問題解決を図っている。また、本訓練を通じてSPC処理で十分な精度の探査機精密軌道が得られなかった場合の対策が講じられ、LSS本番に向けてのデータ処理のロバストネスが向上した。さらに、ツールへの習熟不足だけでなく、短時間で簡便にデータ処理を行う必要があるために採用された解析法自身の限界が訓練で明らかとなった点も複数あり、これらについてはLSSの限られた時間内でより精度の出る解析を行うべく手法の見直しを進めている。

これらは実際にRyugoidという模擬小惑星を作成し、擬似的な小惑星探査を実施するという大規模なLSS訓練を行ったからこそ事前に把握出来た点である。もし、

今回のLSS訓練を行わずに来年のLSS本番を迎えていたら、今回LSS訓練で遭遇したツールや解析法の不具合に初めて遭遇した可能性が高く、その事態を想像すると肝が冷える思いである。

最後に、「はやぶさ2」に続いて、火星衛星サンプルリターン計画(MMX)では火星衛星フォボスからのサンプルリターンが計画されている。フォボスはNASAやESAの火星周回探査機により撮像されたデータがあるため、「はやぶさ2」程は事前情報がない中で短時間でのサンプリングサイト決定を求められるわけではない、しかし解析ツール群への習熟や体制の確認などを含め、今回「はやぶさ2」で行ったようなLSS訓練を実施し、実運用・解析・各種判断への備えを万全とすることが望ましいだろう。

参考文献

- [1] Gaskell, R. W. et al., 2008, Meteoritics and Planetary Science 43, 1049.