

火の鳥「はやぶさ」未来編 その37 ～次世代小天体サンプルリターンミッションの 実現に向けて～

黒川 宏之¹, 鳶生 有理², 佐伯 孝尚², 坂谷 尚哉², 深井 稜汰², 岡田 達明², 癸生川 陽子³, 青木 順⁴, 熊本 篤志⁵, 川村 太一⁶, 田中 智², 浦川 聖太郎⁷, 巽 瑛理⁸, 末次 竜⁹, 千秋 博紀¹⁰, 石崎 拓也², 菅原 春菜², 湯本 航生^{2,11}, 高尾 勇輝¹², 菊地 翔太¹³, 森 治², 津田 雄一²,
次世代小天体サンプルリターンワーキンググループ

(要旨) 次世代小天体サンプルリターン(NGSR)ミッションは、軌道間輸送機(OTV)と着陸機から成る2機構成の探査機システムにより、火星軌道以遠の小天体からのサンプルリターンを実現し、太陽系創生の解明に迫る探査計画である。NGSRは、2026年5月に開催された宇宙理工学委員会において、MMXに続く2030年代前半の戦略的中型計画として宇宙科学研究所に推薦され、プロジェクト化を目指すこととなった。一方で、ミッションを取り巻く状況の不定性を受け、ワーキンググループでは彗星・D型小惑星・E型小惑星という複数の目標天体とそれぞれに対応するミッション内容・サイエンス目標について検討を進めてきた。本稿では、そうした経緯と最新の検討状況を報告する。

1. はじめに

1.1 小天体探査の発展: 理学の視点

はやぶさ、はやぶさ2、そしてMMXへと続いてきた日本の小天体探査は、太陽系の物質を地球に持ち帰り、地上の最先端分析によってその成り立ちを調べるという、サンプルリターン探査の大きな流れを作ってきた。はやぶさはS型小惑星イトカワがラブルパイル天体であること、普通コンドライト隕石と小惑星とのつながりを明らかにした[1,2]。はやぶさ2はC型小惑星リュウグウから試料を回収し、始原天体に

おける水と有機物の存在量と形態、そして外側太陽系に由来する小天体に関する理解を大きく前進させた[3-9]。MMXは火星衛星フォボスからのサンプルリターンを目指しており、火星衛星の起源と火星圏の進化、そして太陽系における外から内への物質移動について、その「受け手」の視点から新たな理解を与えることが期待されている[10]。

では、その次に私たちはどこへ向かうべきだろうか。一つの方向は、太陽系のより遠方を起源とする天体、あるいは太陽系形成以前からの記録をよりよく保持している可能性のある天体へ向かうことである。リュウグウ試料は、始原的な太陽系物質の理解を大きく進めたが、母天体における水質変成がその記録を書き換えたこともわかっている。太陽系には、より低温の環境で形成し保存されてきた天体、さらには太陽系形成以前の星間物質や分子雲環境の情報をとどめている天体が残されている。こうした天体の物質を実験室で分析するとともに、持ち帰ることのできない揮発性物質もその場で分析できれば、太陽系物質の起源、微惑星形成過程、そして惑星系形成に至る物質進化を、これまでとは異なる角度から調べることができる。

もう一つの方向は、内側太陽系を代表する天体へ

1. 東京大学

2. 宇宙航空研究開発機構

3. 東京科学大学

4. 大阪大学

5. 東北大学

6. パリ地球物理研究所

7. 松江工業高等専門学校

8. カナリア天体物理学研究所

9. 大島商船高等専門学校

10. 千葉工業大学

11. パリ天文台

12. 横浜国立大学

13. 国立天文台

hirokokurokawa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

向かうことである。地球型惑星は、内側太陽系に存在した固体物質が集積し、衝突・分化・変成を経験することで形成された。しかし、惑星に取り込まれる前の内側太陽系物質がどのような組成を持ち、どのような進化を経て微惑星・原始惑星・惑星へと至ったのかは、まだ十分には分かっていない。したがって、太陽系の外から内への物質輸送がハビタブル惑星の誕生に必須であったかは未解明である。こうした変遷を経験した天体の歴史を紐解くには、その場探査と帰還試料分析を結集し、母天体の集積進化史に迫る必要がある。

1.2 小天体探査の発展：工学の視点

このような理学的な問いに対して、工学的にも次の段階が求められている。はやぶさは、小惑星へのランデブー、タッチダウン、サンプリング、地球帰還という一連の技術を実証し、世界で初めて小惑星からのサンプルリターンを実現した。はやぶさ2は、より充実した近傍運用、複数回のタッチダウン、人工クレーター形成、地下物質へのアクセス、ローバ・ランダーの展開など、小天体表面での探査能力を大きく広げ

た。MMXでは、火星圏というより遠い重力環境での往復探査、フォボス表面への着陸とサンプリング、そしてサンプルリターンが計画されている。これらの蓄積は、日本が小天体サンプルリターンを継続的に発展させてきたことを示している。

その先にある次世代小天体サンプルリターン(Next Generation Small Body Sample Return; NGSR)では、単に「次の小天体」へ行くだけでなく、より遠方の天体、より難度の高い往復軌道、より自在性の高い小天体近傍運用、そしてその場観測・その場分析・地上試料分析を組み合わせた新しい探査の形を目指す。探査目標の選定は、理学的価値だけでなく、工学的なロードマップと一体となって考える必要がある。さらには、ミッション期間、運用リソース、さらには打上げ機会といったプログラムの条件も当然考慮される。

本稿では、こうした理学・工学の発展を踏まえ、はやぶさ・はやぶさ2・MMXの延長線上にあるNGSRが実現を目指すこと、NGSRが指し示す日本の小天体探査の方向を紹介する。まず、NGSR検討の経緯を簡単に振り返り、次に候補となるミッション案につ

表1. NGSRの目標天体の候補。軌道要素はJPL Small-Body Database にもとづく。各天体の物理量・スペクトル型は [11-20] にもとづく。

候補案	NGSR-C	NGSR-D	NGSR-E
天体名	289P/Blanpain	(162998) 2001 SK162	(4660) Nereus
スペクトル分類	D型的	T/I/Z型	Xe型
直径[km]	0.32	0.8-1.9	0.33
アルベド	-	0.03-0.16	0.55
自転周期[hr]	8.85	68	15.17
近日点距離[au]	0.96	1.01	0.95
遠日点距離[au]	5.13	2.84	2.02
公転周期 [yr]	5.33	2.68	1.8
軌道傾斜角[deg]	5.9	1.7	1.5

いて、ミッション内容と科学目的を整理する。

2. これまでの経緯

2.1 2024年度の戦略的中型探査ミッション提案まで

NGSRの出発点は、はやぶさ・はやぶさ2・MMXに続く次世代のサンプルリターンとして、どのような小天体を目標とすべきかを広く検討することであった。2020年9月から2021年10月にかけて、有志による次世代SR勉強会において、科学的意義、探査の独自性、軌道成立性、技術的發展性などの観点から、候補天体の包括的な検討が行われた。

こうした検討において、理学・工学両面における発展性が強く意識されていた。2022年頃にNGSRを具体的なミッション案として提案していく段階において、親機と子機を組み合わせた探査機構成がノミナル案として提示されていた。この構成では、深宇宙航行、通信、電力、地球帰還などを担う親機と、小天体近傍での着陸・サンプリングを担う子機を分ける。その狙いの一つは、着陸・タッチダウン時に探査機全体を失うリスクを低減することであった。小天体表面への接近や接触は、サンプルリターン探査の中でも特にリスクの高い運用である。親機を安全な距離に保持し、子機が降下とサンプリングを担う構成にすれば、仮に一回の着陸運用に失敗しても、ミッション全体を直ちに失うことを避けられる可能性がある。また、子機を用いることで、複数地点でのサンプリングや、条件の異なる表面への反復的なアクセスもノミナル目標として視野に入る。

