

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03716

研究課題名(和文) 太陽系における衛星系の特徴と多様性の起源の解明

研究課題名(英文) Satellite systems in the Solar System: Origin of their characteristics and diversity

研究代表者

大槻 圭史(Ohtsuki, Keiji)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：00250910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：土星探査機カッシーニは、巨大惑星の衛星と環の起源進化について数多くの新たな発見をもたらした。本研究はこの探査機による最新の成果も念頭に置いた理論研究を進め、土星リングと羊飼衛星の起源を解明し、巨大惑星とケンタウルス族天体の環の起源について考察した。また巨大惑星の周りのガス円盤は規則衛星の材料となる固体を捕獲するが、不規則衛星の起源はこれだけでは説明が難しいことを示した。さらに不規則衛星の起源と関連して、すばる望遠鏡を用いた太陽系小天体の表面特性に関する観測的研究を実施し、氷小天体が太陽系外縁領域から巨大惑星領域へ輸送されたとするモデルを支持する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土星のFリングは1979年に探査機パイオニア11号により発見されたが、その起源は不明であった。本研究ではこの一見、奇妙に見える環は、土星の周りの衛星形成過程の自然な副産物として説明できることを世界で初めて示し、衛星と環の起源は密接に関連していることを明らかにした。さらに、巨大惑星の環やケンタウルス族天体と呼ばれる小天体の環の起源を考察することにより、環の研究が太陽系進化の解明に大きく貢献し得ることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Observations by the Cassini spacecraft brought abundant new insights about the origin and evolution of ring-satellite systems of giant planets. With these new data in hand, we carried out theoretical studies on ring-satellite systems of giant planets. We developed a new model for the origin of Saturn's F ring and its shepherd satellites, and also carried out new simulations for the origin of rings of giant planets as well as rings of Centaurs. We also found that the gas disk around a growing giant planet can capture building blocks of regular satellites, but that it is difficult to explain the origin of irregular satellites by this mechanism alone. In relation to the origin of irregular satellites of giant planets, we also examined surface properties of small bodies in the outer Solar System using data obtained by the Subaru Telescope, and obtained results that support transportation of small icy bodies from the trans-Neptunian region into the giant planet region.

研究分野：惑星科学

キーワード：衛星形成 惑星リング 巨大惑星 太陽系小天体 惑星形成

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当初は、2004年に土星に到着した探査機カッシーニによる土星の衛星・リング系の詳細な観測が進み、それに伴って衛星形成とリングの起源についての研究も大きく進展しつつある状況であった。そのような中で、研究代表者らのグループでも軌道計算を中心として、巨大惑星による微惑星の一時捕獲 (Suetsugu, Ohtsuki et al. 2012, Suetsugu & Ohtsuki 2013)、周惑星円盤による微惑星捕獲 (Fujita, Ohtsuki et al. 2013)、惑星潮汐場での小衛星の衝突破壊過程 (Hyodo & Ohtsuki 2014)、リング中での小衛星による粒子集積過程 (Ohtsuki, Yasui, Daisaka 2013; Yasui, Ohtsuki, Daisaka 2014)、周惑星粒子円盤からの複数衛星の集積過程 (Hyodo, Ohtsuki et al. 2015) 等の研究を進めているところであった。一方、すばる望遠鏡では新たに開発された広視野カメラの本格的稼働が始まったばかりであった。そこで、衛星・リング系の起源と太陽系小天体の輸送という太陽系進化における重要な問題を、異なる手法を融合させて取り組むことを目的として、本研究は開始した。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は以下のとおりである。(1) 周惑星粒子円盤から複数の衛星が形成されるというモデルの中で、土星の F リングと羊飼衛星という一見特異に見える系の形成がどのように説明できるか明らかにすること、(2) 複数衛星系を作る母体となった周惑星粒子円盤の起源を明らかにすること、(3) 巨大惑星の規則衛星の起源に関して、衛星材料物質の供給過程を明らかにすること、(4) 巨大惑星の不規則衛星の起源に対して新たな制約を得ること、(5) 巨大惑星の不規則衛星の起源と関連して、太陽系小天体の太陽系内での輸送過程への制約を観測的研究から与えること、(6) これらを総合し、太陽系における衛星・リング系の特徴と多様性の起源を探査機による最新の観測データも含めて統一的に理解すること。

