

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13600

研究課題名（和文）多様な地球型惑星が持つ衛星系の起源・進化の統一的理解に向けた理論研究

研究課題名（英文）Towards understanding the formation and evolution of diverse satellite systems

研究代表者

兵頭 龍樹（Hyodo, Ryuki）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・国際トップヤングフェロー

研究者番号：20814693

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）：太陽系の惑星には、その周囲を回る多様な天体 — 多様な衛星系 — が存在する。本研究課題の大目標は、衛星の形成や進化の多様性を支配する素過程の理解を目指すことである。研究期間内において特に、(1) 火星衛星フォボスとデイモスの形成・進化に関わる理論研究、および、(2) 惑星や衛星の基本的な材料物質となる微惑星の形成過程に関する理論研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火星衛星や微惑星（現在微惑星は小惑星や彗星として残っている）は、世界の惑星探査計画のターゲット天体である。例えば、2024年打ち上げ予定のJAXA・火星衛星探査（MMX）計画は、火星衛星フォボスからの土壌サンプル採取を目指す探査計画である。そして本研究では、最新の数値計算や知見を用いて、火星衛星物質の理論モデルの構築を行った。このような理論モデルは、MMX計画におけるサンプル採取機構や分析機構などの設計にも役立ち、日本が担う将来の惑星探査計画の科学意義を支える研究成果である。

研究成果の概要（英文）：The planets of our solar system have a variety of planetary bodies orbiting them, that is, called moons or satellites. The major goal of this research project is to understand the fundamental processes that govern the formation and evolution of diverse satellites. During the research period, we have conducted, in particular, (1) theoretical studies on the formation and evolution of the Martian moons, Phobos and Deimos, and (2) theoretical studies on the formation processes of planetesimals, which are the fundamental building blocks of the planets and satellites.

研究分野：惑星形成、惑星探査

キーワード：衛星形成 惑星形成 惑星探査 火星衛星探査計画 MMX計画 微惑星

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球には巨大な衛星である月(地球質量の約100分の1)が存在している。一方、火星には非常に小さな2つの衛星フォボスとデイモス(火星質量の約1000万分の1)が存在している。このように地球型惑星には多様な衛星系が存在する。

研究開始当初、JAXAの火星衛星探査計画(通称MMX計画: Martian Moons eXploration)が2020年代に実施されることが発表された。火星衛星探査計画とは、火星の周囲を回る衛星フォボス表層から土壌サンプルを地球に持ち帰ることを計画するものである。しかしながら、探査機が火星衛星に着陸したことはなく、観測による衛星表層の情報も限られたものであった。それゆえに、MMX計画の打ち上げに先んじて、未知の衛星の素性(形成や進化過程)を明らかにする理論モデルの構築が求められていた。

また、NASAのアポロ計画によって地球に持ち帰られた月の土壌サンプルの分析も進み、月の形成や進化に関する物質的な証拠が増えてきた。それに伴って、月、および、その基本的な材料物質となる微惑星の形成や進化を記述する理論モデルのアップデートおよび新構築が求められていた。

### 2. 研究の目的

「地球型惑星が持つ多様な衛星はどのように形成されたのだろうか?」— 衛星は、惑星が形成される過程の副産物として形成されることから、衛星系の形成過程の深い理解は、太陽系の惑星の形成と進化過程の理解に直接的に繋がる。

また、惑星探査計画の躍動によって、我々人類は、地球外から物質サンプルを持ち帰れるようになった。これらの物質サンプルは、太陽系の惑星や衛星の形成過程と進化を記録した「物質科学的な証拠」である。

本研究の最終目的は、惑星・衛星、そして、その材料物質となる微惑星の形成と進化の統一的理解を目指すことである。そのために、惑星・衛星や微惑星の形成・進化の多様性を支配する素過程の理解を目指す。さらに、理論的な側面から惑星探査計画を支え、探査で得られる科学成果を最大化させることを目的とする。

### 3. 研究の方法

衛星や微惑星の形成と進化は、惑星や恒星の周りの円盤進化に伴う集積や衝突プロセスによって支配される。円盤進化や衝突現象においては、物質の相変化(蒸発・凝縮など)が伴う。本研究では、数値シミュレーションと解析的アプローチを用いた理論的な側面から多様な衛星系や微惑星の形成と進化に迫る。ここで、衛星と微惑星の形成・進化プロセスを数値シミュレーションで再現するためには、適切な物質化学進化を力学モデルに取り込む必要がある。本研究では、世界で初めて、火星衛星や微惑星の力学的な形成モデルに、物質化学進化を取り込んだ理論モデルの構築(数値シミュレーション)を行った。