この構成には、より遠方の小天体を目指す上での現実的な理由もある。太陽から遠ざかるほど、必要な電力を確保するための太陽電池パドルは大きくなる。大型の太陽電池パドルを備えた探査機本体が、小天体表面に接近し、着陸またはタッチダウンを行うことは、安全性の観点から難しくなる。したがって、NGSRでは、探査機本体が直接着陸するよりも、親機から分離した子機が表面運用を担う構成のほうが、工学的に自然な発展形と考えられる。

このように、NGSRでは、理学的に魅力的な目標天体を探す作業と、親機・子機構成という新しい探査機アーキテクチャをどのように活かすかという検討が並行して進められた。親機・子機構成を採用す

るなら、複数回を前提としたサンプリング、親機・子機を組み合わせた探査、地球帰還を必要としない前提での子機の運用といった新たな探査戦略が可能となる。そのため、目標天体や搭載機器の検討も、この探査機構成によってどのような新しい科学が可能になるか、という観点から進められた。

その後、2022年4月から12月にかけて、太陽系科学GDI¹および日本惑星科学会の「来る10年」第二期検討会との議論を通じて、NGSRが目指すべき理学目標の整理が進められた。この過程で、太陽系のより遠方で形成・保存された天体、揮発性成分や有機物を含む原始的物質、さらには太陽系形成以前の記録にアクセスすることの重要性が改めて認識された。こうした理学的要請と工学的構想の接点として、NGSRのノミナル目標天体には、木星族彗星289P/Blanpainが設定された(表1)。彗星核から試料を持ち帰ることは、科学的にはきわめて魅力的な目標であり、はやぶさ2がC型小惑星リュウグウで拓いた始原天体サンプルリターンを、より低温・遠方の太陽系物質へ拡張するものと位置づけられた。

一方で、この案は工学的・プログラムのには大きな挑戦を伴うものであった。2023年9月から2024年3月にかけて行われた宇宙研執行部との議論では、ミッションの科学的意義とともに、産業界との関係や、ミッション期間の長期化の観点が重要な論点となった。ここで産業界との関係とは、物価高騰や非宇宙科学の宇宙産業界の急速な発展の中、探査機製造の担い手となる産業界との関係において「民間に資する宇宙科学」の観点を従来に増して明示的に追求しなければならない情勢にあった点である。NGSRワーキンググループはこの点に対する対応として、親機を様々なミッションへ活用可能な共用性の高い軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle; OTV)として実現することを提案していたが、その効果や実現性について宇宙研執行部とワーキンググループの間のみならず議論の場をJAXA全体に広げて多岐にわたる検討がなされた。また、長期ミッションであることによる成果創出リスクを低減するため、クルー

¹Groupe de Discussion Intensive の略。宇宙工学・太陽系科学・宇宙物理学の3分野で設定され、理学・工学委員会と宇宙研当該研究系、コミュニティメンバーからなる。戦略的中型ミッション立案の母体となる。2026年にVision Groupとして発展的解散。

ジング期間および小天体近傍運用期間におけるサイエンスを充実させる方策も議論された。

2.2 短期ミッションの検討

このような状況を受けて、2025年4月から2026年1月にかけて、NGSRワーキンググループでは、軌道間輸送機の共用性、経済性の観点でベストバランスとなる設計点を模索する目的で、短期ミッション案の検討を行った。この時期にも、宇宙研内部では、遠方彗星サンプルリターンが長期ミッションとなることへの懸念が継続的に議論されていた。また、宇宙研からは、当初次期中型計画の想定コストは「2020年度物価で400億円」規模という仮の目安が提示されていたが、その後も急激に進行する物価高騰と宇宙産業構造の急激な変化の中、従来のコスト想定やプロジェクトの立ち上げ方では、次期中型計画の立ち上げは難しいという見通しも示されるようになった。目標天体が遠方になればなるほど、ミッション期間・共用性・経済性の観点で不利になる。すなわち、彗星289P/Blanpainをノミナル目標とする当初案は、理工学的意義は大きいものの、そもそもの中型計画立ち上げの観点およびミッション期間の両面で、そのままでは実現に向けたハードルが高いことがより明確になった。

一方で、宇宙戦略基金においては、軌道間輸送機OTVに関する公募が発出されたことは、NGSRにとって注目すべき情勢の変化であった。民間は様々なミッションに供しうる共用性の高い宇宙機の必要性を認識するようになってきており、宇宙戦略基金はそれを後押ししている。この状況下で、宇宙科学ミッションにおいても共用性の高い宇宙機を志向することは、民間と同じ方向を向いて新たな技術開発をしていく良い入口になるであろうと考えられた。すなわち、限られたコストと期間の中で産業界に後押しされる形でNGSRを実現するためには、「共用性の高い宇宙機(=OTV)を用いた短期ミッション」として成立する案を見いだすことが、現実的に取り得るほぼ唯一の解であると考えられるようになった。

ただし、一般論としては共用性を高めることは単純な自由度の増加とは相反する方向性である。共用性を高めるということは、ミッション固有の最適化に自己規制をかけることであり、また事業者の開発方

針をより重視することでもある。そのため、NGSRには、外部で定まるOTVの境界条件を受け入れた上で、目標天体、ペイロード、運用計画を柔軟に組み替えられるシナリオ上のフレキシビリティを確保する必要性が認識されるに至った。

このような背景のもと、太陽系科学GDIからNGSRワーキンググループに対して、短期ミッション案を具体的に検討するよう要請があった。短期ミッション検討では、従来の彗星サンプルリターン案の科学的意義を踏まえつつ、より短い期間で実現可能な目標天体とミッション構成が検討された。候補天体の評価においては、理学的価値だけでなく、軌道成立性、打上げ可能時期、ミッション期間が議論された。その結果、彗星の場合と同様に外側太陽系由来物質へのアクセスという方向性を持つD型小惑星2001 SK162と、内側太陽系由来物質や地球型惑星材料への接続を持つE型小惑星4660 Nereusが、短期ミッションの目標天体の候補として選定された(表1)。

2.3 複数の可能性を内包した現在の

NGSRミッション案

さらに、2026年2月には、戦略的中型計画LiteBIRDの延期を受けて、NGSRの再提案時期が早まる可能性が生じた。一方で、打上げ時期は未確定であり、コストキャップについても厳しい見通しは大きく変わらなかった。そのため、NGSRワーキンググループでは、目標天体、打上げ時期、OTVの利用可能性、コスト上限といった境界条件が完全には定まらない状況に対応する必要がある。

こうした背景から、NGSRは、彗星サンプルリターンを唯一のノミナル案として深める段階から、複数のミッション案を境界条件に応じて比較する段階へと移行した。彗星サンプルリターン案(NGSR-C)は、太陽系のより遠方で形成し始原的情報を記録する天体を目指す長期的かつ挑戦的な案である。D型小惑星案(NGSR-D)は、その科学的方向性を一部継承しつつ、外惑星系の材料物質や初期太陽系の大動乱の起源に迫る案である。E型小惑星案(NGSR-E)は、外側太陽系物質ではなく、内側太陽系物質と地球型惑星の起源に迫る案である。この3つの案は、日本の小天体探査の科学的方向性のバリエーション

も内包している。

そして、2026年5月21日に開催された宇宙理工学委員会では、NGSRが次期中型計画として推薦された。これは、NGSRが、MMXに続く日本の小天体サンプルリターンの有力な候補として位置づけられたことを意味する。ただし、この時点で目標天体やミッション構成が最終決定されたわけではない。現在のNGSRは、次期中型計画としてプリプロジェクト化を目指しつつ、OTVの仕様、コスト上限、打上げ時期といった境界条件に応じて、どのミッション案を採用するのかを詰めていく段階にある。

3. 探査機構成

本節ではNGSRの探査機構成を整理する(図1)。前述の3つのミッション案では基本的な構成を共通としつつ、それぞれの目標天体に応じた仕様の最適化を行う。また、ミッション機器は必須機器群とオプション機器群に分けて整理している。必須機器群は、小天体サンプルリターンにおいて必須または標準的と位置づけられる機器群であるのに対し、オプション機器群は、目標天体やOTV仕様、利用可能な質量・電力・通信リソースに応じて搭載可否を判断する機器群である。ただし、ここでいうオプションとは、科学的な重要度が低いという意味ではない。なお、ここで述べる構成や機器は、現時点での検討案であり、今後のミッション定義や境界条件の具体化に応じて見直される可能性がある。

