

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03730

研究課題名(和文) 近地球小惑星の物理進化と力学進化を結合する観測的・数値的研究

研究課題名(英文) Observational and numerical studies that connect the physical and dynamical evolution of near-Earth asteroids

研究代表者

伊藤 孝士 (Ito, Takashi)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・講師

研究者番号：40280565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地球の近傍に飛来する近地球小惑星を主な研究対象とし、その力学進化と物理進化を解明すべき観測的・理論的な研究を行った。本研究の成果は多岐に渡るが、以下のような情報を得ることが出来た。広域に分布する小惑星のサイズ頻度分布とその日心距離依存性、太陽系小天体に共通する特徴である偏光現象とその物理的背景、メインベルト小惑星帯以遠に広がる小天体の自転速度分布とそれから推定される天体の密度、軌道傾斜角が大きな小天体に見られる近日点の秤動機構の実態とその要因の推測、等である。こうした知見は近地球小天体の研究のみならず広い意味での太陽系小天体研究、そして将来的な太陽系外小天体研究の基礎となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今の観測技術の発展や探査計画の進捗に伴い人間が持つ宇宙の認識、殊に私達が住むこの太陽系に関する認識は急速に広がった。太陽系には様々な種類の天体があるが、小惑星や彗星などの小天体は太陽系初期の情報をよく保存する貴重な試料であり、この認識拡大の時代に於いてそれらを研究する意義はかつてなく大きい。こうした意識は研究社会に於いて国際的に共通なものであり、こうした状況の下で太陽系小天体の観測的・理論的な研究は学术界のみならず社会的な知的好奇心からもその成果創出を強く要請される。本報告書に記述した私達の研究が生み出した成果の多くはそうした要請に正面から応えるものである。

研究成果の概要(英文)：The main focus of this study was on near-Earth asteroids that approach the Earth. We conducted observational and theoretical studies that should elucidate their dynamical and physical evolution. The results of this study are diverse, but the following information was obtained: Size-frequency distribution of widely distributed asteroids and its dependence on the heliocentric distance, polarimetric feature common to the solar system minor bodies and interpretation of their physical backgrounds, distribution of spin velocities of small bodies extending beyond the main asteroid belt and their estimated density, mechanism of the libration of perihelion observed in the motion of small bodies with large orbital inclination, and so on. These findings can serve as a basis not only for the study of near-Earth asteroids but also for the study of solar system and extra-solar system small bodies in a broader sense.

研究分野：太陽系力学

キーワード：小惑星 彗星 太陽系力学 光学観測 偏光観測 サイズ頻度分布

1. 研究開始当初の背景

昨今の観測技術の発展や探査計画の進捗に伴い人間が持つ宇宙の認識、殊に私達が住むこの太陽系に関する認識は急速に広がった。太陽系には様々な種類の天体があるが、小惑星や彗星などの小天体は太陽系初期の情報をよく保存する貴重な試料であり、この認識拡大の時代に於いてそれらを研究する意義は嘗てなく大きい。こうした意識は研究社会に於いて国際的に共通なものとなっており、私達はこの背景の下で本研究を開始するに至った。

2. 研究の目的

小惑星や彗星などの小天体は太陽系の各所で形成し、その後時間をかけて動径方向へ拡散した。その中でも近地球小惑星は太陽系進化の履歴を背負ったまま地球の近傍を飛び交う貴重な天体である。近地球小惑星の多くがメインベルト(火星と木星の間に存在するもの。以下では「主帯」と記す)に起源を持つ事は知られるが、それらが地球近辺に達して以降の進化については未だ断片的な見識しか無く、不明点が多い。太陽系の内側では太陽加熱や惑星潮汐力が強く働くので、単純な力学計算のみでは天体の進化を解き明かせない。

本研究では近地球小惑星が近地球領域で経験した進化の痕跡を光学観測と数値実験により系統的に取得することをひとつの大きな目的とした。とりわけ太陽加熱による変成・分裂・宇宙風化、および惑星との潮汐作用による表面色の変化を観測により検出し、どの軌道にある天体がどの作用を受けてどう進化したかの証拠を定量的かつ系統的に得る。これは近地球小惑星の進化の後半を暴く研究である。天体の起源(進化の前半)に関する従来の研究と接続する事で、近地球小惑星の誕生から終焉に至る進化の全貌解明の一助とする。

