

太陽系小天体探査の現状と今後の展開: 理学・工学双方の課題から考える

深井 稜汰¹, 菊地 翔太², 久保 勇貴¹, 坂谷 尚哉¹, 鳶生 有理¹, 木村 駿太¹, 尾崎 直哉¹,
村上 豪¹

2023年7月12日受領, 査読を経て2023年8月7日受理

(要旨) 今後の日本の太陽系科学探査では、最重要の科学的課題を適切な技術によって効率的に解決することが求められる。2022年度は、ISAS惑星探査ワークショップ2022・第24回惑星圏シンポジウムの二度にわたり将来の太陽系小天体探査を見据えたスプリンターミーティングが行われ、現状の科学的課題・技術的課題について議論がなされた。当課題を解決する糸口として、試料の貴重性に基づき探査天体・探査方法を選定したサンプルリターンミッションや、多数の小天体の形成過程を大局的に理解するためのフライバイミッションの推進が提案された。

1. はじめに

小天体探査は、はやぶさ・はやぶさ2をはじめとするサンプルリターンミッションの成功などに基づき、太陽系科学探査において重要な位置を占めている。現在は各国が将来の小天体探査ミッションを提案している中、ISAS/JAXA (Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency) を中心としたミッション立案には、欧米に対して予算規模が少ない等の困難も抱えている。日本独自の探査を提案するには、理学・工学双方の課題をもとに新たな観点を生み出す必要がある。

2022年9月に開催されたISAS惑星探査ワークショップ(PEWS: Planetary Exploration WorkShop)、2023年2月に東北大学で開催された惑星圏シンポジウム (SPS: Symposium on Planetary Sciences) において、小天体探査を議論するスプリンターミーティングがそれぞれ1時間超に渡って行われた。各ミーティングにはリモート参加・対面参加により50名以上が議論に参加し、科学的課題を発端として小天

体探査の新たな種を育て、様々な形で解決し多様な学問分野へと発展させる試みがなされた。2021年度の本スプリンターミーティングの議論では、「小天体の組成・形状・起源等は非常に多様のため、それぞれの探査で異なる科学目標を達成し得るものである」ことが再認識されており、2022年度はその議論を引き継ぐ形で進められた。

本稿は次なる小天体探査を提案する機会のために、理学・工学双方の情報の基盤を作ることを目的とする。そのために、小天体探査で解決し得る科学的課題と、現状の技術的課題を2022年度スプリンターミーティングの議論に基づき整理した。加えて理学・工学双方の課題を踏まえ、現時点での小天体探査の展望を議論した。本稿は「惑星科学/太陽系科学研究領域の目標・戦略・工程表(RFI: Request for Information)」や、ISASが掲げる「宇宙科学・探査ロードマップ」とは趣旨が異なる。あくまでスプリンターミーティングの限られた時間の中で小天体探査の動機を対等に俯瞰したものであり、今後の道のりを規定するものではなく、また全ての可能性を網羅した議論ではないことに注意したい。

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2.国立天文台

fukai.ryohta@jaxa.jp

2. 科学的課題

小天体探査で解決すべき科学的課題は、以下の通りである。惑星科学における課題は、1) 地球または地球型惑星への揮発性物質の輸送と起源の解明、2) 太陽系天体の形成過程の解明、3) 太陽系天体の進化過程の解明の三点である。天文学においては「太陽系の起源物質の解明」、生物学においては「地球生命の材料の起源の理解」、防災科学(プラネタリーディフェンス)においては「地球へ飛来し得る天体の特性の理解」がそれぞれ挙げられる。表1には、各課題を解決し得る探査天体ターゲットと、対応する「鍵となる情報」、その課題を解決しつつある現行の探査方法、サンプルリターンミッションに関してはアナログ試料となり得る試料名を挙げている。理学コミュニティは上記の科学課題の解決可能性が高いミッション、更には複数の課題を解決出来るミッションを推進すべきである。