3.1 パス系

NGSRの基本となるのは、深宇宙航行を担う親機、すなわち軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle; OTV)と、小天体からのサンプリングを担う子機、すなわち着陸機を組み合わせた構成である(図2a)。親機は、打上げ後の深宇宙航行、目標天体へのランデブー、通信、電力供給、姿勢・軌道制御、サンプルリターンカプセルの保持、地球帰還軌道への投入など、ミッション全体を支える役割を持つ。一方、子機は、目標天体近傍で親機から分離され、小天体表面への接近、タッチダウン、サンプリングを行う。採取された試料は子機から親機へ受け渡され、親機側でサンプルリターンカプセルに収納される。

この親機と子機の分離・再結合を伴う深宇宙ランデブードッキングは、NGSRの工学的な特徴の一つである。

この構成の利点は、探査機本体を直接小天体表面へ接触させずに済むことである。遠方天体を目指す場合、親機には大型の太陽電池パドル、通信系、熱制御系、推進系などが必要となる。そのような大型の探査機本体が小天体表面に接近し、着陸またはタッチダウンを行うことは、安全性や姿勢制御の観点から難しくなる。一方、子機が表面運用を担う構成であれば、親機を比較的安全な位置に保持したまま、表面への接近、試料採取、必要に応じた複数回のサンプリングを行うことができる。また、親機と子機を組み合わせることで、同時運用による内部構造探査、一体となっていくサンプリングとその場分析など、新しい小天体探査の形を検討できる。

3.2 ミッション機器

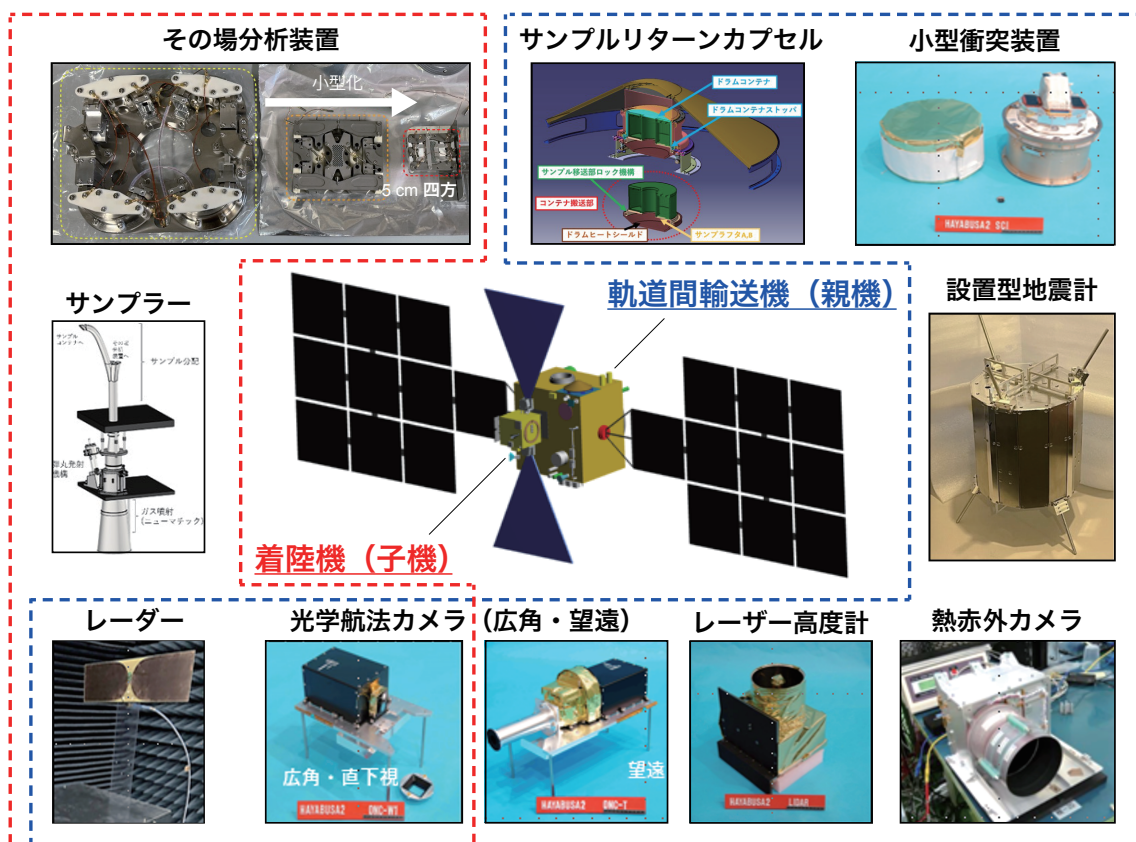
小天体サンプルリターンを実現する基本的な装置群である必須機器群には、サンプラー、サンプルリターンカプセル、光学航法カメラ、LIDAR、熱赤外カメラ、近赤外分光計または近赤外カメラが含まれる。

オプション機器群には、その場分析装置、設置型地震計、バイスタティックレーダー、小型衝突装置が含まれる。特に、その場分析装置、設置型地震計、バイスタティックレーダーはNGSRの探査機構成・サンプリング運用を活かしつつ発展的な小天体探査を実現する重要機器として検討されている。小型衝突装置については、運用リスクとのトレードオフから必須機器と位置づけていないものの、天体の機械的物性の制約や地下物質へのアクセスを実現する重要機器である。

(1) 必須機器群

サンプラーは2つのサンプリング方式およびその併用を検討している。ニューマチック方式では、高圧窒素ガスの噴射により小天体表面の試料を舞い上げ、サンブラホーンで集約する。もう1つははやぶさ2でも採用された弾丸方式のサンプリング機構である。いずれの場合もサンプリング後は帰還用のサンプルコンテナおよびその場分析装置へ分配する。

サンプルリターンカプセルは、薄殻円錐形状ヒート



+ 宇宙物理コミュニティ / 海外機関提供検討：近赤外カメラ，蛍光 X 線検出器，小型ラング，赤外分光計
図1. 探査機とミッション機器の構成.

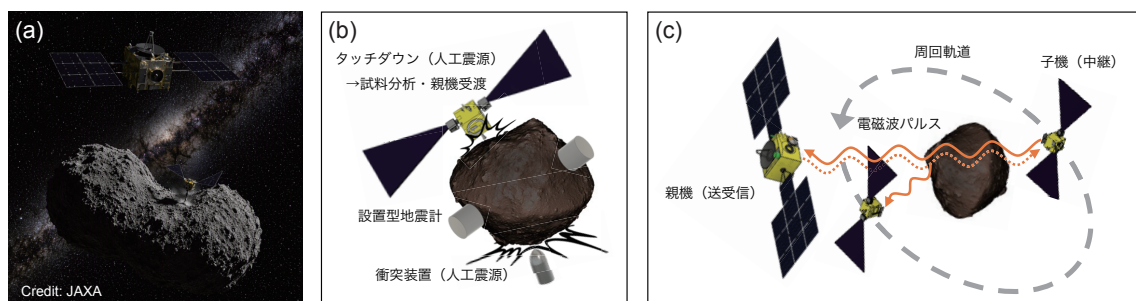


図2. (a) ミッションの概念図 (b) サンプリングおよび人工地震計測運用 (c) バイスタティックレーダー観測運用.