一般的に言えば小天体は太陽系の最初期の情報を保持したまま「凍結保存」された存在であり、地球などの惑星を形成した部材の残片でもある。特に近地球小惑星は太陽系の様々な場所から飛来し、太陽系進化の履歴を背負う天体であると考えられる。その学術的な重要性は以下の二点に於いて高い。まず、近地球小惑星が具体的にいつどこから地球近辺にやって来たかを知れば、惑星を構成する物質の空間分布が太陽系史に於いてどのように変化したのかに関する基礎データの獲得に繋がる。そうしたデータは近年目覚ましい発展を遂げている太陽系外惑星の研究にも大きく貢献するだろうし、小天体が運搬したとされる有機物質の研究を通して生命の起源に迫る方途ともなる。また、近地球小惑星は地球などの惑星と衝突を繰り返して来たことも重要である。近地球小惑星の起源と進化をよく理解し、惑星との衝突確率やその変遷を知る事は、惑星の進化環境を知ることに繋がる。

3. 研究の方法

近地球小惑星の力学進化は1990年代から理解が進み、主帯にある小惑星が主な起源である事が知られている。だが主帯にある小惑星と近地球小惑星には様々な差異があり、その要因が解明されたとは到底言えない。例えば主帯小惑星と近地球小惑星のサイズ分布は大きく異なり、輸送に際して何らかの選別が働いた事を示唆する。また近地球小惑星の速度分布を反映する月クレーター分布の非対称性も、主帯小惑星の単純な輸送のみを考えた理論値は実際の観測値と整合しない。そして主帯小惑星と近地球小惑星では分光型の分布にも顕著な差異があり、主帯小惑星がそのまま近地球小惑星になる訳では無いと思料される。そこには近地球小惑星が近地球領域に於いて経験する多様な物理過程が働く。惑星との接近による潮汐破壊や分裂・表面色変化、太陽との接近による変成・宇宙風化・破壊、YORPと呼ばれる非重力効果による自転の加減速、等である。これらの素過程には各々の理論や観測的証拠があるが、それらは未だ著しく断片的であり、系統的では無い。時系列としての各天体の力学進化とも定量的には結合しない。近地球小惑星は近地球領域に於いてどう物理進化するのか？それは力学進化の時系列とどう結合されるのか？これが本研究の問いであり、中心となる研究手法は幾種かの光学観測である。観測対象の抽出のため、軌道進化の数値実験も実施する。

近地球小惑星は既に2万個近くが発見されているので、私達はまず光学観測を実施すべき天体を選別する。そのため既知の全ての近地球小惑星の軌道を過去方向に伝播させ、太陽・惑星との近接遭遇履歴を算出する。太陽・惑星との接近履歴が著しい天体を抽出したら、それらの光学観測を行う。まず履歴の上位を占める候補天体の多色測光観測を実施し、表面色の頻度分布を調べる。主帯小惑星については表面色(分光型)の分布が詳しく研究されている。本研究では、太陽や惑星との強い接近遭遇を経た近地球小惑星群が主帯小惑星の表面色分布をどこまで反映しているかを検証する。もし特定の軌道進化経路を辿った天体群が特定の色分布を有するならば、それは太陽加熱や惑星潮汐力が近地球小惑星の物理進化の重要な因子である事の実証となる。

多色測光観測を実施する際にはまた、時間分解能の高い連続測光を行って光度曲線を取得し、天体表面での色の不均質の有無を探る。表面色の不均質を持つ天体はかつて破壊・分裂・強い変成など激しいイベントを経験した可能性が高く、それが何だったのかを軌道進化の履歴と照合

して推定する。またそうした天体は破片を持つ可能性も高く、力学計算を更に進めて破片天体を探索する動機付けにもなる。観測候補天体の中でも著しい太陽接近履歴を持つと推定されるものには、上記した多色測光と同時期に高分散の分光観測をも実施し、スペクトルの時間変化を見る。また試料の加熱によるスペクトル変化の測定は隕石を対象とした室内実験でも多く行われており、その結果との比較を目指す。