3. 研究の方法

本研究では主として次のような研究手法を用いた。(1) 相互重力及び衝突を考慮した N 体シミュレーション: 計算には神戸大学及び国立天文台で所有する専用計算機を用いた。さらに、共同研究者の協力を得て、潮汐破壊過程のシミュレーションも実施した。(2) ガス抵抗を考慮した三体問題軌道計算: ガスの密度・速度の分布としては、惑星重力圏内に入る前に受けるガス抵抗の影響は無視できる大きな微惑星については、軸対称の周惑星円盤を仮定し、それが無視できない小粒子の場合については、惑星周囲のガス流を詳細に調べた流体シミュレーションの結果を直接利用した。(3) すばる望遠鏡による観測データ解析: すばる望遠鏡による木星不規則衛星の分光観測を実施したほか、不規則衛星の起源と関連する太陽系小天体の輸送に関して、同望遠鏡で得られた太陽系小天体の測光観測データを解析する研究を複数実施した。

4. 研究成果

(1) 土星の F リングと羊飼衛星の起源に関する研究を実施した。土星の F リングは主要リングのすぐ外側にある細いリングで2つの羊飼衛星を伴っている。これらは探査機ボイジャー、カッシーニにより詳細に観測されてきたが、起源は不明であった。一方、我々の研究 (Hyodo, Ohtsuki, Takeda 2015) を含む最近の衛星形成理論より、現在のリングより質量の大きなリングがかつて惑星の周りにあり、巨大惑星近傍の衛星はそこから拡散した粒子が集まって形成されたと考えられ、衛星形成過程の最終段階では、小さな衛星が近い軌道に複数形成され得る。また、土星探査機カッシーニによる観測から、主要リング外縁付近にある小衛星は密度の高い核を持つことが示唆されていた。我々は、核を持たないアグリゲイトが F リングに相当する軌道付近で衝突した場合の破壊過程については以前に調べていた (Hyodo & Ohtsuki 2014) が、核を持つ場合については不明であった。そこで本研究では、密度の高い核を持つ小衛星同士が衝突する過程について、数値シミュレーションを用いて詳しく調べた。計算によると、多くの場合で小衛星のマントル部分は破壊されてばらばらになる一方、密度の高い核部分は強い重力のために壊れずに残る。破壊された小粒子群は F リングとなり、残った二つの核を中心とする部分が羊飼衛星になったと考えられる。この結果より、F リングとその羊飼衛星は、土星衛星系の形成過程の最終段階で、自然な副産物として形成されたことが示唆される。本研究の結果は雑誌 Nature Geoscience に投稿、掲載された (Hyodo & Ohtsuki 2015)。

(2) 土星の環の起源に関する研究を実施した。観測によると、土星リング粒子は95%以上が氷から成る一方、天王星や海王星のリングは暗く粒子に岩石成分を含む可能性が示唆されている。惑星リングは望遠鏡・探査機による観測がされてきたがその起源には不明な部分が多く、多様性の原因も説明できていなかった。そこで本研究ではまず、太陽系進化の中で起きると考えられている巨大惑星の軌道不安定期に、大きなサイズの太陽系外縁天体が巨大惑星近傍を通過する確率を見積もり、土星、天王星、海王星は、少なくとも数回のそのような大きな天体の近接遭遇を経験することを示した。次に、そのような天体が巨大惑星の近傍を通過する際に惑星からの潮汐