シールド, 受動的衝撃吸収材を採用し, 最大15 km/s級(彗星サンプルリターンの場合)の高速再突入に対応する。大気圏突入速度が異なる目標天体や軌道設計に応じ, 最適化を実施する。

光学航法カメラは, 目標天体への接近時の光学航法, 天体形状・地形の把握, 着陸・サンプリング地点の選定, 表面状態の観測を担う基本機器である。検討案では, 親機搭載カメラは望遠カメラ, 広角カメラ, 電源制御部から構成され, 子機搭載カメラは広角カメラと電源制御部から構成される。望遠カメラにはフィルター分光機能を搭載し, 表面のジオロジーのみでなく, 物質科学的な観点でもサイエンス・サンプル採取地点の選定へ貢献する。また, 長期クルージング中の黄道光観測を実施する予定であり, NGSRミッションの継続的なサイエンスゲインを生む。

レーザー高度計(LIDAR)は, 照射したレーザが目標天体の表面で反射してくるまでの時間を正確に計測することで, 親機または子機と目標天体間の距離を高精度で測定する機器である。接近・降下・タッチダウン運用や探査機軌道の改善を支える工学機器であると同時に, 天体形状, 地形, 重力場推定, 表面粗さの評価にも関わる理学機器である。かぐやLALT, はやぶさLIDAR, はやぶさ2 LIDAR, MMX LIDARのヘリテージを有するが, 観測距離範囲や目標天体の反射率に応じて, レーザの出力エネルギーの調整や受光部の構成の最適化を行う。

熱赤外カメラは, 目標天体表面の温度分布およびその時間変化を測定し, ターゲット小天体の熱慣性を求める。熱慣性は粒径, 空隙率などの表面状態に依存するため, TIRIは物理的な情報をリモートセンシングによって得られる唯一無二の機器である。赤外カメラは日本の小天体探査において, はやぶさ2搭載のTIR, Hera搭載のTIRI, RAMSES搭載のTIRIという形で技術的な発展とともに国際的な評価を得てきた。Hera搭載機以降は赤外分光機能を備え, 物質科学的な観点でも小天体科学に貢献する。NGSRでは, Hera搭載TIRIと同等のカメラをベースとし, 目標天体ごとに最適化した分光フィルターを搭載する。

近赤外分光計または近赤外カメラは, 目標天体表面の反射スペクトルひいては物質分布を調べるための機器候補である。天文観測による小惑星の分類に

おいては可視・近赤外の反射スペクトルが用いられるため, 帰還試料分析前に目標天体の素性を推論するために重要な役割を担う。NGSRにおいては, 宇宙物理コミュニティ提供機器という文脈で検討されており, その仕様は目標天体の観測と宇宙物理的理学目標の両立を念頭に決定される。

(2) オプション機器群

その場分析装置は, 採取試料や表面から放出される揮発性成分を, 地球帰還前に探査機上で分析するための機器である。ガス状分子をイオン源に導入し, 電子衝撃イオン化法でイオン化した後, 多重周回飛行時間型質量分析計(MULTUM: Multi-turn Time of Flight Mass Spectrometer)により測定する。MULTUMは8の字型に同一軌道を複数回周回させることで, 小型・軽量でありながら長い飛行時間を実現し, 高い質量分解能を得ることができる。ガス状試料は, サンプリング装置で採取した物質を加熱して発生させるほか, 天体表面から自然に揮発した分子をスニフモードで取り込むことも想定される。目標仕様として, 質量分解能 $>10,000$, 質量範囲 $m/z=1-400$ が掲げられている。地上品として開発されたMULTUMをベースに各構成要素の小型化を実現した宇宙機搭載用MULTUM-Spaceの子機への搭載を予定している。従来の探査機搭載質量分析計を大きく上回る高い質量分解能により, これまで困難であった分子の精密な同位体比の測定や複雑な有機分子の同定を可能にする。これにより, 地球へ持ち帰ることのできない揮発性分子の情報と, リターンサンプル分析から得られる分子の情報を統合し, 有機物の化学的特徴をシームレスに理解することが期待される。

設置型地震計は, 小天体表面に設置され, 天体内部構造および機械的物性を直接探査するための理学機器である(図2b)。高感度一軸地震計を主センサとし, 姿勢推定および高周波振動観測のための三軸加速度計を組み合わせた独立ユニットとして構成され, 電源, 通信, データ処理系を内蔵する。観測では, SCIやサンプリング, 着陸機の接地・移動など探査機活動によって励起される人工地震を利用したアクティブ観測に加え, 内部活動や熱応力, 微小衝突などに起因する自然振動を利用したパッシブ観測

を実施する。さらに、搭載するジオフォンをアクチュエータとして駆動し、自ら人工震源を発生させる自己アクティブ観測も検討している。地震観測によって得られる弾性波速度、減衰特性、共振特性を用いることで、内部空隙率、機械的強度、粒径分布、不均質性、ブロックサイズ、層構造などを推定できる。これらの情報は、サンプル分析だけでは得ることのできない天体全体の内部構造を理解するための重要な制約条件となり、微惑星形成機構やラブルパイル・ペブルパイル形成過程の検証に直結する。

バイスタティックレーダーは、親機と子機の二機構成を活かして小天体内部を探索するための機器候補である(図2c)。親機搭載のレーダー送受信機から送信された中心周波数160 MHz、帯域幅50 MHzの電磁波パルスは小天体内部を透過した後、子機搭載のレーダー中継機で中継され、再び小天体内部を透過して親機に戻る。小天体を通過する様々な伝搬路で得られた電磁波パルスの伝搬遅延時間のデータセットにトモグラフィ解析を適用することで、小天体内部の電磁波速度の空間分布を数mの空間分解能で決定する。これらをもとに小天体の組成・空隙率の推定や、層・ブロック等の内部構造の有無によるラブルパイル・ペブルパイル・一枚岩の識別、小天体形成過程の議論などに貢献することが期待される。小天体を対象としたレーダ内部探索はRosettaミッション(周回機&着陸機)で実施例があり[21,22]、Heraミッション(単独周回機)でも実施予定だが[23,24]、複数の周回機にレーダを搭載して、内部構造の透過トモグラフィ解析が可能なデータセットの取得を目指す観測は未実施で、NGSRで実現されれば世界初となる。

小型衝突装置(SCI)は、表面下の物質を人工的に露出させるための装置である。検討案では、成形爆薬を用いて約2 kgの金属ライナーを約2 km/sで射出し、衝突によって地下物質を表面に露出させる方式が想定されている。この原理は、はやぶさ2のSCIで実証済みである。高速度衝突による表面物質の掘削・放出量は目標天体の重力、強度、空隙率、表層状態に依存するため、目標天体に合わせてライナー設計や衝突条件を最適化する。

加えて、宇宙物理コミュニティと海外機関提供機搭載という文脈から、蛍光X線検出器、赤外分光計、

小型ランダー、ダストカウンターも検討されている。

以上のように、NGSRの探索機構は、親機と子機を組み合わせた深宇宙サンプルリターンを基盤とし、サンプリング、地球帰還、光学航法、測距、熱赤外観測、近赤外観測を標準的な要素として備える。さらに、目標天体と利用可能なリソースに応じて、採取した揮発性物質のその場分析、人工衝突体を組み合わせた地震観測、親機子機が周回するバイスタティックレーダー探索といった新奇性のある小天体探索を実現する。

4. ミッションシーケンス

4.1 軌道

本節では、NGSRの3つのミッション案それぞれにおける軌道計画の例を示す。表1に示した3つの候補天体(NGSR-C:289P/Blanpain, NGSR-D:2001 SK162, NGSR-E:4660 Nereus)について、2030年代前半の打ち上げを想定した往復軌道設計を行った。この際、ロケットの打ち上げ能力は $C_3=20\sim25$ km²/s²程度、往還機の ΔV 能力は2000 m/s以下を目安とし、近傍運用(=小天体滞在)期間を1~2年程度確保できるよう最適化を行った。

図3および表2に、各天体について設計した往復軌道計画の一例を示す。ここで示す軌道計画は、各天体ごとの唯一解ではないことに注意されたい。同等の飛行時間や ΔV で実現可能な打上げウィンドウが、各天体ごとに複数確認できている。