4. 研究成果

研究期間内に於ける本研究の成果は多岐に渡るが、代表的なものとして以下の四件を報告する。これらは近地球小天体に限らず広い意味での太陽系小天体に関するものであり、将来的な小天体研究の基礎を構成する情報となり得る。

(1) 太陽系の広い範囲に分布する小天体のサイズ頻度分布の比較 (文献 [1])

本研究計画を開始する以前より、私達は国立天文台すばる望遠鏡の主焦点カメラを用いて主帯小惑星・ヒルダ群小惑星・木星トロヤ群天体のサイズ頻度分布を取得して来た。その総括と言える結果を本研究期間内に出版できたので、以下ではこれについて記す。

すばる望遠鏡の大きな口径と主焦点カメラの広い視野のおかげで、これまで私達は実視等級で 24.4-24.5 (Rc バンド) までの小天体を検出できた。これは主帯で言えば直径 1 km 未満の天体に相当し、ヒルダ群や木星トロヤ群に於いては直径約 1 km の天体に相当する。私達の観測結果と先行研究の公開データを組み合わせるとサイズ頻度分布曲線を再構築したところ、木星トロヤ群とヒルダ群のサイズ頻度分布は天体サイズの⁻³乗にほぼ比例するのに対し、主帯小惑星のそれは天体サイズの⁻³乗から逸脱する領域が多いことが分かった。

また主帯の内側・中間・外側領域における小惑星のサイズ頻度分布を詳細に比較すると、太陽からの距離によりサイズ頻度分布曲線の形状が徐々に変化することが分かった。この傾向は主帯を越えた領域でも続き、ヒルダ群や木星トロヤ群のサイズ頻度分布へと滑らかに接続する。

最近の惑星移動モデルによれば現在の木星トロヤ群天体は海王星軌道を横断する領域で形成され、惑星移動の際に現在の軌道に捕獲されたことが示唆されている。主帯の内側から木星トロヤ群にかけてサイズ頻度分布が徐々に変化することは、太陽系史の初期に海王星以遠天体 (TNO) が木星トロヤ群領域や主帯の外側へ流入していた可能性を示唆する。今後はこの仮説を更に検証するため、私達は TNO のサイズ頻度分布を系統的に得る観測に取り組む予定である。またサイズの小さな天体の進化には重力的な要因のみならず衝突破壊過程や非重力効果も寄与し得る。よって、それらの効果の考慮やモデルへの取り込みも将来の課題である。

(2) 高ケイデンス観測による小天体の自転速度分布の測定 (文献 [2,3])

本研究の期間中、代表者および分担者は国立天文台のすばる望遠鏡を使った FOSSIL survey (The Formation of the Outer Solar System: an Icy Legacy) に主要な役割を持って参加した。FOSSIL はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた国際的なサーベイ観測計画である。FOSSIL の目的は木星トロヤ群と TNO 領域にある小天体の様々な軌道分布や物理的特徴を把握することである。特にその初期段階ではヒルダ群天体や木星トロヤ群天体の光度曲線を高ケイデンスで取得し、その自転周期の測定を試みる。

本研究の期間中に取得された観測データから、私達は 53 個の小さな木星トロヤ群天体の自転周期を導出した。直径 10 km より小さな木星トロヤ群の自転周期が測定されたのはこれが世界初である。その結果、自転周期の下限値 (自転速度の上限値に相当する) はかつて大型のトロヤ群天体に関して測定されていた数値より小さく、約 4 時間であることが分かった。木星トロヤ群天体がラブルパイル構造を持つと仮定すれば、周期 4 時間という高速な自転に (自己分裂せずに) 持ち堪えるには約 0.9 g cm^{-3} の密度が必要となる。ヒルダ群天体については 17 個 (直径 1-3 km) の自転周期が得られた。これを先行研究の結果と併わせると、自転周期値の下限は約 3 時間と推定される。ヒルダ群天体がラブルパイル構造を持つと仮定すれば、周期 3 時間という高速な自転に (自己分裂せずに) 持ち堪えるには約 1.5 g cm^{-3} の密度が必要となる。この値は典型的な C 型小惑星の密度 (1.33 g cm^{-3}) とほぼ同じであり、木星トロヤ群のそれよりも高い。更には周期 1.633 時間という超高速で自転を行うヒルダ群天体も発見された。