小天体探査の方法は、「フライバイ」「ランデブー(着陸含む)」の二通りに大別される¹⁾。一機の探査機によって「複数回の」フライバイやランデブーを行うことや、フライバイ・ランデブーに伴って「サンプルリターン」を組み合わせたことも可能である。小天体探査以外にも関連した科学的成果を挙げる方法は多数存在し、探査との協力を検討することは限られた小天体探査のリソースを使う上で重要な観点となる。望遠鏡による地上観測やX線・紫外線・赤外線観測衛星等によっても小天体の研究における大きな成果が挙げられている[1]。サンプルバイアス、地球上の汚染、起源が不明という問題はあ一方、隕石学は多数の試料を用いた分析が可能である。また実験的な研究によって小天体環境や衝突過程を再現することも一つの解決方法である。

2.1 惑星科学

2.1.1 地球への揮発性物質の輸送と起源の解明

C型小惑星は、後期集積による地表への供給等を通して、地球型惑星に揮発性物質をもたらした天体の一つと考えられている[2]。C型小惑星は炭素質コンドライトの起源と考えられていた一方で、小惑

星帯におけるC型小惑星の存在度に対して地球上に飛来する量は非常に少ない。特にCI (Ivuna-type) コンドライトは、これまでに9個しか発見されていない。これは地球の大気圏でCIコンドライトの母隕石が消失することによるサンプリングバイアスであると考えられる。こうした意味で、C型小惑星のサンプルリターンには大きな価値がある。C型小惑星探査は既にはやぶさ2によって達成され[3, 4]、OSIRIS-REx・MMXによるサンプルリターンや、DESTINY⁺によるフライバイ探査によって今後より議論は発展する見込みがある。

同様に、地球型惑星への揮発性物質の起源として重要視されるのが彗星物質である[5]。地球上ではInterplanetary Dust Particles (IDPs) という μm オーダーの塵や、南極で発見された超炭素質の微隕石が回収されており、彗星とのリンクがうたわれている。一方で、多くのサンプル分析に対して十分な試料量がなく、またサンプリングバイアスが存在する可能性がある。NASAのStardustミッションでは最大50 μm 程度の粒子が回収された[6]。粒子の分析により難揮発性物質の存在、芳香族有機物の存在等が示されているものの[7]、その多様性や不均質性についてはサンプリング時の衝突による変成等の影響等を含むため、議論は困難である。現在、NASAによる彗星サンプルリターンミッション(CAESAR) が計画されている。

彗星からのリターンサンプルは科学的価値が高い一方で、探査における技術的ハードルが高い。その穴を埋めるのは、質量分析計などを用いたその場分析である。彗星表面物質のその場分析は次世代小天体サンプルリターン計画[8]、表面から放出されるガスによって生じるコマヤイオンのフライバイ中の観測はComet Interceptorでそれぞれ計画されている。水素同位体比(D/H比)の観測はESAのRosettaミッションにより67P/CG彗星で行われ、地球のD/H比よりも3-4倍高いことを示しており、地球の水の起源の議論に対して重要な情報を与えた[9]。67P/CG彗星よりも更に始原的であると思われる長周期彗星に対してもComet Interceptor搭載Hydrogen Imagerによって同様の情報が得られることが期待される[10]。

¹⁾バリエーションとしては相乗り、ロケット規模などが考えられるが、本稿ではより詳しい解説は省略した。

表1: 科学的課題と小天体探査方法の関連.