NGSR-Cでは、目標天体である289P/Blanpain彗星が遠日点5 au付近まで達する長楕円軌道を飛行するため、2年同期の地球スイングバイ(Earth Gravity Assist, EGA)を用いて大きな軌道変更を行う。289P/Blanpainと地球の軌道が接しているため、遠方天体であるにもかかわらず比較的小さな ΔV で往復可能な点が特徴である。ただし、太陽から遠ざかるほど天体の軌道運動は遅くなるため、必然的に長い飛行期間を要する。

NGSR-Dの目標天体である2001 SK162は、289P/Blanpainと同様に地球軌道に接し、遠日点が約2.84 auという比較的長い楕円軌道を飛行する。そのため、NGSR-Cと同様に地球スイングバイ(EGA)を用いた増速が不可欠である。ただし、図3

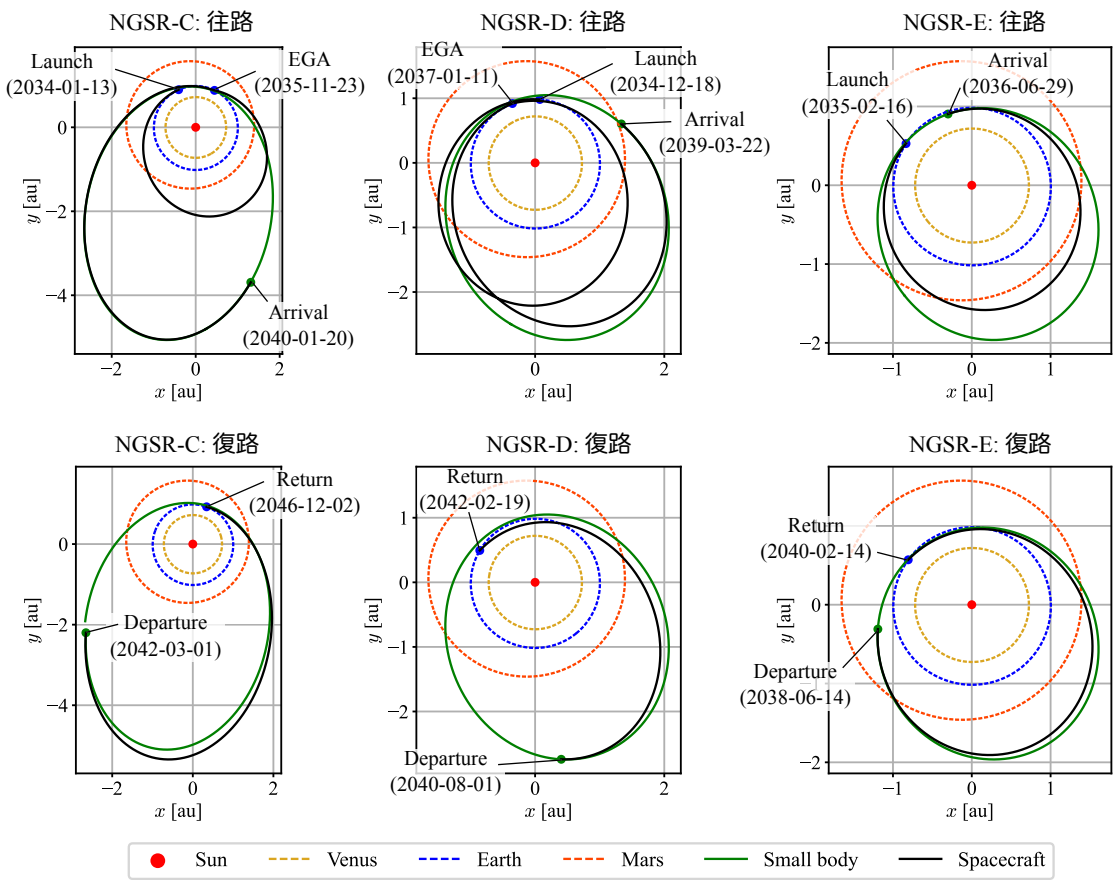


図3. NGSRの各オプションにおける軌道計画例.

表2. 各軌道計画における諸元.

ミッション	C_3	近傍運用期間	総飛行期間	総 ΔV
NGSR-C	$25 \text{ km}^2/\text{s}^2$	771日	12.88年	1571 m/s
NGSR-D	$25 \text{ km}^2/\text{s}^2$	498日	7.17年	1600 m/s
NGSR-E	$21.7 \text{ km}^2/\text{s}^2$	715日	4.99年	1743 m/s

および表2では2年同期のEGAを用いたシナリオを示しているが、NGSR-Cと比較して遠日点距離が小さいことから、1年または1.4年同期のEGAでも成立解が存在する。NGSR-Dの総飛行期間は打上げウィンドウに強く依存し、約6年(2036年頃)～約10年(2032年頃)と大きく変動する。

NGSR-Eの目標天体である4660 Nereusの軌道は地球軌道に接しており、かつ遠日点距離が約2.02 auという比較的小さな値である。この場合、打ち上げロケットの C_3 が $21.7 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 程度見込まれば、地球スイングバイを用いない直接遷移が可能である。およそ2年程度の滞在期間を確保しながら、往復の総飛行期間が5年を下回る解も確認されており、軌道設計(ΔV や飛行期間)の観点では好条件の天体である。

4.2 近傍運用

目標天体にランデブーした後は、天体を周回するのではなく、ホームポジション(HP)と呼ばれる目標天体上空の定点で探査機の位置を維持する。この方式は、はやぶさシリーズの運用を踏襲したものである。HPを地球と目標天体を結ぶ線上に設けることで、定常姿勢では地球方向に高利得アンテナを指向させつつ、観測機器を目標天体に向けることがで

きる。低高度観測やタッチダウンなどの特殊運用は、基本的に全てこのHPを起点にして実施し、運用完了後、探査機は速やかにHPに復帰する。HPの高度は、天体の重力定数に応じて、推進剤消費量や軌道安全性の観点から決定する。

図4に、Blanpainをターゲットとした場合の、約2年間の彗星滞在期間におけるミッション運用のスケジュールの一例を示す。図4には、時期ごとの太陽-地球-天体間のジオメトリ変化をあわせて示している。NGSRでは、2機構成を活かした複数地点からのサンプル採取を目指している(図4の例では3回)。各タッチダウン関連運用の前に、往還機と着陸機を分離して、両機のHP維持などを独立に行う。地震計設置、レーダー観測、サンプル搬送のためのランデブードッキングなど、はやぶさ2にはなかった新規運用も含めて、多彩な近傍運用が計画されている。D型・E型小惑星をターゲットとした場合でも、同様の近傍運用を1～2年程度行う予定である。今後の詳細検討では、目標天体ごとに、各運用の技術的成立性を見極めつつ、運用計画を具体化していく。

