

火の鳥「はやぶさ」未来編 その1 ～小惑星探査からの惑星科学～

渡邊 誠一郎¹，はやぶさ2プロジェクトチーム

(要旨)「はやぶさ」後継機としてC型小惑星をめざす「はやぶさ2」は開発の山場を迎えている。初期太陽系の記憶を留め、物質混合の指標に富む始原天体の試料を持ち帰り、鉱物-水-有機物相互作用による物質進化の多様性を実証し、地球への物質供給の様態を解明する。さらに宇宙衝突実験を行って微小重力瓦礫天体(微惑星アナログ)の物理特性を調べ、地下の物質を回収をも試みる。地上観測ではスペクトルも自転軸の向きも不確定な天体である。その天体の素顔をさまざまな装置で観測しつつ、そのデータからリアルタイムで運用オプションを選択し、着地と試料回収を試みる。洗練された技術による自在な運用が、科学成果を最大にする理工一体の探査の姿を連載していく。

今回から始まる小惑星探査機「はやぶさ2」の連載では、日本惑星科学会の皆さんにミッションのイメージを共有してもらうことを目的にしたい。私の「はやぶさ」のイメージは夜空を切り裂く火焰の長い尾、まさに火の鳥である。皆さんはどうだろうか。

手塚治虫の『火の鳥』。その「②未来編」で語られる人類の滅亡。ただ1人残った山之辺マサトは火の鳥から宇宙生命(コスモゾーン)の神秘を明かされ、永遠の生命を与えられる。地球の復活を見守るために...

1. うなぎとはやぶさ

名古屋と言えば「ひつまぶし」。稚魚の不漁で昨夏は蒲焼さの高騰が話題となった。ウナギは孵化するとレプトケファルスと呼ばれる幼生を経てしらすうなぎ(グラスイール)となって日本沿岸に現れ川を遡る。ニホンウナギ(*Anguilla japonica*)の故郷は長い間謎だった。東京大学大気海洋研究所(2010年までは海洋研究所)の塚本勝巳のグループが40年にわたってその謎を追ひ続け、2005年6月には生後2日(ウナギは生まれ

つき耳石を持ち日輪が形成される)の幼生をグアム西方の海底山脈(西マリアナ海嶺南部)[1]で、2009年5月には卵をそのすぐ南の海域[2]で、それぞれ採取することに成功した。近くでは産卵期の親ウナギも捕獲され、ニホンウナギの故郷は解明された(読み物としては、例えば、[3])。

著者(渡邊)は以前、フィリピン海プレートの拡大がニホンウナギの大回遊の起源ではないかという与太話を語ったことがあった[4]。少なくとも、ウナギ属の種分化や幼生を海流に乗せて大量にばらまく拡散戦略の成功は、プレートテクトニクスによる大陸や地峡、海嶺、多島海などの配置変化と密接に結びついていたはずである。地球科学と遺伝子解析からうなぎの年代記が書かれていくことを大いに期待したい。

でも、何でうなぎなのか、はやぶさの話ではないのか。実は両者は私の中では妙に呼応する。地球に接近する多数の小惑星・隕石の楕円軌道と日本に襲来する多数のニホンウナギの回遊環路。小惑星に行ってサンプルで砂粒や塵を採取するサンプルリターンとグアム沖に出かけネットで仔魚や卵を採取するリサーチフィッシング。太陽系環境と放射年代を刻んだ小惑星の粒子と海洋環境を日輪に刻んだウナギの耳石。地球史に影響を与えた隕石の母天体を探る小惑星探査機のフライトと日本文化の一翼を担う食材の誕生地を探る海洋

1. 名古屋大学大学院環境学研究科／宇宙航空研究開発機構はやぶさ2プロジェクト
seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp



図1：小惑星にランデブーするはやぶさ2(©池下章裕)。

調査船のクルーズ。そして、惑星科学と放射年代学から辿る海と生命の歴史と地球科学と分子系統学から遡る海と魚類の進化…

太陽系を回遊する小惑星の群れに切り裂くように飛び込み獲物を捕らえるはやぶさの一撃、イメージは共有してもらえただろうか。え、無理。そういう方は「うなぎ、はやぶさ」でググって欲しい。蒲焼きが太陽電池パネルって…相模原と言えば「はやぶさ重」になるか。閑話休題。

2. はやぶさ2プロジェクトの経緯

小惑星探査機「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の後継機として、地球接近小惑星(Near-Earth Asteroids: NEA)の1つを訪れて、表面物質の地球への持ち帰り(サンプルリターン)をめざしている(図1)。現在のところ、C型小惑星(162173)1999 JU₃を探査対象天体として、2014年後半の打ち上げを目標にタイトなスケジュールで開発が進められている。NEAというのは、地球軌道に接近する小惑星で、もともと小惑星の故郷であるメインベルト(軌道長半径が2.15—3.25 AU)に