(3) 特異な近地球小惑星 Phaethon の高い直線偏光度 (文献 [4])

小惑星 (3200) Phaethon は直径 6 km 程度の近地球小惑星であり、幾つかの特筆すべき性質を有する。まずその軌道は大きな離心率と軌道傾斜角を持つ。また Phaethon は非常に青いスペクトルを持ち、B 型または F 型に分類される。更に Phaethon は少なくとも一つの分裂破片を持ち、かつての分裂破壊の痕跡として Phaethon はその表面に不均質性を見せる。このように複数の興味深い特徴を持つ Phaethon は近地球小惑星一般の軌道進化、熱進化、そして物質進化を理解する上で重要な鍵を握る天体であり、JAXA のフライバイ探査の対象ともなっている。私達は Phaethon の可視偏光観測を実施した。その結果、Phaethon 表面の直線偏光度は 50% 以上という非常に大きな値であることが判明した。この数値は小惑星や彗星といった区別を超え、これまでに観測された太陽系小天体の直線偏光度として史上最大級のものである。

この高い直線偏光度は Phaethon の表面状態に起因すると私達は考えている。天体表面が示

す偏光度は一般に、そこにあるレゴリス粒子の大きさ（粒径）に強く依存する。各種のレゴリス試料を用いた室内実験から、レゴリスはその粒径が大きいほど偏光度が大きくなる傾向が知られており、物理的な解釈も成立している。天体表面にあるレゴリスの平均的な粒径が大きい（粗い）場合、単位量の光学的な厚みを達成するために必要な粒子の数は少なく済む。逆に天体表面にあるレゴリスの平均的な粒径が小さい（細かい）場合、単位量の光学的な厚みを達成するためには数多くの粒子を必要とする。入射光が或る光学的厚みを持つ領域を通る際に遭遇するレゴリス粒子が少なければ少ないほど多重散乱の度合は低く、従って強い直線偏光度が示される。Phaethon 表面ではこうした状況が生じている可能性がある。

室内実験から得られた経験式のひとつに Phaethon の直線偏光度の数値を適用すると、この天体表面を覆うレゴリスの平均的な粒径は 360 μm 以上と推定される。この粒径はかつての室内実験で使われたレゴリス試料の中でも最大級のものであり、月表面から持ち帰ったレゴリスの粒径（最大でも 50 μm ）と比べても有意に大きい。その理由を私達は以下のように推定している。Phaethon はその軌道の形により、太陽の近傍を定期的に通過する。この時、この天体は太陽からの加熱や輻射圧の影響を強く受ける。こうした強い加熱により天体表面のレゴリスが焼結し、粗い粒子が形成される。また、太陽からの輻射圧の影響を受けやすい微細な粒子が天体表面から選択的に離脱することもある。そして Phaethon 表面には粗い粒子だけが残される。

(4) 軌道傾斜角が大きな小天体の近日点引数の秤動要因 (文献 [5])

近地球小天体には軌道傾斜角が大きなものが多く、その運動は独特な性質を持つ。特に近日点引数の秤動 (libration) は軌道傾斜角が大きな天体に固有なものであり、それは太陽系内側に於いてみならず太陽系外縁部の天体にもしばしば見られる。TNO のひとつである冥王星もその例であり、私達はその軌道特性を理論的に解明することを目指した。冥王星およびその眷属である Plutinos の奇妙な軌道特性の多くは太陽系初期段階における巨大惑星の軌道移動の証拠として広く受け入れられている。だが、その実態の大部分は未だ謎に包まれている。

冥王星の運動の長期安定性はその軌道の特性により支えられている。その特性とは、この天体の近日点の秤動に関するものである。私達は冥王星の近日点の運動に関する巨大惑星の個別的・集団的な重力効果を明らかにすることを目的とし、系統的な数値実験を行った。その結果、海王星からの共鳴摂動が冥王星の近日点を方位角方向に拘束することを見出した。その一方で、冥王星の近日点が緯度方向に拘束される現象（即ち近日点の秤動）は海王星以外の惑星の影響（強制力）が強い場合に限られることも判明した。この強制力は巨大惑星の現在の軌道構造から偶然に生じているものである。そして木星は冥王星の軌道を安定化させる効果を持ち、天王星は冥王星の軌道を不安定化させる効果を持つことも分かった。