力を受けて破壊される過程を、シミュレーションによって調べた。その結果、多くの場合で環の形成に十分な量の破片が巨大惑星周りに捕獲されることがわかった。さらに捕獲後の破片の長期的な進化を調べ、捕獲直後には数キロメートルであった破片は相互衝突を繰り返すことにより徐々に粉々になるとともに軌道は円軌道に近づき、現在観測されるリングのような系を形成し得ることを示した。本研究のモデルは、土星と天王星の環の組成の違いも説明できる。天王星や海王星は土星に比べて惑星本体の密度が大きいいため、惑星からの重力の影響を強く受ける、ごく近傍を通過する遭遇が可能である。この場合、惑星近傍を通過する太陽系外縁天体が内側に岩石核、外側に氷マントルという二層構造をもっていれば岩石核まで破壊・捕獲され、岩石成分も含むリングが形成される。一方、惑星自身の密度が低い土星の場合は、そのように重力を強く受ける近接遭遇をしようとする土星本体に衝突してしまう。このため通過する天体の氷マントルのみが破壊され、氷から成るリングが形成されたと考えられる。本研究の結果は雑誌 *Icarus* に投稿、掲載された (Hyodo, Charnoz, Ohtsuki, Genda 2017)。

(3) 木星と海王星の間の軌道にあるケンタウルス族と呼ばれる小天体もつリングの起源に関する研究を実施した。従来、太陽系内でリングをもつ天体は、土星や木星など4つの巨大惑星だけだと考えられていたが、2014年にケンタウルス族天体の一つであるカリクロの周りにリングが発見され、さらにその後、別のケンタウルス族天体であるキロンにもリングがあるらしいことが明らかになったが、これらのリングの起源は不明であった。そこで(2)と同様の手法を用いて、ケンタウルス族天体が惑星との遭遇により潮汐破壊を受ける過程を調べた。その結果、ケンタウルス族天体が内側に岩石の核と氷のマントルという層構造をもつ場合には、多くの場合で部分的に破壊され惑星重力圏外に脱出したケンタウルス族天体の周りに破片の一部が円盤状に分布し、そこからリングが形成されることが明らかになった。この結果は、カリクロ・キロンの二天体以外にもリングをもつケンタウルス族天体が存在すること、さらに粒子円盤からの集積により形成された衛星をもつケンタウルス族天体もあり得ること、等を示唆しており、リングの有無が天体軌道進化解明の手掛かりとなり得ることを示した。本研究の結果は雑誌 *Astrophysical Journal Letters* に掲載された (Hyodo, Charnoz, Genda, Ohtsuki 2016)。

(4) 惑星リングの理論研究及び土星探査機カッシーニによる成果に関して、レビュー論文ならびに解説記事を執筆した。1997年10月に打ち上げられ2004年7月に土星に到着した探査機カッシーニによる土星及びその衛星・リング系の探査は、2017年9月に探査機の土星への突入という形で幕を閉じた。この13年間の観測及び理論研究により、惑星リングに関する我々の理解は飛躍的に進んだ。一方、上述のように、2014年にケンタウルス族天体であるカリクロに環が見つかり、巨大惑星のみが環を持つという常識は覆された。さらに、海王星より遠方にある太陽系外縁天体の一つであるハウメアにも環が存在することが報告された。太陽系外の惑星の周りの環についても、探索が精力的に進められている。このように、探査機カッシーニの消滅によって環の研究に終わりが告げられたのではなく、惑星系および衛星系の形成過程を探る重要な手掛かりの一つとして、環の持つ重要性はより一層高まっている。そのような背景の中で、探査機カッシーニによる成果を中心に、惑星の環に関する最新の研究成果をまとめた教科書が出版されることとなった。本研究代表者も共著者として、コンピューター・シミュレーションを用いた惑星リングの理論研究に関する章を執筆した (Salo, Ohtsuki, Lewis 2018)。この教科書は、ケンブリッジ大学出版から出版された。また、国内の科学雑誌「パリティ」における探査機カッシーニの特集記事の編集委員として編集に貢献し、自らも解説記事を執筆した (大槻 2018)。