5. サイエンス検討

本節では、3つのミッション案について、実現を目

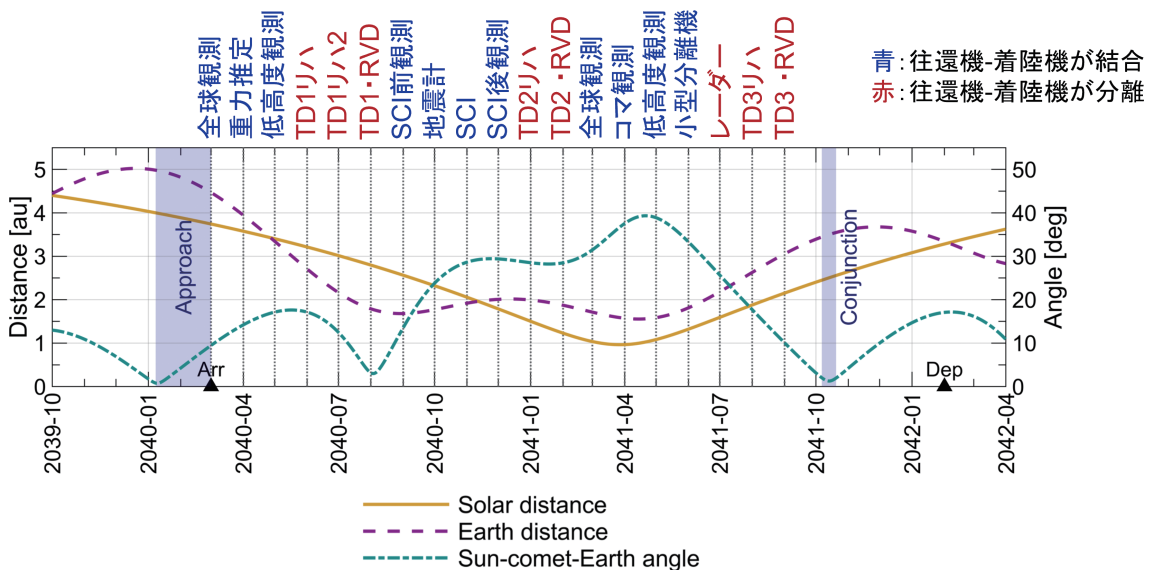


図4. Blanpainをターゲットとした場合の近傍運用のスケジュール例(TD:タッチダウン, RVD:ランデブードッキング)。

NGSR-E：地球型惑星の水と大気，内惑星系の起源

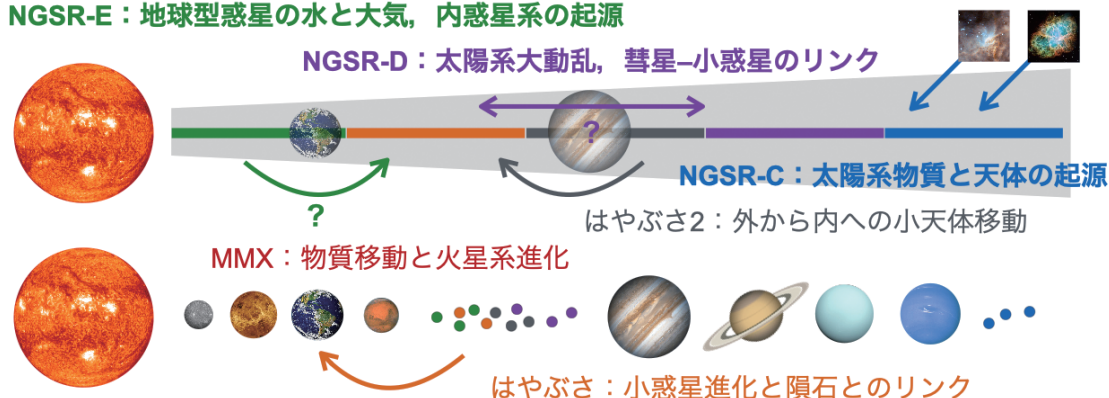


図5. NGSの理学目的. 右上の画像は星形成領域NGC 602/N90(Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)–ESA/Hubble Collaboration; cropped)およびかに星雲(Credit: NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University); Acknowledgement: Davide De Martin (ESA/Hubble); cropped).

指すサイエンスをまとめる。以下では，彗星核サンプルリターン案をNGSR-C，D型小惑星サンプルリターン案をNGSR-D，E型小惑星サンプルリターン案をNGSR-Eと呼ぶ。これら3案は，いずれも小天体サンプルリターンを通じて太陽系物質と太陽系天体の起源に迫るという大きな目的を共有する(図5)。それぞれについて，サイエンス的な背景，実現を目指すサイエンス，理学機器の位置づけを述べる。

5.1 NGS-C: 彗星核サンプルリターン

NGSR-Cは，彗星289P/Blanpainを目標天体とする(表1)，NGSRの当初ノミナル案である。289P/Blanpainは遠日点を5.13 au に持つ木星族彗星であり，ほうおう座流星群の母天体として知られる[25]。直径は約300 m，自転周期は8.8時間と見積もられている。彗星としての活動度は低い，それゆえに彗星核の反射スペクトルが得られている。D型小惑星の赤いスペクトルは，太陽系遠方起源と整合的である。

彗星は，太陽系外縁部で形成し，集積した水，鉱物，有機物が大きく変成されることなく保存されている天体である。それゆえ，銀河系から原始太陽系に持ち込まれた物質，太陽系最初の世代の天体である微惑星の集積過程を記録している [26–28]。隕石やC型小惑星帰還試料は，太陽系物質の起源を調べる上で不可欠な物証を与えてきたが，それらは母天体

内での水質変成，熱変成などの影響を受けている。例えば，よく「始原的天体」とされるリュウグウも，その母天体は昇温と広範な水質変成を経験したと考えられている [7]。これに対して，彗星核物質は，太陽系の起源物質をよりよく記録するものとして，銀河系における物質進化，星間物質から原始太陽系物質への接続，そして太陽系における最初の世代の天体形成を調べる上で特に重要である[26,27]。

第一の科学目標は，太陽系物質の起源，すなわち銀河系物質進化を解明することである。太陽系の原材料物質は，恒星内部，超新星，中性子星合体，AGB星，分子雲といった多様な天体環境を経て形成され，原始太陽系円盤へと持ち込まれた。その一部は，大きな同位体異常を持つプレソーラー粒子(無機物)や有機物として隕石中に見出すことができる。しかし，隕石や小惑星試料では，これらの成分は母天体過程や地球への供給過程における選択的生存の影響を受けている可能性がある。彗星核から，熱的・水質的・機械的選択を最小限に抑えた試料を採取し，地上の高精度同位体分析，微量元素分析，地上およびその場での有機物分析に供することができる。太陽系を構成した親星の種類と寄与率，星間物質由来の有機物の性質，先太陽系から原始太陽系へ至る物質進化を直接的に調べることができる[26,27,29]。

第二の科学目標は，微惑星形成機構の解明であ

る。惑星形成理論において、マイクロメートルサイズのダストがキロメートルサイズの微惑星へ至る過程は、今なお大きな未解決問題である。ダストが直接付着成長したのか、あるいはペブル(mm-cmサイズのダスト凝集体)が集積して微惑星を形成したのかを検証するには、天体の内部構造、空隙率、層構造、構成粒子のサイズ分布が手がかりとなる[22,28,30]。リュウグウやベヌのような小惑星は、母天体の水質変成や衝突破碎・再集積を経ており、微惑星形成時の物理情報の多くが失われている。彗星核は、より始原的な微惑星構造を保持している可能性があり、試料分析と内部構造探査を組み合わせることで、微惑星形成の物証に迫ることができる。加えて、NGSRでは低分子量の水のその場分析をすることで、目標天体もしくはその母天体の集積した温度環境を制約する。これにより、微惑星がいつ、どこで、どのように形成したのかを制約する。

彗星核から理学的価値の高い試料を採取するためには、表面のどこから試料を得るかが本質的に重要である。彗星核表面には、ダストが堆積した比較的に平滑な領域、崖や割れ目、ピット、活動によって新鮮な物質が露出した領域が共存し、水氷やCO₂氷の露出は限られた場所に現れる[31,32]。一方で、彗星核は形状の点でも扱いが難しい対象である。67Pに代表されるように、彗星核にはバイロブ形状や強い不規則形状を示すものが多い[31]。NGSRにおいては、充実したリモセン機器を用いて、全球の形状・地形・熱物性・組成分布を把握して理学的に価値の高いサンプリング地点を選定し、小型着陸機において自由度の高い複数回サンプリングを実現する。

NGSR-Cにおいて、その場分析装置は重要な役割を担う。揮発性物質を含む試料のサンプルリターンには、冷凍機搭載によるコスト増大に加えて、採取後の昇温と水との反応による試料の変成のリスクが伴う。そこで、NGSRでは、揮発性物質のその場分析を選択する。分取した試料の加熱およびスニフモード分析により、揮発性成分、低分子有機物の分子・元素・同位体組成を調べる。地上分析で得られる難揮発性物質(高分子有機物を含む)の高精度な分子・同位体情報と組み合わせることで、先太陽系からの物質進化、彗星の集積環境を理解する手がかりとなる。一方、微惑星形成機構の解明という科学目標