分野	科学的課題	ターゲット	アナログ	鍵となる情報	探査方法
惑星科学	地球への揮発性物質の輸送	C型小惑星	CC	同位体 (揮発性物質)	SR (HY2, O-REx, MMX) フライバイ (DESTINY+)
		彗星	IDP	同位体 (揮発性物質)	SR (CAESAR) ランデブー (Rosetta)
	太陽系天体の形成	木星トロヤ群	不明	同位体 (揮発性物質)	SR (-) フライバイ (Lucy)
		E型小惑星	EC	同位体 (金属元素) 化学組成	SR (-) フライバイ (-)
		彗星	-	物理特性・形状	ランデブー (Rosetta)
		D型小惑星	-		フライバイ (Comet Interceptor)
太陽系天体の進化	M型小惑星	鉄隕石	磁気物性	SR (-) ランデブー (Psyche)	
天文学	太陽系の起源	C型小惑星	CI	元素存在度	SR (HY2, CAESAR)
		彗星	IDP	同位体 (先太陽系粒子)	
生物学	生命材料の起源	C型小惑星	CC	生体分子	ランデブー (Rosetta)
		彗星			SR (HY2, CAESAR)
防災科学	地球に飛来する天体の特性理解	NEA	-	物理特性	ランデブー (Hera ほか) フライバイ (DART ほか)

CC: Carbonaceous Chondrites, EC: Enstatite Chondrites, IDP: Interplanetary Dust Particles, SR: Sample Return, NEA: Near Earth Asteroids, HY2: Hayabusa2, O-REx: OSIRIS-REx

2.1.2 太陽系天体の形成過程の解明

木星トロヤ群の形成や木星形成の解明において、木星トロヤ群小惑星探査は重要視すべきである。D型小惑星のアナログ物質として炭素質コンドライトの一つであるTagish Lake隕石が知られているが[11]、木星トロヤ群のD型小惑星の近赤外反射スペクトルとは不一致であることに注意したい[12]。木星トロヤ群の形成過程を知る上で特に重要なのは、揮発性物質や有機物の同位体比である。天体表面上にある程度豊富に存在し、分光でも特定が可能な化合物、同位体等がターゲットであれば、フライバイ探査やランデブー探査によるその場計測が有効となる。これまでに、木星トロヤ群小惑星探査計画OKEANOSの提案や、2021年10月のマルチフライバイ探査機Lucy打ち上げがあった。

E型小惑星は地球型惑星と類似した同位体組成を持つことが期待され、地球型惑星の形成過程・起源を知る上で重要視されている[13]。E型と類似するスペクトルを持つエンスタタイトコンドライト、オーブライイト隕石等の持つ金属元素の同位体組成、含水量、有機物存在度等が、地球汚染やサンプリングバイアスの影響を受けているかどうか今後のポイン

トとなる。

彗星は一般に微惑星の生き残りと考えられており、彗星の物理特性を理解することは微惑星の物理特性、如いては微惑星の形成・進化課程に迫るものである。例えば、彗星がペブルパイル天体かどうかという問いやそのペブルサイズは、原始惑星系円盤内での彗星(微惑星)形成環境の制約に繋がる[8]。形状モデルを用いた形態学から彗星の構成物質を制約する手法[14]も、フライバイ探査において有効な手段である。

2.1.3 太陽系天体の進化過程の解明

分化した微惑星のコア部分に相当すると考えられる一部のM型小惑星への探査も重要視されている。M型小惑星の磁気物性等、鉄隕石では既に失われている情報が存在する可能性がある。NASAが開発中のPsycheミッションのようなランデブー探査や、将来のサンプルリターンが期待される。

2.2 天文学

銀河系の物質進化過程においていかに太陽系が誕生したかを探るかが、近年重要視されている[15]。太陽系の平均元素存在度は、銀河系の化学進化を

考える上で欠かせないアンカーとなっている。太陽光球とCIコンドライトの元素存在度がよい一致を示すことがこれまで知られていた。リュウグウ粒子はCIコンドライトに化学的・鉱物学的特性がよく似ている上、地球上での汚染の影響がきわめて小さい。従ってリュウグウ粒子を分析することで、太陽系の平均元素存在度を最も高精度・高確度に求めることが出来ると考えられる[3]。

隕石学から、水質変成・熱変成等の影響が少ない始原的な天体には、先太陽系の天体から飛来したダスト(プレソーラー粒子)が含まれていることが予測されている[16]。各粒子はnm-数 μ mで、含有量も数100 ppm程度であるため、分析には1-10 g程度の多量の試料が必要となる。探査天体としては、小天体上での変成が小さいと考えられる彗星が第一に挙げられる。