冥王星の近日点の秤動の詳細の解明は終わった訳では無い。観測的見地で言えば、Plutinos の相当な割合が冥王星と同様に近日点の秤動を示すとされる。つまり、冥王星の近日点の運動には軌道傾斜角が大きな天体を持つ一般的な性質が包含される。現時点で私達の力学モデルには海王星以外の天体の重力や天体衝突の影響、未発見の遠方天体の影響、恒星の接近による擾乱の影響が未だ取り込まれていない。今後はこのような効果を取り込んだ力学モデルの構築を進め、軌道傾斜角が大きな天体の運動論の一般化に寄与する理論の構築を目指す。

<文献>

1. Fumi Yoshida, Tsuyoshi Terai, Takashi Ito, et al., "A comparative study of size frequency distributions of Jupiter Trojans, Hildas and main belt asteroids: A clue to planet migration history", *Planetary and Space Science*, 169, 78-85, 2019.
2. Chan-Kao Chang, Ying-Tung Chen, Wesley C. Fraser, Fumi Yoshida, Matthew J. Lehner, Shiang-Yu Wang, JJ Kavelaars, Rosemary E. Pike, Mike Alexandersen, Takashi Ito, et al., The FOSSIL Collaboration "FOSSIL: I. The spin rate limit of Jupiter Trojans", *The Planetary Science Journal*, 2, 191, 2021.
3. Chan-Kao Chang, Ying-Tung Chen, Wesley C. Fraser, Matthew J. Lehner, Shiang-Yu Wang, Mike Alexandersen, Young-Jun Choi, A. Paula Granados Contreras, Takashi Ito, et al., The FOSSIL Collaboration, "FOSSIL: II. The rotation periods of small-sized Hilda asteroids", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 259, 7, 2022.
4. Takashi Ito, Masateru Ishiguro, Tomoko Arai, et al., "Extremely strong polarization of an active asteroid (3200) Phaethon", *Nature Communications*, 9, id. 2486, 2018.
5. Renu Malhotra and Takashi Ito, "Pluto near the edge of chaos", *Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A. (PNAS)*, 119, issue 15, e2118692119, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件/うち国際共著 12件/うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Katsuhito Ohtsuka, Takashi Ito, Daisuke Kinoshita, Shinsuke Abe, Kyosuke Sawai, Kazuhiro Funabashi, Ryo Kato, Seidai Miyasaka, Sunao Hasegawa, Tomoki Nakamura, Wen-Ping Chen	4. 巻 191
2. 論文標題 Full rotationally phase-resolved visible reflectance spectroscopy of 3200 Phaethon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2020.104940	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takashi Ito and Katsuhito Ohtsuka	4. 巻 7
2. 論文標題 The Lidov-Kozai oscillation and Hugo von Zeipel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monogr. Environ. Earth Planets	6. 最初と最後の頁 1-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5047/meep.2019.00701.0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Patrik Sofia Lykawka and Takashi Ito	4. 巻 883
2. 論文標題 Constraining the formation of the four terrestrial planets in the solar system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3b0a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Melaine Saillenfest, Marc Fouchard, Takashi Ito, Arika Higuchi	4. 巻 629
2. 論文標題 Chaos in the inert Oort cloud	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astron. Astrophys.	6. 最初と最後の頁 A95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sunao Hasegawa, Takahiro Hiroi, Katsuhito Ohtsuka, Masateru Ishiguro, Daisuke Kuroda, Takashi Ito, Sho Sasaki	4. 巻 71
2. 論文標題 Q-type asteroids: Possibility of non-fresh weathered surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 脇田茂・瀧哲朗・伊藤孝士	4. 巻 28
2. 論文標題 活動的小惑星の理解に向けて	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 遊・星・人 (日本惑星科学会誌)	6. 最初と最後の頁 124-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Ito, Masateru Ishiguro, Tomoko Arai, Masataka Imai, Tomohiko Sekiguchi, Yoonsoo P. Bach, Yuna G. Kwon, Masanori Kobayashi, Ryo Ishimaru, Hiroyuki Naito, Makoto Watanabe, and Kiyoshi Kuramoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Extremely strong polarization of an active asteroid (3200) Phaethon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-04727-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fumi Yoshida, Tsuyoshi Terai, Takashi Ito, Keiji Ohtsuki, Patryk Sofia Lykawka, Takahiro Hiroi, Naruhisa Takato	4. 巻 169