あったものが木星など他の惑星の重力摂動によって運ばれたもので、数百万年から数千万年で太陽に飛び込むか、地球などの惑星に衝突するか、あるいは木星軌道以遠に放出されるかの運命にある過渡的な天体である。

はやぶさ2計画は2007年6月にプロジェクト準備審査を経てプリプロジェクトとなっていたものの、本格的な起動は2010年6月のはやぶさ帰還後であった。小惑星サンプルリターン技術実験を行う工学実証ミッションであったはやぶさに対し、はやぶさ2はその技術を使って始原天体からの試料採取をめざすという理学ミッションを持った探査機である。ただし、はやぶさは数々のトラブルに見舞われており、トータルな意味でのサンプルリターン技術が確立できたとは言い難かった。そのため、その技術をより確実なものにし、それを駆使して科学成果を最大限にするような運用を行うことがミッション成功の鍵となる。その意味でまさに工学と理学が一体となって進めるべき探査であることがはやぶさ2ミッションの大きな特徴である。

はやぶさ2プロジェクトにはいくつかの課題があった。まずは非常にタイトな開発スケジュールのもと、

基本設計は初号機を踏襲したものとなり、搭載機器についても初号機から踏襲するものは開発評価モデル(EM)や試作モデル(PM)を制作せずにいきなりフライトモデル(FM)を制作する方式が採られた。初号機制作から10年が経過し、調達／性能の観点から部品等を変更せざるを得ない中で、この方式での開発はリスクを抱えることを意味する。また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の中で、月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC)が担当するミッションであるという形式的な理由から、宇宙科学研究所(ISAS)の宇宙理学委員会において科学的意義などの議論が行われて来なかった。そのため、正統性に疑念が持たれることとなった。さらに、はやぶさ2のサイエンスチームがはやぶさ初号機のグループから惑星科学コミュニティ全体へとなかなか広がらなかった。これはタイトなスケジュールと準同型機ということで理学的観点から搭載機器の工夫ができる自由度が少ないこともあったが、プロジェクト内外でのコミュニケーションの少ないことが主要な原因であった。

こうした状況の下で、2010年9月には惑星科学センター(CPS)が主催した月惑星探査緊急討論会や、2010年日本惑星科学会秋季講演会での議論を踏まえ、2010年11月にはプロジェクトとコミュニティをつなぐ「はやぶさ2から考えるサイエンス研究会」が発足した。そして同研究会の継続的な議論を通じて、2011年末までに搭載機器のサイエンスPIの交替を含む新メンバーのプロジェクト参加によるチーム強化が図られた。

また、2011年10月のISAS宇宙理学委員会でははやぶさ2の集中審議が行われ、同委員会の下にははやぶさ2タスクフォース(TF)〔座長：渡部潤一(国立天文台三鷹)〕が設置された。プロジェクト外の小惑星や惑星物質、惑星形成論の専門家とプロジェクトのサイエンスを中心とするメンバーが参加して、2012年9月までに14回の会合を重ねた。2012年12月のISAS宇宙理学委員会にTF活動総括が報告されたが、そこでは「C型小惑星である1999 JU₃をターゲットとするはやぶさ2の科学の意義は高いものである。それを核にした、様々な宇宙科学分野を巻き込んだ分野横断的な議論の場を作り出していくことは可能であり、そして、そのことが日本において惑星科学だけでなく宇宙科学全体を盛り上げることに繋がると強く確信する。そのた

めに、宇宙理学委員会は、はやぶさ2への積極的関与を今後も続けるべきである。」と述べられている²。

TFの活動と軌を一にして全JAXAでのプロジェクト推進体制の構築が進められ、2012年9月から10月にかけてプロジェクトマネージャとして國中均、サブマネージャとして稲場典康、プロジェクトサイエンティスト(PS)として渡邊誠一郎が就任し、吉川真はミッションマネージャとなるなど、プロジェクトの中核の体制強化が図られた。PSの渡邊はTFの流れを汲んでプロジェクトとコミュニティをつなぐ役割が期待されているが、ミッション経験が無いため、吉川真をはじめ安部正真・田中智・藤本正樹・小林直樹のISASの探査経験者と石黒正晃(ソウル大学)からなるPSチームを中核として、さらに観測機器チームや地上観測チームからのメンバーを加えた統合サイエンスチームを新設して、サイエンスをより強力に推進する体制が2012年のうちに構築された。