の実現においては、設置型地震計・バイスタティックレーダーによる内部構造の解明(ラブルパイル構造とペブルパイル構造の区別)が鍵となる。

5.2 NGSR-D:D型小惑星サンプルリターン

NGSR-Dは、D型小惑星 2001 SK162を候補天体とする短期サンプルリターン案である(表1)。2001 SK162は遠日点を2.84 auに持つ。天体サイズはアルベドと縮退して不定性を持つが、直径0.87-1.9 kmと見積もられており、他の2つの候補天体(289P/Blanpain, Nereus)より大型である。対応するアルベドの見積もりは0.031-0.16である。長い自転周期が特徴であり、過去の観測結果から約68時間と見積もられている。

D型小惑星は、赤い反射スペクトルと低アルベドを特徴とする天体群である。小惑星帯外縁部に遠に多く分布し、木星トロヤ群を特徴づける天体でもあるが、その化学的性質はよくわかっていない。C型小惑星よりもさらに揮発性成分や有機物に富む可能性があり、彗星との関係が長く議論されてきた[33]。同じく赤いスペクトルを示す炭素質コンドライト隕石のTagish LakeがD型小惑星由来という説もあるが[34]、可視・近赤外スペクトルだけでは対応関係を一意に決めることは難しく、アルベドや中間赤外スペクトルを含めた比較では、Tagish Lakeに類似する小惑星は小惑星帯・木星トロヤ群の中でも限られることが指摘されている[35]。一方で、Tagish Lake隕石中の炭酸塩同位体組成からは、その母天体がCO₂氷に富む低温環境で集積した可能性も議論されており、少なくとも一部のD型小惑星が外側太陽系物質を含むという見方を支持する物質科学的証拠も得られつつある[36]。

NGSR-Dの第一の科学目標は、外惑星系の起源、特に木星の形成進化史の制約である。D型小惑星に富む木星トロヤ群天体は、軌道傾斜角が励起されていること、D/P型天体に富むこと、Kuiper belt天体やHilda群との類似性を持つことなどから、木星近傍でその場形成した天体群ではなく、原始カイパーベルトに由来する微惑星が、ガス散逸後の早期巨大惑星不安定、すなわち jumping Jupiter型の進化の中で捕獲された集団である、という見方が有力である[37]。2001 SK162の帰還試料分析から、

コンドリュールなどの円盤内で形成した火成ケイ酸塩、あるいは母天体内で形成した炭酸塩・含水鉱物などの二次鉱物の年代学的情報が得られれば、D型小惑星母天体の集積と進化の時期を制約できる。また、水氷やCO₂氷等の揮発性物質がその場分析で検出されたり、帰還試料からその痕跡が見つかった場合には、集積の温度環境から形成位置を推定できる。木星トロヤ群フライバイ探査を行うNASAのLucyミッションでは、複数のトロヤ群天体の表面組成・形状・密度・クレーター史が調べられるため、NGSR-Dの帰還試料分析とLucyのその場観測結果を相互比較するシナジーも期待できる [37,38]。

第二の科学目標は、彗星と小惑星のリンクの解明である。彗星と小惑星は、その軌道や活動性により定義として区別されているが、天体の起源や物質進化的な観点からの区別は必ずしも明確ではない。小惑星帯にありながら彗星の活動を示す天体、活動を失った彗星核、D型・P型小惑星、さらには彗星的な有機物・鉱物学的特徴を示す宇宙塵・微小隕石などは、comet-asteroid continuum の重要な例と考えられる [39]。また、小惑星表面に水氷・有機物が存在し得ることも観測的に示されており、小惑星と彗星の物質的境界は単純ではない [40]。南極微小隕石の中には、彗星的・外側太陽系的な有機物・鉱物学的特徴を示す粒子も見つかっており、D型小惑星の物質が、彗星塵、微小隕石、炭素質隕石の間にどのように位置づけられるかは重要な未解決問題である [41]。太陽系において小惑星分布の外側領域を特徴づけるD型小惑星のその場探査と帰還試料分析を行い、過去の彗星探査で得られた知見と比較することによって、D型小惑星の材料物質と母天体での材料物質の進化過程（昇温や水質変成）を解明する。NGSR-Dにより彗星と小惑星の類似点と相違点を明確にし、太陽系物質進化の理解を大きく前進させる。

2001 SK162がどのような形状・表面状態・内部構造を持つ天体であるかは、現時点ではよくわかっていない。木星トロヤ群には、Hektorのような細長い形状あるいはパイロブ構造を持つ天体が存在する [42]。その表面状態も、彗星的な高空隙率・低強度から、岩石質小惑星的なエンドメンバーがありうる。物質分布の不均質性も未知であり、例えば極めて限定

的な水の露出がある可能性なども挙げられる。

このような形状・表面状態の不定性に対して、NGSRの親機・小型着陸機構成は有効に働き得る。2001 SK162がイレギュラー形状・不均質な表面物質分布を示した場合でも、小型着陸機による自由度の高いサンプリングによって理学的に価値の高い試料を複数点から採取することが期待できる。

NGSR-Dにおいても、その場分析装置による揮発性物質の観測は重要となる。D型小惑星は、C型小惑星よりも揮発性成分や有機物に富む可能性がある一方で、実際にどの程度の揮発性物質を保持しているか、また彗星的な物質なのか、水質変成を受けた炭素質隕石的物質なのかは未解明である。その場分析装置により、分取試料の加熱分析やスニフモード分析を行えば、水、CO₂、CO、硫黄化合物、窒素化合物、低分子有機物などの存在度・同位体組成を、天体表面で直接調べることができる。これは、D型小惑星が本当に外側太陽系の低温物質を保持しているのか、あるいはC型小惑星に近い変成済み物質なのかを判定する上で、帰還試料分析と相補的な情報を与える。

地震計・バースタティックレーダーも不定性の大きいD型小惑星の内部構造（ペブルパイル、ラブルパイル、一枚岩）を理解する上でその搭載意義は大きい。一方で、2001 SK162は直径が1 km級である可能性があり、289P/BlanpainやNereusに比べて天体サイズが大きい。そのため、レーダー波の減衰を考慮した機器仕様・運用計画・理目標設定が重要となる。また、68時間と遅い自転周期を考慮し、設置型地震計の仕様および運用（越夜の可否）は今後の検討課題である。

5.3 NGSR-E:E型小惑星サンプルリターン

NGSR-Eは、E型小惑星4660 Nereusを候補天体とする短期サンプルリターン案である。Nereusは遠日点距離2.03 auの地球接近小天体であり、NEARや初代はやぶさといった過去のミッションでも探査候補に挙げられてきた [19]。直径約0.33 km、幾何アルベド0.55程度の高アルベド天体であり、スペクトル型はE型ないしXe型に分類される。レーダー観測からは、おおむね0.51×0.33×0.24 kmのやや細長い形状モデルが得られており、自転

周期は約15時間である。

E型小惑星は、高いアルベドを特徴とする小惑星群であり、還元的な内側太陽系物質を代表する。これまで、はやぶさはS型小惑星イトカワと普通コンドライトの関係を、はやぶさ2はC型小惑星リュウグウとCIコンドライトに近い始原物質の関係を明らかにしてきた。これに対して、E型小惑星は、エンスタタイト隕石、特にオーブライト(エンスタタイト・エコンドライト)との関係が議論されてきたが、その対応関係は反射スペクトルにもとづく推論に大きく依存している[43,44]。