2.3 生物学

これまでの小天体探査において、生物学・また生物学と強く関連する惑星科学の科学的課題は重視されてきた。特に地球の生命材料の起源を明らかにする根拠として、初期地球に集積した可能性のあるC型小惑星に含まれる有機物の存在量や多様性は注目を集めている。近年、炭素質隕石から複数種の核酸塩基が検出された[17]が、はやぶさ2ミッションにおいても帰還粒子の分析によってRNAの構成塩基のひとつであるウラシルの検出が報告された[18]。小天体から検出される生体分子は、基本的には非生物的に合成されたものと考えられる。生命の構成要素が検出可能な濃度まで非生物的に作られ、かつ保存性があるということは、地球生命の誕生時に地球外由来の材料が活用されていた可能性を示唆する。

今後の探査においても、特にCAESARミッションのような彗星サンプルリターンにより母天体上の変成を回避した種々の有機物の分析が可能となる点に期待が集まっている。ESAのRosettaミッションでは、67P/CG彗星から探査機搭載の質量分析器によってグリシンが検出された[19]。一方で、太陽系探査が今後より狭義の生物学に迫るためには、生命活動の痕跡や証拠をより直接的に検出することが期待される。PEWS 2022・SPS 2023の火星スプリン

ターでは、蛍光顕微鏡を用いた生体分子や生命活動の検出を目指す生命探査、外惑星スプリンターでは水衛星ブリュームの補集および分析といった野心的なアイデアが議論され始めている。これらの探査の実現ハードルは低くはないものの、小天体探査と科学的・技術的なフィードバックが行われ、互いに進捗し合うことが期待される。

2.4 防災科学

防災科学においては、2013年にロシア・チェリャビンスク州で衝撃波による人的被害をもたらしたチェリャビンスク隕石を契機として、小天体の地球衝突に対応する活動であるプラネタリーディフェンスが国際的に重要視されるようになった。近年は国連、NASA、ESAに専門の部署が設置され、探査機衝突による小惑星の軌道変更技術実証としてDART(NASA)とHera(ESA)の両ミッションから構成されるAIDA計画が実施されている。DARTミッションでは、2022年9月に二重小惑星ディディモスの衛星ディモルフォスに衝突し、地上および宇宙望遠鏡による事前・事後観測による衛星の公転周期変化から、探査機衝突による小惑星の軌道変更を実証した[20]。Heraミッションでは、2027年に二重小惑星ディディモスにランデブーし、DART衝突クレータの詳細観測を行う予定である。更に、はやぶさ2拡張ミッション(小惑星2001 CC21へのフライバイ探査、小型高速自転小惑星1998 KY26へのランデブー探査)[21]、OSIRIS-RExの延長ミッション(小惑星アポフィスへのランデブー探査)などが計画されている。プラネタリーディフェンスにおいては、衝突頻度が大きく都市壊滅級の被害をもたらしうる直径100 m級の小惑星の物理特性(質量・密度・強度)・化学組成を知ることが重要だが、こうした小惑星は地球から見ると暗く、観測可能な接近時には高速移動するため望遠鏡観測が難しく、今後の統計的な議論が必要とされている²。

²地球軌道における準衛星も探査候補の1つという意見がPEWS 2022において挙げられた。その後中でも安定した軌道をもつ地球の準衛星、2023 FW13が発見されている。

3. 技術的課題

3.1 軌道間輸送機

近年、深宇宙輸送のコスト削減および設計共通化を狙った深宇宙軌道間輸送機(OTV: Orbit Transfer Vehicle)の検討が国内で本格化されている[22]。深宇宙OTVシステムは、サンプルリターンや遠方天体をターゲットとする推進コストの高いミッションの実現性を高める上で、今後の小天体探査におけるキー技術と位置付けられる。巡航を担う輸送機と、目標天体近傍でミッションを行う探査機とに機能を分配する形態が基本となるため、小天体近傍でのより高度な運用に注力した設計が可能となる。加えて、マルチサンプリングを行う上では、採取済みのサンプルを輸送機側に搬送しておくことで、以降の近傍運用での探査機喪失によるサンプル全損を防ぐことができる[23]。このような探査形態においては、二機間のランデブー・ドッキングやサンプル搬送が技術課題となる[24]。