(5) 土星リングの粒子サイズに関する理論研究を実施した。探査機および地上観測により、土星リング粒子は数センチメートルから10メートル程度までのサイズは冪分布となる一方、センチメートル以下のサイズの粒子は欠乏していることが示されている。また探査機カッシーニによる最近の詳しい観測から、最小粒子サイズはミリメートル程度であるが、その存在量は上に述べた冪分布を外挿したものよりかなり少ないことがわかった。小さな粒子が少ないのは大きな粒子の表面に吸着するためだという説が有力である。しかし、吸着力は粒子同士の衝突速度に依存し、詳細は不明であった。そこで本研究では、粒子間重力とサイズ分布を考慮したN体シミュレーションを実施し、粒子間の衝突速度を詳しく調べた。計算結果によると、ほとんどの衝突は毎秒0.1cm以下という低速で起きる。従来の研究によると、面密度が十分高い領域では粒子間の自己重力が重要となり重力ウエイクと呼ばれる微細構造を形成し、ウエイク間の重力作用のため粒子の速度分散が大きくなることが知られていた。しかしそのような領域でも、ウエイクに含まれる粒子群はそろって運動する傾向があり粒子間の相対速度・衝突速度は低速である。このような低速衝突の時、強い吸着力をもつ小粒子は他粒子表面に吸着する。つまり、小粒子が土星リングに欠乏していることを説明できる。一方、計算結果より、たまに高速衝突が起きることもわかった。例えば、上述のようなウエイクができているとき、ウエイク同士が衝突すると毎秒0.3~1cmといった速度で衝突し、大きな粒子の表面に吸着していたミリメートルサイズの粒子は放出され得る。このことは、量は少ないがリング中に観測されているミリメートルサイズ粒子の存在を説明する。本研究の結果は雑誌 *Icarus* に投稿、受理され、現在印刷中である (Ohtsuki, Kawamura, Hirata, Daisaka, Kimura 2020, in press)。

(6) 巨大惑星の周囲に形成されるガス円盤に捕獲された微惑星の軌道進化を調べ、不規則衛星の起源について考察する研究を実施した。形成されつつある巨大ガス惑星の質量が十分大きくなると、周囲に周惑星円盤と呼ばれるガス円盤を形成する。惑星に近づいてきた微惑星のうち惑星に衝突するものもあるが、一部は周惑星円盤からのガス抵抗により捕獲されて円盤内での運動を続け、規則衛星の材料物質になった可能性がある。一方、巨大惑星には不規則衛星と呼ばれる、逆行軌道や軌道長半径の大きな軌道をもつ衛星があり、惑星系外から捕獲されたと考えられている。本研究では、周惑星円盤からのガス抵抗により、不規則衛星の起源が説明できるかどうかを、ガス抵抗を考慮した軌道計算により詳しく調べた。ガス抵抗が強いと捕獲された微惑星は短時間で惑星に落下するが、弱い場合には周惑星円盤中で長時間滞在することが可能となる。我々は、周惑星円盤のガスが徐々に散逸することも考慮した軌道計算を実施した。ガス抵抗により捕獲される微惑星の軌道長半径は、惑星のヒル半径の3分の1以下となることを解析的に示し、数値計算でも同様の結果が得られることを確認した。また計算結果より、捕獲された微惑星の惑星周りの軌道の離心率と軌道傾斜角の分布は、ガス抵抗の強さとガス散逸のタイムスケールに依存することがわかった。初期に強いガス抵抗を受けると捕獲されやすく、短時間でガスが散逸すれば衛星として生き残りやすくなる。しかしそのような場合、生き残った衛星の離心率と軌道傾斜角は観測されている現在の不規則衛星の値よりかなり大きくなることがわかった。このことは、惑星近傍の衛星がガス抵抗で捕獲されたのち軌道減衰して生き残ったものである可能性があるものの、現在観測されている不規則衛星の特徴はガス抵抗による捕獲だけで説明することは困難で、いくつかの過程が複合したものと考えられることを示唆している。本研究の結果は雑誌 *Astronomical Journal* 及び *Astrophysical Journal* に投稿、掲載された (Suetsugu, Ohtsuki, Fujita 2016; Suetsugu & Ohtsuki 2016)。