3. 小惑星探査の意義

小惑星探査はマイナーな天体を訪れる“おたく”的なミッションであるとの誤解が、主に惑星科学から遠い分野の研究者にあると言う。そもそも1天体だけを訪れる惑星探査は、全天の多くの天体に望遠鏡が向けられる天文観測衛星からすると普遍性に関する疑義が付きまとうらしい。『遊・星・人』の読者のほとんどには釈迦に説法であろうが、小惑星探査の意義について確認しておきたい。一言で言えば「小惑星の科学」ではなく、「小惑星からの惑星科学」を展開することに意義がある。

小惑星探査の第一の意義は小惑星が太陽系最初期の(場合によっては太陽系形成前にも遡る)記憶を留めている可能性があるという点にある。天体表面の単位質量の重力エネルギーは $GM/R \approx G\rho D^2$ (ここで、 G は万有引力定数、 M , R , D , ρ はそれぞれ天体の質量と半径、直径、平均密度)であり、直径1000 kmの天体では、内部エネルギーに換算して200 K程度の温度に、運動エネルギーに換算すると、0.6 km/s程度の速

2. 宇宙科学研究所の理学班員の方なら宇宙理学委員会の議事録・会議資料のページ

<http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/member/siryo.php>の第38回会議資料の中にTF活動総括が掲載されているのでぜひご覧いただきたい。

度に相当する。最大の小惑星ケレス[(1) Ceres]の直径が950 kmであるから、かつてより大きな母天体を構成していなかったとすれば、集積によって融解や強い熱変成を受けた可能性は低いと考えられる(ただし、軌道離心率は大きいため、数km/s程度の衝突を経験し、局所的な熱変成を受けた可能性は残る)。一方でベスタ[(4) Vesta]のように平均直径が525 kmしかなくとも融解を経験したと考えられる天体があり、 ^{26}Al のような短寿命核種が熱源と推定されている。しかし、 ^{26}Al が熱源として有効なのは太陽系最初期の物質であるCaやAlに富む難揮発性包有物(CAI)の形成後数百万年以内であり、太陽系の最初期の分化過程と考えられる。つまり、小惑星は分化しているにせよしていないにせよ、太陽系形成直後の重要な情報を保持している可能性が高い。

特に天体形成後に組織が大きく変質するような高温を経験していない始原天体では、太陽系形成前後の記憶がプレソーラー粒子、CAI、コンドリュールなどの構成粒子毎に刻まれている可能性がある。あるいはガスとの反応や母天体上での熱水が関与した鉱物反応(水質変成)を記録している可能性がある。特に含水鉱物や有機物などの低温物質が壊されずに残っていれば、こうした記憶が保持されている可能性は高い。これは、地球や月のように集積による高温を経験した大きな分化天体からは決して得られない情報である。

小惑星探査の第二の意義は、小惑星メインベルトにちょうど原始太陽系円盤(以下、円盤という)の雪線(snow line)が位置していたため、強い動径方向の組成勾配が期待され、円盤での固体物質の混合過程が記録され得ることである。雪線とは H_2O がそれより内側では昇華し、外側では凝縮するような太陽を囲む境界線である。円盤中にダストが浮遊している間は雪線が地球軌道より内側まで入っていた可能性が指摘されているが、太陽放射が直接円盤中央面にも届くようになると小惑星メインベルト中に位置するようになる。

雪線より内側では固体物質は岩石が主体となるが、外側では氷が主体となり、組成は大きく変化する。さらに有機物の昇華温度や分解温度なども雪線前後に分布するため、有機物組成も大きく変化する。小惑星の表面スペクトルがおおまかには、火星軌道のすぐ外側で高軌道傾斜角のハンガリア族がE型、メインベルトの内側領域でS型、中央でC型、外側領域や木星軌道

にあるトロヤ群でD型と分布しているのは(図2参照)、組成がそれぞれ、還元的で金属に富むエンスタタイトコンドライトタイプ、岩石主体で有機物に乏しい普通コンドライトタイプ、酸化的で有機物に富む炭素質コンドライトタイプ、低温有機物や氷を含むより低温物質(2000年にカナダに落下したTagish Lake隕石などに相当するとの見解もあるが不確定)に対応していると考えられている(例えば、[5])。しかし、個々の天体の中でどの程度組成の不均一があるかは分かっておらず、探査によって、雪線付近での物質混合の程度が解読できると期待される。