3.2 分離子機

未知天体をターゲットとするケースの多い小天体探査では、物性の不確定な天体表面での滞在探査を行う上で、親機からのローバーやランダーの分離が有力な解となる。最近の例では、はやぶさ2のMINERVA-II1/II2とMASCOTが挙げられる[25, 26]。小天体の微小重力環境では比較的低リソースで様々な運用をこなすため、日本が得意とする超小型衛星との親和性も高い。はやぶさ2の分離カメラ(DCAM3)のように、親機にリスクを及ぼすことなく挑戦的な観測を行うことも可能である[27]。将来的には、複数機間の協調探査や自在な表面移動・軌道制御など[28]、より高度な機能への発展性を有する。また、小惑星表面にタッチダウンしてサンプル採取を行う子機は、推進剤重量の軽量化と親機の着陸リスク低減が期待できる点で有望である。例えば、固体推進剤を利用した簡素なサンプル採取子機であるタッチアンドゴー(TAG)サンプリングブロープのシステムが現在検討されている[29]。ただし、子機自体が小型であっても、親機とのハード・ソフト面でのインターフェースは不可欠であり、システ

ム全体の設計コストが低いとは限らない点に注意を要する。

3.3 相対航法

小惑星表面に接近する運用を行う場合、往復伝搬遅延下での探査機安全性を担保するためには、自律的な対地(小惑星相対)航法が必要となる。とりわけ、サンプルリターンなど着陸を伴うミッションでは、精密な対地航法が要求される。対地航法には自然地形をトラッキングするものと、人工的なマーカーを利用するものとに大別される。前者の例がOSIRIS-RExのNatural Feature Trackingであり[30]、国内でもSLIMの月着陸でクレータを用いた画像照合航法が実証される予定である[31]。後者の例としては、はやぶさ・はやぶさ2のターゲットマーカーが挙げられる。はやぶさ2は、事前投下したターゲットマーカーを自律的に追跡することで、誤差60 cmという高精度の着陸に成功した[32]。近年の小天体探査で、「降りたい地点にピンポイントで降りる」技術が確立しつつあり、改良型のターゲットマーカーなど更なる性能向上が検討されている[33]。このような対地航法の要素技術は、上述の探査機間ランデブーにおける相対航法にも応用可能である。その他、オブザーバ機がターゲット機からのビーコンを受けて軌道推定を行う相対電波航法も検討されている[34]。この航法では、中程度の距離・中程度のリアルタイム性を期待でき、カメラやレーザー距離計による近距離航法と、レンジ・レンジレート計測やVLBIなどの長距離航法との中間の空間・時間領域において有効であると思われる。

3.4 地下探査

サンプルリターンにおいて宇宙風化の影響を受けていない試料の取得を目指す場合、小天体の地下物質へのアクセスは最重要課題である。その一つの手段として、はやぶさ2ミッションでは、衝突装置(SCI: Small Carry-on Impactor)を用いた衝突クレータリングにより地下物質を露出させる技術を実証した[35]。地下物質を直接採取する手法として、MMXミッションでは深さ2 cm以上を掘削可能なコアラーを採用している[36]。OKEANOSミッションでは、伸展式のニューマチック(空気式)サンプラーにより

最大深さ1 mの物質を採取するシステムを提案していた[37]. 未知天体の地下物質を直接採取する場合, 対象天体の機械的特性に関する不定性を考慮したシステム設計を要する. 間接的に小天体内部の全球的な物理特性を推定する手法として, 旧来の重力場に基づく測地学的アプローチに加えて, レーダーや地震波による探査システムの活用が国内で議論されている[38].