NGSR-Eの第一の科学目標は、地球型惑星の水と大気の起源の解明である。特に「ハビタブル惑星の形成に惑星系遠方からの物質移動は必須か?」という問いに答える。近年、地球の材料物質と考えられているエンスタタイト隕石が、数海洋質量相当の水(水素)を含むという分析結果が報告されている[45]。その後、バルクや局所での分析研究が相次いでいるが、地球コンタミを除いた水量やそのホスト相については議論が分かれている[46-48]。本ミッションにおいてE型小惑星からフレッシュな試料を持ち帰ることができれば、こうした議論に決着をつけることができる。大気を形作る炭素・窒素についても同様である。さらに、実際の惑星形成過程においては、エンスタタイトコンドライト隕石のような物質が集積してただちに惑星になるのではなく、分化小天体・原始惑星段階を経たはずである。したがって、水や大気の起源を理解するためには、こうしたヒエラルカルな集積過程における揮発性元素の分配と散逸が鍵となる[49]。オーブライト母天体、すなわち分化母天体由来と考えられるE型小惑星のサンプルリターンから母天体の分化マントル(・核)だけでなく未分化な地殻由来物質が得られた場合、こうした揮発性元素の分配進化をトレースすることが可能となる。

第二の科学目標は、内惑星系の起源の解明である。具体的には、地球の材料物質から地球集積モードを制約し、E型小惑星進化の時空間的制約から内惑星系の動乱の様相を理解する。地球の材料物質の解明としてまず期待されるのはE型小惑星がエンスタタイト隕石の母天体であることが確かめられることである。これは帰還試料の難揮発性元素の同位体分析とエンスタタイト隕石との比較によって実現す

る。近年の多元素同位体組成にもとづく混合モデルでは、地球や火星の材料物質におけるエンスタタイト隕石様成分の重要性が示されている[50]。一方、E型小惑星がエンスタタイト隕石の母天体でなかった場合、内側太陽系を特徴づける物質の集積によって地球ができていないということから、太陽系形成論の新たな展開が期待できる。例えば、ペブル集積モデルのようなグローバルな物質移動による惑星形成が示唆される。E型小惑星進化の時空間的制約は、帰還試料分析による年代学的情報(集積・熱進化の時間情報)と、組成および残留磁化が与える空間的情報の統合によって実現する。近年、ELエンスタタイト隕石の供給源と考えられる小惑星族の力学進化と年代情報を組み合わせ、巨大惑星軌道不安定の時期を制約しようとする研究も現れている[51]。リュウグウ試料が外惑星系動乱を制約するのに対し、内惑星系動乱の有無・モード・タイミングの情報を組み合わせることで、両者のトリガーが何であったかを制約できる。

NGSR-Eにおいても、サンプルリターンは中心的な役割を担う。Nereusは3天体の中では遠日点が比較的近く、過去のレーダー観測からラフな形状モデルも作成されており、サンプリングにおける難易度は相対的に低い。しかしながら、分化母天体を起源とする可能性から、その表面物質には大きな不均質が想定される。不均質な表面物質から、適切な採取地点を選択し、確実にそこからのサンプルリターンを実現するためには、やはりNGSRの小型着陸機が活躍する。

分化天体由来する小惑星特有の不均質性および内部構造の不定性から、レーダーおよび地震計という内部構造探査装置は重要な役割を担う。Nereusのような小型地球接近小惑星が、単一岩塊に近い天体なのか、衝突破砕後に再集積したラブルパイルなのか、あるいは内部に大きな不均質性を持つのかは、帰還試料の素性ひいては天体の起源を理解する上で重要である。一方、その場分析装置によって検出可能な量の揮発性物質が存在する確証はない。しかしながら、E型小惑星における揮発性物質の存在を制約することは、エンスタタイト隕石のような内側太陽系起源と見られる試料に見られる微量の揮発性元素がどのように母天体に持ち込まれ、

どのような変遷を辿ったかを理解するために重要であろう。

6. おわりに

本稿では、日本の小天体サンプルリターンの後継であり、MMXに続く2030年代前半の宇宙研戦略的中型計画の候補であるNGSRについて、ミッションを取り巻く状況と最新の検討結果をまとめた。ワーキンググループでは、今後もよりよいミッションとなるべく検討を重ねていくとともに、日本の惑星科学コミュニティと一体となってミッションの実現と成功を目指していきたい。

参考文献

- [1] Fujiwara, A. et al., 2006, *Science* 312, 1330.
- [2] Nakamura, T. et al., 2011, *Science* 333, 1113.
- [3] Watanabe, S. et al., 2019, *Science* 364, 268.
- [4] Arakawa, M. et al., 2020, *Science* 368, 67.
- [5] Morota, T. et al., 2020, *Science* 368, 654.
- [6] Yada, T. et al., 2022, *Nat. Astron.* 6, 214.
- [7] Yokoyama, T. et al., 2023, *Science* 379, eabn7850.
- [8] Nakamura, T. et al., 2023, *Science* 379, eabn8671.
- [9] Naraoka, H. et al., 2023, *Science* 379, eabn9033.
- [10] Kuramoto, K. et al., 2022, *Earth, Planet. Space* 74, 12.
- [11] Kasuga, T., 2025, *Astron. J.* 169, 54.
- [12] Barucci, M. A. et al., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 476, 4481.
- [13] Mueller, M. et al., 2011, *Astron. J.* 141, 109.
- [14] Thomas, C. A. et al., 2014, *Icarus* 228, 217.
- [15] Ye, Q.-Z., 2011, *Astron. J.* 141, 32.
- [16] Delbó, M. et al., 2003, *Icarus* 166, 116.
- [17] Lazzarin, M. et al., 2004, *Icarus* 169, 373.
- [18] Binzel, R. P. et al., 2004, *Planet. Space Sci.* 52, 291.
- [19] Brozovic, M. et al., 2009, *Icarus* 201, 153.
- [20] Troianskyi, V. et al., 2024, *Icarus* 420, 116146.
- [21] Kofman, W. et al., 2007, *Space Sci. Rev.* 128, 413.
- [22] Kofman, W. et al., 2015, *Science* 349, aab0639.
- [23] Hérique, A. et al., 2018, *Adv. Space Res.* 62, 2141.
- [24] Michel, P. et al., 2022, *Planet. Sci. J.* 3, 160.
- [25] Watanabe, J. et al., 2005, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 57, L45.
- [26] Rubin, M. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, 102.
- [27] Altwegg, K. et al., 2019, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 57, 113.
- [28] Keller, H. U. and Kührt, E., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, 14.
- [29] Morse, A. D. and Chan, Q. H. S., 2019, *ACS Earth Space Chem.* 3, 1773.
- [30] Blum, J. et al., 2017, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 469, S755.
- [31] Sierks, H. et al., 2015, *Science* 347, aaa1044.
- [32] Fornasier, S. et al., 2019, *Astron. Astrophys.* 630, A7.
- [33] Emery, J. P. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 203.
- [34] Hiroi, T. et al., 2001, *Science* 293, 2234.
- [35] Vernazza, P. et al., 2013, *Icarus* 225, 517.
- [36] Fujiya, W. et al., 2019, *Nat. Astron.* 3, 910.
- [37] Bottke, W. F. et al., 2023, *Space Sci. Rev.* 219, 83.
- [38] Levison, H. F. et al., 2021, *Planet. Sci. J.* 2, 171.
- [39] Hsieh, H. H., 2017, *Philos. Trans. R. Soc. A* 375, 20160259.
- [40] Campins, H. et al., 2010, *Nature* 464, 1320.
- [41] Yabuta, H. et al., 2017, *Geochim. Cosmochim. Acta* 214, 172.
- [42] Rozehnal, J. et al., 2016, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 462, 2319.
- [43] Clark, B. E. et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E02001.
- [44] Keil, K., 1989, *Meteoritics* 24, 195.
- [45] Piani, L. et al., 2020, *Science* 369, 1110.
- [46] Thomassin, D. et al., 2023, *Earth Planet. Sci. Lett.* 616, 118225.
- [47] Barrett, T. J. et al., 2025, *Icarus* 436, 116588.
- [48] Gray, M. L. et al., 2026, *Meteorit. Planet. Sci.*, doi:10.1111/maps.70192.

[49] Grewal, D. S. et al., 2021, Nat. Geosci. 14, 369.

[50] Dauphas, N. et al., 2024, Icarus 408, 115805.

[51] Avdellidou, C. et al., 2024, Science 384, 348.