(7) 巨大惑星の規則衛星の起源に関連して、捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布に関する研究を実施した。巨大ガス惑星の主要規則衛星は、周惑星円盤中で固体粒子が衝突合体して形成されたと考えられている。原始惑星系円盤中を運動する微惑星のうちサイズが大きくガス流から独立して運動できるものは、惑星の重力圏内に入り周惑星円盤ガスから十分な抵抗を受けると周惑星円盤内に捕獲されうる。このように捕獲された微惑星がどのような分布をするかは、衛星形成場所あるいは形成時間を考えるうえで重要となる。そこで本研究では、軌道計算を用いて、捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布を詳しく調べた。ガス抵抗は惑星近傍のガス密度が高い領域のみで効き、そこでのガス分布はほぼ軸対称である。そこで本研究では周惑星円盤は軸対称のガス分布をもつと仮定した。捕獲された微惑星は引き続きガス抵抗を受けるため、徐々に軌道減衰し、やがて惑星に落下する。計算の結果、捕獲による供給と惑星への落下が釣り合った準平衡状態となり、周惑星円盤内の捕獲微惑星数はほぼ一定となることがわかった。周惑星円盤内では、惑星の公転方向に対して順行方向と逆行方向の両方向に微惑星が捕獲される。しかし、逆行方向に捕獲されたものは周惑星円盤ガスから強い向かい風を受けるため、短時間で惑星に落下することがわかった。順行方向に捕獲される微惑星については、捕獲数は微惑星の速度分散と原始惑星系円盤内での微惑星分布に依存し、現在規則衛星がある領域付近に多く捕獲されることがわかった。以上より、上のようなメカニズムで微惑星が捕獲されれば、規則衛星の成長に寄与しうることが明らかになった。本研究の結果は雑誌 *Astrophysical Journal* に投稿、掲載された (Suetsugu & Ohtsuki 2017)。

(8) 巨大惑星の規則衛星の起源に関連して、ガス流の影響を強く受ける小粒子の周惑星円盤による捕獲過程に関する研究を実施した。規則衛星の材料物質として、周惑星円盤に供給される前にはガスの影響を強く受けないキロメートルサイズ以上の天体の場合については(7)で調べた。一方、微惑星形成期の名残として、あるいはその後の微惑星衝突破壊で生成された破片として、より小さな固体粒子の存在も考えられる。これらは周惑星円盤に供給される前に、惑星周囲の複雑なガス流の影響を強く受けるため、その流れも正しく考慮する必要がある。従来、初期に赤道面に分布した粒子の場合は本研究代表者の共同研究者により調べられていたが、より現実的である鉛直方向に分布した粒子の振る舞いは不明であった。そこで本研究では、多重格子法を用いて惑星近傍も精度よく計算する流体シミュレーションの方法により得られた惑星周囲のガス流の三次元密度・速度場を用い、そこから受けるガス抵抗を考慮して粒子軌道進化を調べた。その結果、赤道面だけ考えた際には周惑星円盤に供給されなかった小粒子でも、鉛直方向から流入するガスに引きずられて供給され得ること、その総量は粒子のサイズ及び粒子を巻き上げる乱流の強さに依存することが明らかになった。本研究により、衛星形成の母体となる周惑星円盤における固体とガスの存在比を正確に求めることの重要性が明らかになった。本研究の結果は雑誌 *Astrophysical Journal* に投稿し、修正中である (Homma, Ohtsuki et al., in revision)。

(9) 巨大惑星の不規則衛星の起源及びそれと関連する太陽系小天体の輸送について、観測的研究を進めた。まず、すばる望遠鏡を用いて木星の不規則衛星の分光観測を実施した。得られたスペクトルの傾きからそれらを二つのグループに分け、それぞれのグループに属する衛星の総質量の比を求め、木星トロヤ群及びヒルダ群のデータと比較した。その結果から太陽系内における小天体の輸送及び衝突進化に関する情報が得られる可能性がある。本研究の結果は国際研究会で発表し (Takato, Yoshida, Terada, Ohtsuki 2016)、現在投稿準備中である。一方、最新の理