3.5 遠方探査

はやぶさ・はやぶさ2によるランデブー探査は地球近傍小惑星が対象であった. 今後, 日本の小天体探査で彗星やメインベルト以遠の小惑星をカバーするにあたって, より遠方を探査する技術の成熟が課題となる. 太陽距離・地球距離の大きい領域での探査機運用は, 電源系・通信系・熱系・推進系などあらゆるバスシステムでの対応を要する. OKEANOSでは, これらの課題を踏まえたミッション提案がなされた[39]. とりわけ, 高比推力の電気推進と大面積の薄膜太陽電池という基本構成は, 国内で遠方小天体の探査を実現するための一つの有力解と言える. スプリンターミーティングでは議論が及ばなかったが, 木星以遠での自在な探査を実現するためには, 熱源あるいは熱源からの熱電変換による発電技術としてのラジオアイソトープの取り扱い技術が必要となる. 特に米国の外惑星探査で238プルトニウムを熱源としたラジオアイソトープ電池(RTG)の多くの活用例がある反面, 国内の深宇宙探査での使用実績は未だない[40]. 日本としては, これら既存の枠組みに捕らわれることなく, 日本のミッション成立性にもっとも適した熱源および発電技術の検討が必要な時期にきていると考えられる[41]. 先述の深宇宙OTV構想(3.1章)では, 巡航ステージの化学推進モジュール共通化によって輸送コストを削減することで, 遠方天体へのアクセス性を高めることが期待されている[22]. 遠方天体からサンプルリターンする場合, ミッションの長期化は不可避である. したがって, 質量分析器を用いたその場分析などによって, 段階的に成果創出するための方策が重要となる[42].

3.6 フライバイ探査

ランデブー探査はエネルギーコストが大きいのに

対して, フライバイ探査であれば, 小型ミッションでの実施も十分可能である. その例が, 2024年に打ち上げられ, 小惑星フェートンを探査する予定のDESTINY⁺である[43, 44]. また近年, 小天体フライバイサイクラー軌道を用いて, 低燃費・高頻度に複数の小天体をフライバイする探査構想が提案されている[45]. さらに, 小天体フライバイサイクラー軌道に約10機の宇宙機を配置することで, 小天体マルチフライバイと小天体(恒星間天体等の太陽系外から飛来する天体を含む)即応型フライバイを同時に実現することも可能である[46]. 小天体は大多数の素性が未知であるため, フライバイ時に近接観測を行うだけでも, 科学的に重要な情報を得うる. 一方で, ランデブー探査と比して, フライバイ探査で得られる情報は, 時間的・空間的に大きく限定される. ゆえに, ランデブー探査計画との相乗効果を含めて, コストに見合う科学目標の見極めが肝要である. ダスト捕集ないしダストのその場解析技術は, フライバイで得られる科学情報の最大化に有効な技術だが, ダストとの相対速度が高速であるため, 利用可能な技術には制約がある. 一回きりのフライバイで理想的な観測ジオメトリ(相対位置・速度)を実現するためには, 後述の通り, 地上観測による小天体の軌道決定精度の向上が課題となる[47]. また, マルチ型即応型のフライバイ探査では太陽-地球-小惑星間の位置関係が様々な状況に対応した観測が必要であり, 太陽電池・アンテナ・観測機器などの幾何学関係を自在に変更できる可変構造宇宙機も有効な技術となり得る[48].

3.7 地上観測

ミッション設計を行う上で, 目標天体の軌道要素およびサイズ・形状・自転周期・自転軸方向などの物理特性は重要な情報となる. 小天体探査において, これらの情報が既知であることは必須とは限らないが, サイズの小さい小天体に関しては発見そのものが困難となる. 地球に接近する恐れのある小惑星を事前に発見する観点でも, 国内での地上観測が継続的に行われている[49]. 2021年にJAXA内でプラネタリーディフェンス検討チームが発足しており[50], 小惑星の地上観測における体制強化が期待される. 加えて, 近年では, 小天体による恒星食を複数地点で同時観測することで, 天体の形状や軌道を