小惑星探査の第三の意義は、地球への物質供給、とりわけ水や有機物の供給についての知見を得ることができることにある。地球は水の惑星と言われるが、海洋の地球全体の質量に占める割合 f_s は

$$f_s = \frac{3a_s d_s \rho_s}{R \bar{\rho}} \approx 2.3 \times 10^{-4}$$

に過ぎない。ここで、 R と $\bar{\rho}$ は地球の半径(6.4×10^3 km)と平均密度(5.5×10^3 kg/m³)、 a_s 、 d_s 、 ρ_s は、それぞれ海洋の地表に占める面積比(0.71)、海洋平均深度(3.7 km)、および海水の密度(1.0×10^3 kg/m³)である。地球全体に占める水の割合となると、地表の水の97.5%は海洋にあるが、マントル中には海洋の5—10倍程度の水が蓄えられうる(例えば、[6])。しかし、これを考慮しても地球の水の質量比は0.1%程度に過ぎず非常に小さい。地球のマントル中には強親鉄元素(白金族元素など鉄と親和性が強くコア形成によってマントルから取り除かれる元素)が過剰に存在していて、地球集積の最終ステージで付け加えられたとするレイトベニア(late veneer)仮説が提唱されている(例えば、[7])。これに従えば、例え、主要な集積時の材料物質に水がまったく入ってなくても、数%の炭素質コンドライト物質(含水量: 1—10%)のレイトベニアが付け加えられれば、地球の水の量は説明できる。

一方で、エンスタタイトコンドライトや普通コンドライトにも地球と同程度かそれ以上の水が含まれているため、それらから地球ができたとしても水の量にただちに問題がある訳ではない。さらに円盤ガスのもとで地球が成長したなら、水素分子を主成分とする分厚い大気が地表を覆うため、 H_2 の酸化によって H_2O ができた可能性が高い(例えば、[8])。このように地球の水の起源には不確実性が多いため、小惑星の含水量や

水の中の水素同位体比(D/H比)を調べることで重要である。特に、含水量の表面分布や鉛直方向変化を定量的に押さえることで天体スケールでの平均含水率を推定できれば意義深い。

有機物に関しては、母天体上での鉱物-水-有機物相互作用の解明が鍵となる。生命起源物質は低分子からボトムアップで合成された(ストレッカー反応など)のか、複雑な高分子が初生的に生じた後、加水分解によって形成された(フィッシャー・トロプシュ型反応など)のか議論がある[9]。隕石に比べ大気圏突入による熱変成や地球物質による汚染がずっと少ないリターンサンプルの分析によって、宇宙における有機物進化の本格的な解明が可能となる。隕石の有機物分析は、鏡像分子の非対称性と水質変成の関係³[9]など興味深いテーマが数多くあるが、無機物分析に比べてまだまだ系統的な研究が進んでいない。特に組織を見ながら、有機物と鉱物の関係を解析することはほとんどなされていない。サンプルが地上にもたらされる2020年までに有機物の総合的な分析の技術開発を戦略的に進めることが重要である。

小惑星探査の第四の意義は、惑星成長の衝突過程を明らかにする天然の物証を探ることにある。小惑星には、イトカワのように岩塊や砂が弱い重力により集まった瓦礫天体(rubble-pile天体)が多く存在すると考えられている。こうした微小重力瓦礫天体は惑星成長のもととなった微惑星のアナログ天体とみなすことができる。破壊過程を取り入れた惑星成長過程の研究がようやく本格的に行われるようになった(例えば、[10])が、その理解を進展させるには微惑星の衝突に対する振る舞いを知ることが不可欠である。小惑星に対する大規模衝突実験はその有力な手段である[11]。さらに天体表面に残されたクレーターや岩塊のサイズ分布、回収試料の衝撃変成の様子や年代などを分析することで小惑星の衝突過程を明らかにすることができる。

4. 探査対象天体 1999 JU₃

はやぶさ2の探査対象天体である1999 JU₃は、1999

年5月10日に米国のリンカーン地球接近小惑星探査(LINEAR)プロジェクトによって発見された。その後、確定番号162173が付いている。1999 JU₃の軌道要素を示したものが表1である。 $a > 1.0$ AU, $q < 1.017$ AUであるので1999 JU₃はアポロ型軌道(地球軌道と交差し、主に地球軌道の外側にある。)のNEAである。

表1：小惑星(162173)1999 JU₃の軌道要素。

軌道要素	記号	値	備考
軌道長半径	a	1.18953 AU	
軌道離心率	e	0.19026	
軌道傾斜角	i	5.88404°	対黄道面
近日点引数	ω	211.423°	
昇交点経度	Ω	251.617°	
平均近点角	M	226.571°	
近日点距離	q	0.96321 AU	$=a(1-e)$
遠日点距離	Q	1.41585 AU	$=a(1+e)$
公転周期	T	473.875 day	1.30年

(注) JPLのWebより引用。元期は2012年9月30日。

1999 JU₃については、はやぶさ2の探査候補に選ばれた後、2007年から2008年にかけて観測キャンペーンが行われ(例えば、[12])、また、2012年にも追加の観測が行われた。それらの観測に基づいて決められた主な物理パラメータは、自転周期7.63時間、直径0.8 km、幾何アルベド0.06である。形状はほぼ球形であるため、自転軸の向きを小惑星の変光曲線(ライトカーブ)から決めることが難しい。石黒正晃らが中心となった国際的なチームによる自転軸向きの解析が行われているが、現在のところ確定はできていない。