論研究によると、不規則衛星は巨大惑星の軌道不安定期に散乱された太陽系外縁天体を起源とするという説が有力である。このため不規則衛星の起源を考えるうえで、木星以遠の軌道を持つ太陽系小天体の輸送・混合過程が重要となる。そこで、太陽系外縁天体、及び木星と海王星の間の軌道をもつケンタウルス族天体について、すばる望遠鏡の広視野カメラと複数のフィルターを用いた観測データを解析し、異なる波長間での天体表面の明るさの差（カラー）を求めた。まず太陽系外縁天体について、散乱天体と呼ばれるグループと軌道傾斜角の大きな古典的カイパーベルト天体ではカラー分布が類似しており、これらは共通の起源をもつ可能性が高いこと、それらのカラー分布は二分性をもつこと、等がわかった。次にケンタウルス族天体についてもカラー分布は二分性をもつことがわかった。これらより、ケンタウルス族天体は太陽系外縁から現在の位置に供給されたというモデルを支持するという結論を得た。これらの研究の結果は査読付き雑誌に掲載された (Terai, Yoshida, Ohtsuki, Lykawka, Takato, et al. 2018; Sakugawa, Terai, Ohtsuki, Yoshida, Takato, et al. 2018)。

(10) 巨大惑星の不規則衛星の起源とも関連する太陽系小天体の輸送に関連して、太陽系小天体のサイズ分布に関する観測的研究を実施した。天体群のサイズ分布は形成過程ならびにその後の衝突破壊・輸送過程を反映していると考えられる。従って、異なる天体群でサイズ分布を比較することにより、太陽系進化についての手掛かりを得られる可能性がある。そこで本研究では、分担者らが得た観測データだけでなく、他の研究者が得たデータも統合することにより、小惑星帯（以下、メインベルトと呼ぶ）の小惑星、ヒルダ群小惑星、木星トロヤ群小惑星のサイズ分布を比較した。比較の結果、木星トロヤ群からメインベルトへと、太陽に近づくにつれ、サイズ分布が連続的に変化する傾向を発見した。このことは、元々メインベルトにあった小天体群に、巨大惑星の軌道不安定に伴って散乱された太陽系外縁天体が侵入してきた、と考えると説明がつく。つまり、侵入天体の寄与の割合によってサイズ分布が連続的に変化すると思われるのである。この仮説を検証するために本研究ではさらに、太陽系外縁天体の混合率を様々に変えたサイズ分布変化のモデル計算を実施し、観測データに見られる傾向がおおむね再現できることを確認した。本研究の結果は査読付き雑誌に掲載された (Yoshida, Terai, Ito, Ohtsuki, et al. 2019)。さらに、これまで解析が行われてこなかった木星トロヤ群の L5 群の小サイズの小惑星に関するサイズ分布測定も実施した。手法としてはすばる望遠鏡の広視野カメラで得られたデータを解析してサイズ分布を求めた。その結果、サイズ分布は従来、分担者らが得ていた L4 群のサイズ分布とほぼ同じであり、上の太陽系小天体輸送モデルを支持する結果となった。本研究の結果は、現在投稿準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohtsuki Keiji, Kawamura Hiroshi, Hirata Naoyuki, Daisaka Hiroshi, Kimura Hiroshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Size of the smallest particles in Saturn's rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.06.007	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 -
1. 著者名 Yoshida Fumi, Terai Tsuyoshi, Ito Takashi, Ohtsuki Keiji, Lykawka Patryk Sofia, Hiroi Takahiro, Takato Naruhisa	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 -
1. 著者名 Sakugawa Haruka, Terai Tsuyoshi, Ohtsuki Keiji, Yoshida Fumi, Takato Naruhisa, Lykawka Patryk Sofia, Wang Shiang-Yu	4. 巻 70
2. 論文標題 Colors of Centaurs observed by the Subaru/Hyper Suprime-Cam and implications for their origin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy127	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 Salo H., Ohtsuki K., Lewis M. C.	4. 巻 -
2. 論文標題 Computer Simulations of Planetary Rings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 In "Planetary Ring Systems"	6. 最初と最後の頁 434 ~ 493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/9781316286791.016	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 Terai Tsuyoshi, Yoshida Fumi, Ohtsuki Keiji, Lykawka Patryk Sofia, Takato Naruhisa, Higuchi Arika, Ito Takashi, Komiyama Yutaka, Miyazaki Satoshi, Wang Shiang-Yu	4. 巻 70
2. 論文標題 Multi-band photometry of trans-Neptunian objects in the Subaru Hyper Suprime-Cam survey	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx105	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 大槻圭史	4. 巻 33
2. 論文標題 土星の環は何を語るか	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 パリティ	6. 最初と最後の頁 20-24
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 無
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 -