制約する枠組みが構築されつつある。その一例が、DESTINY⁺ミッションに向けた小惑星フェートンの地上観測である[51, 52]³。このような地上観測との密な連携は、今後の小天体探査においてより一層重要となるであろう。

4. まとめと今後の展開

2022年度の小天体スプリンターミーティングでは小天体探査により解決し得る科学的課題、現状の技術的課題を列挙し、オリジナリティある日本の将来小天体探査を見据え議論を深めた。現時点の結論として、以下の見解が得られた。小天体サンプルリターンにおいては、帰還試料の貴重性がミッションを決める要になる。宇宙風化等の影響を受けない始原的な物質は更にその科学価値を高めるため、地下探査は極めて重要な技術である。探査ターゲットは彗星などの遠方天体が候補となり得るため、軌道間輸送機などによってミッションの実現性を高めることが必要であろう。一方で、多数の小天体の形成過程を大局的に理解したい場合は、フライバイ探査が強力な探査方法となる。ダスト補集による物質分析・彗星ガスの分析・小天体の形態学等が特に惑星科学の諸問題を解決する手掛かりとなる。フライバイ探査において理想的な観測ジオメトリを達成するために、地上観測との連携が不可欠である。

2022年度からは、ISASにおいて次なる彗星探査を目指す次世代小天体サンプルリターン計画のワーキンググループが本スプリンターミーティングの議論を軸として発足した。前述の通り、彗星探査によって解決し得る科学的課題は多様である。一方で、現状掲げられている様々な科学的課題に対し、探査の規模の枠組みに囚われず、あらゆる手段をもって解決を試みる事が重要である。例として、海外ミッションとの連携、プラズマ物理学等の宇宙物理学との連携が重要となる。また、隕石学、地上観測、衛星観測で解決し得る部分を探ることで、それぞれの研究分野を発展させながら課題解決に至ることが出来る。2023年度からの活動においては、関連分野との連携

を強め、より体系的に小天体探査の将来展望を設計することを目指す。

謝辞

PEWS 2022, SPS 2023で本スプリンターミーティングにご参加頂き、誠にありがとうございました。菅原春菜さん、鈴木志野さんには小天体スプリンターの運営でご支援頂きました。また招待講演を快く引き受けて頂いた荒井朋子さん、巽瑛理さん、兵頭龍樹さん、津田雄一さん、平林正稔さん、鈴木雄大さん、辰馬美沙子さん、森治さん、吉川健人さんには深く感謝致します。皆様のトークのおかげで、スプリンターミーティングでの議論の種を作ることが出来ました。同様に、Contributed talkとしてご講演頂いた皆様にも感謝致します。次年度以降も(主催者側も含む)皆様の積極的な参加をお待ちしております。最後に、編集長の三浦均さんをはじめとする編集委員の皆様、丁寧に査読をして頂いた渡邊誠一郎さん、本稿にご助言を頂いた曾根理嗣さん、SPS 2023を主催して頂いた笠羽康正さんに深く感謝申し上げます。

参考文献

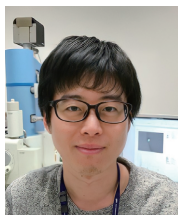
- [1] Usui, F. et al., 2019, Publ. Astron. Soc. Japan 71, 1.
- [2] Fischer-Gödde, M. et al., 2020, Nature 579, 240.
- [3] 塚本尚義ほか, 2022, 遊星人 31, 286.
- [4] 矢田達ほか, 2022, 遊星人 31, 165.
- [5] Hartogh, P. et al., 2011, Nature 478, 218.
- [6] Brownlee, D. et al., 2006, Science 314, 1711.
- [7] Sandford, S. A. et al., 2006, Science 314, 1720.
- [8] 黒川宏之ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [9] Altwegg, K. et al., 2015, Science 347, 1261952.
- [10] 鈴木雄大ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [11] 藤谷渉, 2016, 遊星人 25, 90.
- [12] Vernazza, P. et al., 2013, Icarus 225, 517.
- [13] Hyodo, R. et al., 2017, Arizona-JAXA workshop.
- [14] 辰馬美沙子ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [15] Tsujimoto, T., 2021, Astrophys. J. Lett. 920, 32.
- [16] Zinner, E., 2014, Treatise on Geochem. 2nd edition, 181.