### 4. 研究成果

研究期間内において特に、(1)火星衛星フォボスとデイモスの形成・進化に関わる理論研究、および、(2)惑星や衛星の基本的な材料物質となる微惑星の形成過程に関する理論研究を行った。

(1)に関して特に次のような成果が出た。

小惑星や彗星などの小天体は、ある頻度で惑星に衝突する。太陽系の歴史において火星に無数に発生する小天体衝突により、火星表層物質は吹き飛ばされ、火星の近くをまわる衛星フォボスに降り積もる可能性がある。本研究では、衝突実験結果にも整合的な高解像度の衝突シミュレーションと、破片の詳細な軌道計算シミュレーションを用いて、火星史で起こる火星への小天体衝突によって、火星衛星に衝突破片として輸送される火星物質質量を見積もった。

その結果、本研究は、火星衛星には従来考えられていたよりも10-100倍の火星物質が存在していることを明らかにした。本研究の結果は、MMX計画が「火星衛星から火星物質さえも持ち帰ることが可能である」ということを意味している。これは、火星と衛星の形成史を紐解く重要な鍵になることが期待される。

(2) に関して特に次のような成果が出た。

惑星や衛星の基本的な材料物質（微惑星）は、恒星の周囲に存在する原始惑星系円盤（ガスと固体ダストからなる）の中で形成されると考えられる。そして、原始惑星系円盤の中で、スノーラインと呼ばれる特別な距離が存在する。スノーラインとは、水の存在形態を気体と氷で分ける恒星からの距離のことである（それより恒星に近いと温度が高いので氷は昇華して水蒸気となる）。

また、遠方ほど円盤ガス面密度が下がる典型的な原始惑星系ガス円盤中では、小石（ペブルと呼ぶ）程度の大きさを持つ固体粒子は、ガス抵抗（ガスと固体の相互作用）によって中心の恒星に向かって効率的に落下する。

本研究では、原始惑星系円盤の粘性進化と固体物質の動径移動・相変化を矛盾なく解く動径方向1次元の計算コード開発し、「ガス円盤中のペブル落下過程におけるスノーラインの影響」を詳細に調べた。

その結果、次のことを明らかにした。まず、遠方から中心の恒星に向かって落下し、スノーラインに達したペブル（岩石と水氷成分を含む）は、その氷成分を昇華で失う。そして、水蒸気がそこで発生する。岩石成分は昇華しないので固体として残るが、水氷の消失に伴って小さくなる。粒子が小さくなるとガス抵抗が効きにくくなり、粒子の落下スピードが突然に下がる。すなわち、スノーラインのすぐ内側で“岩石の交通渋滞”が起こる（つまり、岩石粒が溜まる）。一方、水蒸気の一部がスノーラインの外側に拡散し、再凝縮が起こる。そして、次々と落下してくるペブルの存在に相まって、スノーラインのすぐ外側で水氷粒子が局所的に溜まる。