2. 論文標題 A comparative study of size frequency distributions of Jupiter Trojans, Hildas and main belt asteroids: A clue to planet migration history	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 78-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2019.02.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Toshinori Ikenaga, Yohei Sugimoto, Matteo Ceriotti, Makoto Yoshikawa, Toshifumi Yanagisawa, Hitoshi Ikeda, Nobuaki Ishii, Takashi Ito, Masayoshi Utashima	4. 巻 156
2. 論文標題 A concept of hazardous NEO detection and impact warning system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 284-296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2018.06.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Marc Fouchard, Arika Higuchi, Takashi Ito, Maquet Lucie	4. 巻 620
2. 論文標題 The 'memory' of the Oort cloud	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M.-J.Kim, H.-J.Lee, S.-M.Lee, D.-H.Kim, S.-M.Lee, F.Yoshida, P.Bartczak, G.Dudzinski, J.Park, Y.-J.Choi, H.-K.Moon, H.-S.Yim, J.Choi, E.-J.Choi, J.-N.Yoon, A.Serebryanskiy, M.Krugov, I.Reva, K.E.Ergashev, O.Burkhonov, S.A.Ehgamberdiev, Y.Turayev, Z.-Y.Lin, T.Arai, K.Ohtsuka, T.Ito, S.Urakawa, and M.Ishiguro	4. 巻 619
2. 論文標題 Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chang Chan-Kao, Chen Ying-Tung, Fraser Wesley C., Yoshida Fumi, Lehner Matthew J., Wang Shiang-Yu, Kavelaars JJ, Pike Rosemary E., Alexandersen Mike, Ito Takashi, 他18名	4. 巻 2
2. 論文標題 FOSSIL: I. The spin rate limit of Jupiter Trojans	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Planetary Science Journal	6. 最初と最後の頁 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/PSJ/ac13a4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishiguro Masateru, Bach Yoonsoo P, Geem Jooyeon, Naito Hiroyuki, Kuroda Daisuke, Im Myungshin, Lee Myung Gyon, Seo Jinguk, Jin Sunho, Kwon Yuna G, Oono Tatsuharu, Takagi Seiko, Sato Mitsuteru, Kuramoto Kiyoshi, Ito Takashi, Hasegawa Sunao, Yoshida Fumi, 他12名	4. 巻 509
2. 論文標題 Polarimetric properties of the near-Sun asteroid (155140) 2005 UD in comparison with other asteroids and meteoritic samples	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4128-4142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chang Chan-Kao, Chen Ying-Tung, Fraser Wesley C., Lehner Matthew J., Wang Shiang-Yu, Alexandersen Mike, Choi Young-Jun, Granados Contreras A. Paula, Ito Takashi, (この間に16名), Yoshida Fumi, 他2名	4. 巻 259
2. 論文標題 FOSSIL. II. The Rotation Periods of Small-sized Hilda Asteroids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac50ac	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Malhotra Renu, Ito Takashi	4. 巻 119
2. 論文標題 Pluto near the edge of chaos	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2118692119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2118692119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 T. Arai, F. Yoshida, M. Kobayashi, K. Ishibashi, H. Kimura, T. Hirai, P. Hong, K. Wada, H. Senshu, M. Yamada, R. Srama, H. Kruger, M. Ishiguro, H. Yabuta, T. Nakamura, S. Kobayashi, J. Watanabe, Takashi Ito, T., and 28 more
2. 発表標題 Current status of DESTINY+ and updated understanding of its target asteroid (3200) Phaethon
3. 学会等名 52th Lunar and Planetary Science Conference, 15-19 March, 2021, Virtual Conference (LPI Contribution no. 2548) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Ito and Arika Higuchi
2. 発表標題 Dynamical lifetime of the Oort Cloud new comets under planetary perturbation
3. 学会等名 DPS/AAS (AAS Division for Planetary Sciences) 52nd Annual Meeting, Virtual, 2020 October 26-30, 304.07 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fumi Yoshida, Takashi Ito, Seitaro Urakawa, Tsuyoshi Terai, Nozomu Tominaga, Tomoki Morokuma, Shigeyuki Sako, Ryou Ohsawa, Masaomi Tanaka, Ryo Hamasaki, Tomo-e Gozen collaboration
2. 発表標題 Phase curves of > 40,000 small solar system bodies obtained by the Tomo-e Gozen transient survey