³SPS 2023直後の2023年3月には、はやぶさ2拡張ミッションのフライバイターゲットである2001 CC21 の掩蔽観測にも成功している。

- [17] Oba, Y. et al., 2022, Nature comm. 13, 2008.
- [18] Oba, Y. et al., 2023, Nature comm. 14, 1292.
- [19] Altwegg, K. et al., 2016, Science Advances 2, 5.
- [20] Thomas, C.A. et al., 2023, Nature 616, 448.
- [21] 寫生有理ほか, 2021, 遊星人 30, 169.
- [22] 津田雄一ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [23] 佐伯孝尚ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [24] Takao, Y. et al., 2021, Acta Astronaut. 179, 172.
- [25] 吉光徹雄ほか, 2020, 日本ロボット学会誌 38, 8.
- [26] Ho, T. et al., 2021, Planet. Space Sci., 200, 105200.
- [27] Sawada, H. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 143.
- [28] Nagaoka, K. et al., 2022, Robotica 40, 2.
- [29] 大木春仁ほか, 2022, 宇宙科学技術連合講演会.
- [30] Norman, C.D. et al., 2022, Planet. Sci. J. 3, 101.
- [31] 植田聡史ほか, 2018, 航空宇宙技術 17, 45.
- [32] Kikuchi, S. et al., 2021, Icarus 358, 114220.
- [33] Kusumoto, T. et al., 2023, International Symposium on Space Tech. and Science.
- [34] 藤田雅大ほか, 2022, 宇宙科学技術連合講演会.
- [35] Arakawa, M. et al., 2020, Science 368, 6486.
- [36] Kawakatsu, Y. et al., 2023, Acta Astronaut. 202, 175.
- [37] Matsumoto, J. et al., 2018, JSASS Aerosp. Tech. Japan 16, 7.
- [38] 寫生有理ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [39] Mori, O. et al., 2020, Astrodynamics 4, 233.
- [40] 星野健ほか, 2009, 日本原子力学会誌 51, 3.
- [41] 曾根理嗣ほか, 2022, ISAS Planetary Exploration Workshop.
- [42] Okada, T. et al., 2018, Planet. Space Sci. 161, 99.
- [43] Arai, T. et al., 2018, Lunar and Planetary Sci. Conference.
- [44] Ozaki, N. et al., 2022, Acta Astronaut. 196, 42.
- [45] Ozaki, N. et al., 2022, J. Guid. Control Dyn. 45, 8.
- [46] Ozaki, N. et al., 2023, Planetary Defense Conference.
- [47] 三柘裕也ほか, 2023, 日本航空宇宙学会誌 71, 2.
- [48] Kubo, Y. et al., 2022, 73rd International Astronaut. Congress.
- [49] 奥村真一郎ほか, 2022, JAXA プラネタリーディフェンス・シンポジウム.
- [50] 吉川真ほか, 2022, JAXA プラネタリーディフェンス・シンポジウム.
- [51] Lazzarin, M. et al., 2019, Planet. Space Sci. 165, 115.
- [52] Yoshida, F. et al., 2023, Publ. Astron. Soc. Japan 75, 153.

著者紹介

深井 稜汰



宇宙航空研究開発機構 太陽系科学研究系 特任助教。地球外物質研究グループ、火星衛星探査計画 (MMX) プロジェクトチームをそれぞれ併任。2022年3月より現職。JAXAでのOSIRIS-REx

キュレーション活動のリードサイエンティストを務める。その他に、はやぶさ2・MMX・次世代小天体サンプルリターンでのキュレーション活動検討のリード、質量分析計を活用したキュレーション作業環境評価法の開発などを務めている。