1999 JU₃の可視波長域での反射スペクトルの分光観測は、いくつか行われており、C型であることはほぼ確実だが、より細かい特徴を議論するためには信頼性が乏しい。さらに観測時期によって結果には違いがあり、中には0.65 μ m近傍に吸収帯(事実なら含水鉱物の存在を示唆する)と解釈できる凹みが見られる観測データもある(例えば、[12])。このスペクトルの差異は観測誤差に起因する見かけのものである可能性も否定できないが、天体表面に複数の異なる物質に覆われた領域が存在し、観測位相によって反射スペクトルが変化した可能性も指摘されている。

近赤外波長域の観測では1 μ m帯や2 μ m帯の吸収を持たずかつ緩やかな右上がりの連続成分を持つスペク

3. Murchison隕石中の非タンパク性のアミノ酸イソバリンの右と左の鏡像異性体(D体、L体)の偏りに不均質があり、イソバリン／アラニン比と蛇紋石／カンラン石比の間には正の相関がある。蛇紋石はカンラン石の水質変成で生成される含水鉱物である。

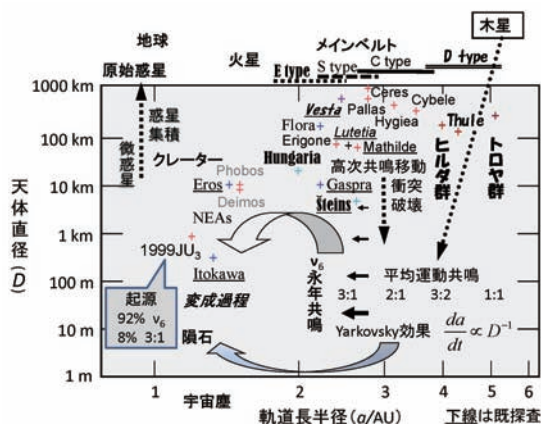


図2：小惑星メインベルトからの物質輸送過程。

トルという典型的なC型の反射スペクトルが得られている。中間赤外波長域の測光データからは、前述の天体の直径や幾何アルベドが求められている他、熱慣性が数百程度であるとされている。これは厚いレゴリス層を持つ月や大型小惑星 ($50 \text{ J/m}^2/\text{s}^{1/2}/\text{K}$ 程度) とレゴリス層が少なく礫に覆われたイトカワ ($750 \text{ J/m}^2/\text{s}^{1/2}/\text{K}$) の中間的な値となっている。ここで熱慣性 Γ とは、日変化に伴う小惑星の単位面積当たりの実効的な熱容量が $\Gamma \omega^{-1/2}$ (ただし、 ω は小惑星の自転角速度) で与えられるような量で、 $\Gamma = (\rho C_p k)^{1/2}$ と書ける (ρ , C_p , k はそれぞれ、表面物質の密度、単位質量当たりの定圧熱容量、熱伝導率である)。

1999 JU₃ の起源を考えるために、小惑星メインベルトからの物質供給について図2に従って説明しよう。軌道長半径と天体直径の平面に主な小惑星をプロットしたものである。小惑星名のフォントによってスペクトル型の違いを表している。ただし、(4) Vesta はV型、(21) Lutetia はM型である。メインベルトではおおまかに見れば、内側からE型、S型、C型と分布し、一番外側にD型が分布するが、分布にはかなり重なりがある。火星の衛星である、Phobos と Deimos は小惑星を捕獲したものと考えられているが、ともにC型もしくはD型である。

小惑星メインベルトでは小惑星どうしの衝突によって破片が生成される。破片のうち10 km よりも小さいものはYarkovsky効果によって軌道角運動量 (a) が変化して動径方向に移動する。Yarkovsky効果というのは小惑星のもつ熱慣性によって、天体表面温度が最高

となり表面熱輻射が最大となる方向が太陽方向からずれるため、公転方向のトルクが生じて公転角運動量すなわち a が変化する効果である。自転軸が公転面に垂直な場合、自転方向が順行または逆行に対して a は増大または減少する (日効果)。自転軸が横倒しの場合は、自転方向によらず a は減少する (年効果)。中間的な場合、両効果が重なるが、日効果の方が卓越する場合が多い。そのため、衝突によって生成された破片は動径方向に広がる。その動径移動速度は天体直径に反比例して、小さいものほど速く移動する。