3. 学会等名 DPS/AAS (AAS Division for Planetary Sciences) 52nd Annual Meeting, Virtual, 2020 October 26-30, 208.06 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Ito and Katsuhito Ohtsuka
2. 発表標題 The Lidov-Kozai oscillation and Hugo von Zeipel
3. 学会等名 EPSC 2020, held 21 September - 9 October 2020, Virtual, EPSC2020-269 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Ito and Arika Higuchi
2. 発表標題 Comparison of original orbits of Oort Cloud new comets given in various catalogues
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual, July 12-16, 2020, PPS07-P22 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Ito
2. 発表標題 Observation of dark comets using Subaru Telescope
3. 学会等名 The outer solar system: dynamics, formation and observation, held 28-30 October 2019 at University of Turin, Turin, Italy. (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ito
2. 発表標題 The different catalogues of comets
3. 学会等名 The outer solar system: dynamics, formation and observation, held 28-30 October 2019 at University of Turin, Turin, Italy. (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arika Higuchi, Marc Fouchard, Takashi Ito, and Lucie Maquet
2. 発表標題 Looking for a primordial fingerprint in known Long Period Comets
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15-20 September 2019 at Centre International de Conferences de Geneve (CICG), Geneva, Switzerland, EPSC-DPS2019-1432 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口有理可・伊藤孝士・Marc Fouchard・Melaine Saillenfest・Lucie Maquet
2. 発表標題 長周期彗星の分布を用いたオールト雲形成仮説の検証
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会, 070, 2019年10月7日(月)-9日(水), 京都産業大学 神山ホール.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ito, Arika Higuchi
2. 発表標題 lifetime of the Oort Cloud new comets under planetary perturbation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会, PPS03-P05, 2019年5月29日(水) 15:30-17:00 ポスター会場 (幕張メッセ国際展示場 8ホール), 全開催期間 2019年5月26-30日。(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤孝士、石黒正晃、荒井朋子、今井正堯、関口朋彦、Bach Yoonsoo P.、Kwon Yuna G.、小林正規、石丸亮、内藤博之、渡辺誠、倉本圭
2. 発表標題 2016年秋の(3200) Phaethon偏光観測結果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wesley C Fraser, JJ. Kavelaars, Lowell Peltier, Simon Porter, Hsing Wen Lin, John Spencer, Anne Verbiscer, Fumi Yoshida, Takashi Ito, 他16名と1チーム
2. 発表標題 A successful machine learning approach to detecting Kuiper Belt Objects for NASA's New Horizons Extended Mission
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (LPSC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wesley C Fraser, JJ. Kavelaars, Simon Porter, Hsing Wen Lin, John Spencer, Anne Verbiscer, Fumi Yoshida, Takashi Ito, 他8名と2チーム
2. 発表標題 A machine learning approach to detecting Kuiper Belt Objects for NASA's New Horizons Extended Mission
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 JJ Kavelaars、Wesley C Fraser、Simon Porter、Hsing Wen Lin、John Spencer、Anne Verbiscer、Fumi Yoshida、Takashi Ito、他8名と1チーム
2. 発表標題 The New Horizons search for distant KBOs
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Ito
2. 発表標題 Comparison of original orbits of Oort Cloud new comets given in various catalogues II. Different solutions from different observations
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤孝士、樋口有理可
2. 発表標題 オールト雲起源新彗星の力学進化 10. 他の小天体群への遷移
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 二美 (Yoshida Fumi) (20399306)	産業医科大学・医学部・助教 (37116)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	樋口 有理可 (Higuchi Arika) (90597139)	産業医科大学・医学部・助教 (37116)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
台湾	國立中央大學			
米国	Southwest Research Institute	University of Arizona	University of Michigan	他3機関
フランス	Lillie University	Observatoire de Paris		
イタリア	National Institute of astrophysics	Observatory of Turin		
スウェーデン	Universite de Uppsala			
ロシア連邦	Institute of Astronomy			
韓国	ソウル国立大学			