1. 著者名 Suetsugu Ryo, Ohtsuki Keiji	4. 巻 839
2. 論文標題 Distribution of Captured Planetesimals in Circumplanetary Gas Disks and Implications for Accretion of Regular Satellites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa692e	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 -

1. 著者名 Hyodo Ryuki, Charnoz Sebastien, Ohtsuki Keiji, Genda Hidenori	4. 巻 282
2. 論文標題 Ring formation around giant planets by tidal disruption of a single passing large Kuiper belt object	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 195 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2016.09.012	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 Suetsugu, Ryo, Keiji Ohtsuki	4. 巻 820
2. 論文標題 Capture of planetesimals by waning circumplanetary disks	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/820/2/128	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 -

1. 著者名 Suetsugu Ryo, Ohtsuki Keiji, Fujita Tetsuya	4. 巻 151
2. 論文標題 Orbital characteristics of planetesimals captured by circumplanetary gas disks	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astron. J.	6. 最初と最後の頁 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-6256/151/6/140	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 -

1. 著者名 Hyodo, R., S. Charnoz, H. Genda, K. Ohtsuki	4. 巻 828
2. 論文標題 Formation of Centaurs' rings through their partial tidal disruption during planetary encounters	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophys. J. Lett.	6. 最初と最後の頁 L8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/828/1/L8	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 Ryuki Hyodo, Keiji Ohtsuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Saturn's F ring and shepherd satellites a natural outcome of satellite system formation	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 686-689
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ngeo2508	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 -