Yarkovsky効果によって、動径方向に移動した破片は、平均運動共鳴 (小惑星の公転周期と摂動天体の公転周期が簡単な整数比となる軌道長半径での共鳴) や永年共鳴 (小惑星軌道の近日点方向や昇交点方向の回転角速度と惑星系の対応する固有角振動数が一致することでの共鳴、例えば [13]) の位置に到達すると、離心率が増大し、火星や地球の軌道と交差するようになる。地球軌道付近に小惑星を供給する共鳴としては、メインベルトの内側領域にある3:1の平均運動共鳴 (2.50 AU) と v_6 永年共鳴 (小惑星の近日点移動角速度が土星のそれと一致する共鳴、軌道傾斜角が0なら2.15 AU) が重要である。ただし、非常に小さい破片小惑星はYarkovsky効果による移動速度が速すぎて、共鳴をすり抜けて地球周辺に供給される可能性がある。こうしたサイズによる違いは地球にもたらされる物質供給過程を考える上で重要である。

地球近傍小惑星 (NEA) はこのようなメカニズムでメインベルトから供給された破片小惑星であると考えられる。火星や地球などの惑星との相互作用で、遠日点距離が小さくなりメインベルトから切り離され、より小さい軌道長半径を取るものが生まれる。はやぶさ2の探査対象天体である1999 JU₃ はそのような小惑星の1つである。軌道進化の計算から、1999 JU₃ は v_6 永年共鳴によって、小惑星メインベルト内側領域からもたらされたと推定されている。実はメインベルト内側の低軌道傾斜角領域にはErigone族と呼ばれるC型のスペクトル型を持つ衝突族があり、数億年前に起こったと推定される衝突破壊によって生じた多くの破片小惑星がメンバーとして同定されている [14]。前述のYarkovsky効果によって、1 km サイズの逆行自転の破片であれば、0.2 AUほど内側に移動して v_6 永年共鳴領域に供給され得ることがわかっている。

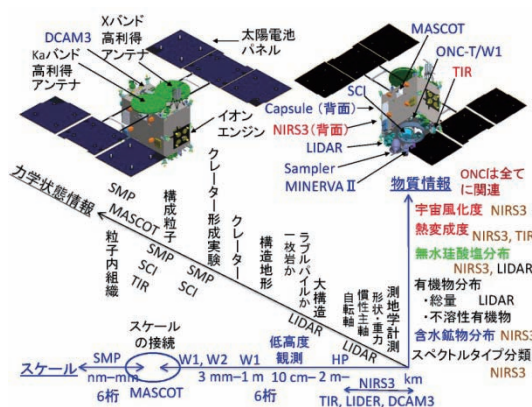


図3: はやぶさ2の搭載機器と機器間の連携(杉田精司・ONCチームの原図を改変)。搭載機器の略号については本文参照。

実は地上観測で得られた1999 JU₃の可視・近赤外波長域のスペクトルは、Erigone族の最大小惑星である(163) Erigoneのスペクトルと類似している。こうした状況証拠から1999 JU₃はErigone族の破片小惑星の1つとして生成され、数億年をかけて v_6 永年共鳴領域に運ばれて離心率が上昇し、やがて地球と近接遭遇し、NEAとなったという仮説が成り立ち得る。はやぶさ2による探査は、まさにこうした地上からの観測だけでは決着がつかない仮説に対して、リモートセンシングやリターンサンプル分析を通じて、新たな知見や年代軸を導入することで、検証を可能とし、天体の起源を明らかにできると期待される。

5. 搭載機器

ごく簡単にサイエンスに関する搭載機器を紹介する(図3)。探査機が小惑星に到着し全球観測をするホームポジション(HP)は高度20 kmとされているので、以下その数値を用いる。

近赤外分光計(NIRS3)は有効口径30 mm, F1.0の集光部に回折格子を組み合わせた光学系に, 128画素のInAs フォトダイオードリニアアレイセンサーを組み合わせた分光計で, 波長1.8—3.2 μm を波長分散30 nm/pixel以下で分光する. 視野全角は0.1°でHPでの分解能は35 mで, 表面を一点一点分光していく. 受動冷却により185 K程度のセンサー温度を実現して, S/N > 50を達成する. 検出をめざす主な吸収帯としては, 2.7 μm のOH基の伸縮振動と2.9—3.0 μm のH₂O



図4：小型搭載型衝突装置によるクレーター形成実験
(©池下章裕).