このようにして、スノーライン付近で固体物質が選択的に溜まることが起こる。そしてその結果、固体粒子が濃集して微惑星まで成長すると期待される。本研究により、岩石および氷微惑星の形成が、スノーラインで“選択的に起こり”、さらに円盤進化に伴うスノーラインの移動によって、幅広い動径距離に多様な水・岩石比を持つ微惑星の形成可能性が示された。本研究の波及効果は、「惑星形成がスノーラインから始まりうる」という新たなストーリーを提案することである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Charnoz Sebastien, Sossi Paolo A., Lee Yueh-Ning, Siebert Julien, Hyodo Ryuki, Allibert Laetitia, Pignatale Francesco C., Landeau Mayllis, Oza Apurva V., Moynier Frederic	4. 巻 364
2. 論文標題 Tidal pull of the Earth strips the proto-Moon of its volatiles	5. 発行年 2021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.2021.114451	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 Sugiura Keisuke, Kobayashi Hiroshi, Watanabe Sei-ichiro, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Inutsuka Shu-ichiro	4. 巻 365
2. 論文標題 SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu	5. 発行年 2021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.2021.114505	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 Charnoz S., Avice G., Hyodo R., Pignatale F. C., Chaussidon M.	4. 巻 652
2. 論文標題 Forming pressure traps at the snow line to isolate isotopic reservoirs in the absence of a planet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	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) 10.1051/0004-6361/202038797	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 Hyodo Ryuki, Genda Hidenori	4. 巻 913
2. 論文標題 Erosion and Accretion by Cratering Impacts on Rocky and Icy Bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	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) 10.3847/1538-4357/abf6d8	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 Arakawa Sota, Hyodo Ryuki, Shoji Daigo, Genda Hidenori	4. 巻 162
2. 論文標題 Tidal Evolution of the Eccentric Moon around Dwarf Planet (225088) Gonggong	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	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) 10.3847/1538-3881/ac1f91	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 Hyodo Ryuki, Usui Tomohiro	4. 巻 373
2. 論文標題 Searching for life on Mars and its moons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abj1512	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 Barucci Maria Antonietta, (inc. Hyodo Ryuki) et al.	4. 巻 73
2. 論文標題 MIRS: an imaging spectrometer for the MMX mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-021-01423-2	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 Hyodo Ryuki, Genda Hidenori	4. 巻 898
2. 論文標題 Escape and Accretion by Cratering Impacts: Formulation of Scaling Relations for High-speed Ejecta	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	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) 10.3847/1538-4357/ab9897	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 Hyodo Ryuki, Genda Hidenori, Brassier Ramon	4. 巻 354
2. 論文標題 Modification of the composition and density of Mercury from late accretion	5. 発行年 2021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.2020.114064	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 Ida Shigeru, Guillot Tristan, Hyodo Ryuki, Okuzumi Satoshi, Youdin Andrew N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line. I. Monte Carlo simulations of silicate dust pile-up in a turbulent disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	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) 10.1051/0004-6361/202039705	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 Hyodo Ryuki, Guillot Tristan, Ida Shigeru, Okuzumi Satoshi, Youdin Andrew N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line. II. Dust or pebbles?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	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) 10.1051/0004-6361/202039894	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 Hyodo Ryuki, Ida Shigeru, Guillot Tristan	4. 巻 645
2. 論文標題 A "no-drift" runaway pile-up of pebbles in protoplanetary disks in which midplane turbulence increases with radius	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics Letters	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) 10.1051/0004-6361/202040031	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 Kurosawa Kosuke, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Yamagishi Akihiko, Mikouchi Takashi, Niihara Takafumi, Matsuyama Shingo, Fujita Kazuhisa	4. 巻 23
2. 論文標題 Assessment of the probability of microbial contamination for sample return from Martian moons II: The fate of microbes on Martian moons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Life Sciences in Space Research	6. 最初と最後の頁 85 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lssr.2019.07.006	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, Ida Shigeru, Charnoz Sebastien	4. 巻 629
2. 論文標題 Formation of rocky and icy planetesimals inside and outside the snow line: effects of diffusion, sublimation, and back-reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	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) 10.1051/0004-6361/201935935	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 Fujita Kazuhisa, Kurosawa Kosuke, Genda Hidenori, Hyodo Ryuki, Matsuyama Shingo, Yamagishi Akihiko, Mikouchi Takashi, Niihara Takafumi	4. 巻 23
2. 論文標題 Assessment of the probability of microbial contamination for sample return from Martian moons I: Departure of microbes from Martian surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Life Sciences in Space Research	6. 最初と最後の頁 73 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lssr.2019.07.009	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, Kurosawa Kosuke, Genda Hidenori, Usui Tomohiro, Fujita Kazuhisa	4. 巻 9
2. 論文標題 Transport of impact ejecta from Mars to its moons as a means to reveal Martian history	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-019-56139-x	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 Arakawa Sota, Hyodo Ryuki, Genda Hidenori	4. 巻 3
2. 論文標題 Early formation of moons around large trans-Neptunian objects via giant impacts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 802 ~ 807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-019-0797-9	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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 兵頭龍樹、井田茂
2. 発表標題 微惑星形成について Snow line と “No-drift” mechanism
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryuki Hyodo, Shigeru Ida, Tristan Guillot
2. 発表標題 Planetesimal formation by the “no-drift” mechanism
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 兵頭龍樹
2. 発表標題 "No-drift"メカニズムによる微惑星形成
3. 学会等名 2021年 日本惑星科学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Ryuki Hyodo; Hidenori Genda, Ramon Brasser
2. 発表標題 Late accretion to Mercury: Cratering, crust erosion, and accretion of exogenic materials
3. 学会等名 Europlanet Science Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hyodo Ryuki; Genda Hidenori
2. 発表標題 The fate of the impact-debris produced by a Borealis- forming impact
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兵頭龍樹, 黒澤耕介, 玄田英典, 藤田和央, 白井寛裕
2. 発表標題 火星衛星フォボスとデイモス:火星からの質量輸送について
3. 学会等名 2018 年日本惑星科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵頭龍樹
2. 発表標題 火星衛星の起源と進化について
3. 学会等名 衛星研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryuki Hyodo, Hidenori Genda
2. 発表標題 Implantation of Martian Materials in the Inner Solar System by a Mega Impact on Mars
3. 学会等名 Symposium on Planetary Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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

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		
フランス	パリ地球物理研究所	ニース天文台	