[学会発表] 計52件(うち招待講演 0件/うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Toru Homma, Keiji Ohtsuki, Ryo Suetsugu, Masahiro N. Machida
2. 発表標題 Accretion of vertically stirred small bodies in the protoplanetary disk onto circum-planetary disks
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruka Sakugawa, Tsuyoshi Terai, Keiji Ohtsuki, Fumi Yoshida
2. 発表標題 Colors of Centaurs observed by the Subaru/Hyper Suprime-Cam
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroaki Okayama
2. 発表標題 Dynamical constraints on the mass of the largest body captured in Jupiter's Trojan swarm
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroshi Kawamura, Naoyuki Hirata, Hiroshi Daisaka
2. 発表標題 Impact velocity between particles in Saturn's rings and implications for the minimum particle size
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoyuki Hirata, Hiroshi Kimura, Keiji Ohtsuki
2. 発表標題 The formation of spokes: The role of cohesion
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間 徹, 大槻 圭史, 末次 竜, 町田 正博
2. 発表標題 原始惑星系円盤で鉛直方向に巻き上げられた小粒子の周惑星円盤への降着
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村 浩司, 大槻 圭史, 平田 直之, 台坂 博
2. 発表標題 土星リング粒子の衝突速度と最小粒子サイズ
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末次 竜, 大槻 圭史
2. 発表標題 ガス抵抗によって捕獲された微惑星の軌道進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間 徹, 大槻 圭史, 末次 竜, 町田 正博, 谷川 享行
2. 発表標題 原始惑星系円盤において鉛直方向に分布する小粒子の周惑星円盤への降着
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroshi Kawamura, Naoyuki Hirata, Hiroshi Daisaka, Hiroshi Kimura
2. 発表標題 Size of the smallest particles in Saturn's rings
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末次 竜, 大槻 圭史
2. 発表標題 球対称ガス大気による微惑星の捕獲
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 二美, 寺居 剛, 伊藤 孝士, 大槻 圭史, Lykawka S. Patryk, 廣井 隆弘, 高遠 徳尚
2. 発表標題 木星トロヤ群、ヒルダ群、およびメインベルト 小惑星のサイズ頻度分布の比較研究：太陽系初期の惑星移動への手がかり
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上畑琴美、寺居剛、大槻圭史、吉田二美
2. 発表標題 すばる望遠鏡Hyper Suprime-Camによる木星L5トロヤ群小惑星のサイズ分布測定
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻圭史, 本間徹, 末次竜, 町田正博
2. 発表標題 Numerical simulation for the distribution of small bodies in circumplanetary disks supplied from the protoplanetary disk
3. 学会等名 Planet Formation Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田夏穂, 大槻圭史, 末次竜, 町田正博, 谷川享行
2. 発表標題 Accretion of pebbles into the circumplanetary disk of a giant planet
3. 学会等名 Planet Formation Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田夏穂, 大槻圭史, 末次竜, 町田正博
2. 発表標題 巨大惑星の周惑星円盤へのダストの供給
3. 学会等名 衛星系研究会2020
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末次 竜, 大槻 圭史
2. 発表標題 捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toru Homma, Keiji Ohtsuki, Fumihiko Usui, Ryo Suetsugu, Masahiro N. Machida
2. 発表標題 Accretion of vertically stirred small bodies in the protoplanetary disk onto circum- planetary disks
3. 学会等名 RESCEU/Planet2 symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐久川遥、寺居剛、大槻圭史、吉田二美
2. 発表標題 すばる望遠鏡Hyper Suprime-Camによるケンタウルス族のカラー測定
3. 学会等名 日本天文学会春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naruhisa Takato, Fumi Yoshida, Hiroshi Terada , Keiji Ohtsuki
2. 発表標題 Taxonomical study of the origin of Jovian irregular satellites
3. 学会等名 JUPITER TROJAN 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroaki Okayama
2. 発表標題 Dynamical constraints on the mass of the largest body captured in Jupiter 's Trojan swarm
3. 学会等名 JUPITER TROJAN 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大槻 圭史; 清水 俊平; 川村 浩司; 末次 竜
2. 発表標題 Orbital evolution of solid bodies in circumplanetary gas disks
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 末次 竜; 大槻 圭史
2. 発表標題 ガス抵抗による微惑星捕獲
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 兵頭 龍樹; Sebastien Charnoz; 大槻 圭史; 玄田英典
2. 発表標題 多様な巨大惑星リングの形成過程について
3. 学会等名 日本惑星科学会2016秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 末次 竜; 大槻 圭史
2. 発表標題 捕獲された固体物質の周惑星円盤内での分布
3. 学会等名 日本惑星科学会2016秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 末次 竜; 大槻 圭史
2. 発表標題 捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大槻圭史、岡山博明
2. 発表標題 捕獲されたトロヤ群小惑星の力学進化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2015年大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 末次竜、大槻圭史
2. 発表標題 周惑星円盤の散逸過程を考慮した微惑星の捕獲過程
3. 学会等名 日本天文学会2015年秋季講演会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 末次竜、大槻圭史
2. 発表標題 ガス抵抗による微惑星の捕獲と軌道進化
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 兵頭龍樹, Sebastien Charnoz, 大槻圭史, 玄田英典
2. 発表標題 微惑星の土星近接遭遇による潮汐破壊：潮汐破壊過程の物理と土星リングの形成可能性
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroaki Okayama
2. 発表標題 Gravitational Influence of a Large Captured Body on the Stability of Jupiter's Trojan Asteroids
3. 学会等名 47th DPS meeting (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Hyodo, R., Charnoz, S., Ohtsuki, K., Genda, H.
2. 発表標題 Physics of Tidal Disruption of Big Objects at the Close Encounter to Saturn
3. 学会等名 47th DPS meeting (国際学会)
4. 発表年 2015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)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員 (32503)	
研究分担者	末次 竜 (Suetsugu Ryo) (40737334)	産業医科大学・医学部・助教 (37116)	
研究分担者	高遠 徳尚 (Takato Naruhisa) (50261152)	国立天文台・ハワイ観測所・教授 (62616)	
研究分担者	平田 直之 (Hirata Naoyuki) (00791550)	神戸大学・理学研究科・助教 (14501)	
連携研究者	台坂 博 (Daisaka Hiroshi) (80399295)	一橋大学・商学研究科・教授 (12613)	