の変角振動であり，含水率や含水鉱物種が天体表面でどの程度変化するか情報が得られる．これは試料採取を行う着地点を決めるにも最重要の情報である．

中間赤外カメラ(TIR)はフィルタにより制限された波長8—12 μm の光を画素320 $\times$ 240, 視野角16 $^{\circ}$ $\times$ 12 $^{\circ}$ の2次元非冷却ボロメータ(受光した感熱素子の温度変化を抵抗値変化から検出する赤外線検知素子)により撮像する装置である。解像度はHPで17 mである。金星大気探査機「あかつき」に搭載されたLIRを利用している。小惑星の表面温度を相対精度0.3 K, 絶対精度3 Kで測定し、自転温度変化から表面の熱慣性分布を20%程度の精度で決めることを目標としている。熱慣性の値は表面状態(岩塊存在度や砂層粒径など)を推定するのに使える。また、TIRの観測はYarkovsky効果などの実証に必要なデータを与える。

光学航法カメラ(ONC)は探査機の姿勢軌道制御用バス機器であるが、特に望遠カメラ(ONC-T)はフィルタ分光によるマルチバンド可視光カメラとして理学目的に使用される。1024×1024のCCDで、0.39 μm , 0.48 μm , 0.55 μm , 0.70 μm , 0.86 μm , 0.95 μm の6バンドのフィルタおよびNa D線検出用の589.5 nm狭帯域フィルタを持つ。HPでの解像度は2 m/pixelである。天体形状モデルの基本データを与え、表面状態の把握や履歴解析、含水鉱物や有機物等の物質や宇宙風化の表面分布が得られると期待される。なお広角カメラ(ONC-W1)は着地前後において高解像度(分解能1 cm/pixel以下)の着地点付近の撮像が期待され、回収試料の産状記載の上で重要である。

レーザ高度計(LIDAR)もまた姿勢軌道制御用バス機器であるが、理学目的にも使用される。小惑星に対してレーザ光パルス照射し、表面からの反射光パルスが戻ってくるまでの時間を計測して小惑星表面までの距離を決める装置である。ONCと組み合わせての小惑星形状モデルの作成や内部空隙率の推定、自由落下運用による重力計測などが重要な任務である。また表面ラフネスの測定やレーザ波長(1064 nm)での小惑星表面の幾何アルベドの測定、小惑星周辺空間の浮遊ダストの検出などが行われる。

はやぶさ2は打ち上げ後、宇宙空間で円錐+円筒状のサンブラホーン(金属製の固定ホーンと伸展ホーンの間をベクトラン製の布ホーンで接続)を伸展する。サンブラ(SMP)は、小惑星の着地時にサンブラホーンが接地した状態でTaの弾丸を発射し、イジェクタとして上方に放出された粒子をキャッチャーに捕らえるように設計されている。うまくいけば3回のサンプル確保が可能のように設計されている。また、伸展ホーン部先端は折り返しがつけられていて、小惑星からの離脱時に一時的に減速することで折り返しにたまった粒子をキャッチャーの方に送り込んで試料捕獲量を増やす工夫がなされている。キャッチャーは再突入カプセルに収納されメタルシールされる。リターンサンプルの分析のサイエンスについては、今後の連載で詳しく述べることでここでは触れない。

小型搭載型衝突装置(SCI)は質量2 kgの銅のライナがPBX爆薬の爆轟によって加速成形され、半球殻状となって約2 km/sで小惑星表面に衝突する(図4)。爆薬の爆発の際、構造物が四散するため、事前にSCIを切り離し、母船を小惑星の陰に退避させた後に爆発させる。衝突のリアルタイムでの観測をするために退避の途中で分離カメラ(DCAM3)を切り離し、これによって衝突による放出物の撮像を行う。これによって衝突位置が制約できるとともに、衝突地点の表面構造や衝突のスケーリング則に関する知見が得られると期待されている。衝突破片が収まるのを待って、母船は生成クレーターを探索し、ONC、NIRS3、TIRによるクレーターの撮影を行い、地下物質や表層地下構造に関する情報を得る予定である。可能であれば、クレーター放出物に覆われた表面に着地し、サンプリングを試みる。これによって地下物質の試料回収をして、小惑星表面の鉛直構造に関する知見を深めたいと考えてい

る。

小型ランダムASCOTはドイツ航空宇宙センター(DLR)が中心となってフランス国立宇宙研究センター(CNES)が協力して開発している小惑星表面をホッピングにより移動できる小型着陸機である。搭載機器としては多色広角カメラ(CAM)、多波長熱放射計(MARA)、磁力計(MAG)、分光顕微鏡(MicrOmega、分解能20 μm 、観測波長0.9—3.5 μm)がある。母船から切り離された直後から撮像を開始し、着地後も観測を進め、2回のホッピングで向きを変えて観測を続ける。ASCOTはリモートセンシング(1 km—1 cm)とリターンサンプル分析(1 mm—100 nm)のスケールギャップをつなぐ位置を占めるため非常に重要である。また、小型ローバMINERVA-II(複数台)も搭載される予定である。

現在、はやぶさ2は開発の山場を迎えており、システム機械環境サーベイ試験(図5)に続いて搭載機器をつなぎシステムとしてのインターフェース上の問題を把握することを主目的とする一次噛み合わせ試験に臨んでいる。

6. ミッションシナリオ

小惑星探査には、地上観測で事前に得られる探査対象天体情報がきわめて限られているという本質的な困難がある。そのため、小惑星に近づくアプローチフェーズと小惑星にランデブーするミッションフェーズにおいて、「その場」観測を実施し、運用に必要な天体の各種物理/光学情報を獲得し、その情報(および不定性)に応じて、その後の運用をダイナミックに切り替えていく必要がある。よって、事前のミッションシナリオは不確定性の大きな小惑星質量、自転軸の向き、表面温度分布、地形、地表面状態などについて想定し得る複数のモデルを用意し、各モデル(の組み合わせ)に応じた運用シナリオのオプションをあらかじめ用意しておくことが求められる。これらの運用シナリオ・オプションの総体をミッションシナリオと呼ぶべきである。

1999 JU₃の自転軸の向きは今のところわかっていない。探査機は基本的には小惑星と地球を結ぶ線上に位置する。このため、仮に自転軸が横倒しであった場合、極上空にあって半球のみが観測できる時期と、赤道上



図5：システム機械環境サーベイ試験に臨むはやぶさ2
(©JAXA).

にあって自転に伴いほぼ全球が観測できる時期が概ね1/4公転周期(約4ヶ月弱)毎に繰り返される。こうした状況において、全球リモートセンシングと着地点選定、リハーサル降下などを経て着地することはスケジュール的にかなりきついため、綿密な運用計画が必要である。

はやぶさ2ミッションは、リアルタイムの判断に基づく運用の精確さが科学成果の質を大きく左右する。工学的制約と理学的要望がせめぎあう中で、次々と難しい決断をしていかねばならない。ミッションシナリオを共有し、理工一体で推進することが必須の探査なのである。なお、的確で迅速な判断を行うにはデータ通信量の確保が最重要であり、臼田の64 mアンテナの後継問題ともからんで、Kaバンドが活用できる体制の構築が望ましい。

はやぶさ2の搭載機器のフライトモデル(FM)はほぼできあがりつつあるが、ミッションシナリオに関してはこれから詰めていく必要がある。サイエンスの成果をより高めるために学会セッションや研究会などを企画していくので、皆さんからもぜひ様々な提案やアイデアをいただければと思っている。

「はやぶさ」の大気圏再突入。その燃えさかる体にわずかに先行して、卵のような再突入カプセルがオレンジ色の弧を描いてオーストラリアの大地に吸い込まれていった。中にはイトカワの正体を明らかにする小さくも貴重なサンプルが格納されていた。それはまさに、太古から繰り返し地球に降り続く小惑星の無数のかけら、海や生命の材料をもたらしただろうかもしれない天

からの贈り物を象徴するシーンのものであった。この鮮烈な光景を脳裏に焼き付け、われわれは次の願いをかなえる努力を進めている。「はやぶさよ、さあ、再び舞い上がり、賢者の石を抱いて火の鳥となれ。」

マサトは孤独に耐えかね一人さまよい歩く。彼はまだ知らない。夜空に美しい光芒の引いて赤茶けた大地に落ちた火の鳥「はやぶさ」のかけらから、再び生命の歩みが始まろうとしていることを。気の遠くなるような長い長い年月をかけて繰り返されようとしている輪廻...

つづく

謝 辞

本連載を提案いただいたはしもとじょーじ編集委員長に感謝申し上げます。また、忙しい中で原稿を精読いただき、いくつもの不備を指摘いただいたプロジェクトメンバーの方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Tsukamoto, K., 2006, Nature 439, 929.
- [2] Tsukamoto, K. et al., 2011, Nature Commun. 2:179.
- [3] 塚本勝巳, 2012, 世界で一番詳しいウナギの話(飛鳥新社ポピュラーサイエンス)。
- [4] 渡邊誠一郎, 2006, 理フィロソフィア10(名古屋大学理学部・理学研究科広報誌)8.
- [5] 廣井孝弘, 杉田精司, 2010, 遊・星・人 19(1), 36.
- [6] 岩森光, 2007, 地学雑誌 116, 174.
- [7] O'Neill, H. St. C. and Palme, H., 1998, in The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution (Cambridge Univ. Press), 3.
- [8] 生駒大洋, 玄田英典, 2007, 地学雑誌 116, 196.
- [9] 高野淑識, 大河内直彦, 2010, 遊・星・人 19(4), 254.
- [10] 小林浩, 2011, 遊・星・人 20(4), 317.
- [11] 荒川政彦ほか, 2012, 遊・星・人 21(3), 247.
- [12] 川上恭子ほか, 2010, 遊・星・人 19(1), 4.
- [13] 長沢真樹子, 2008, 遊・星・人 17(4), 223.
- [14] Vokrouhlický, D. et al., 2006, Icarus 182, 118.