

平成 30 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17750

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤内での多様な物理過程を考慮した新たな太陽系形成シナリオの提案

研究課題名(英文) A new model of solar system formation considering various processes in protoplanetary disks

研究代表者

佐々木 貴教 (Sasaki, Takanori)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70614064

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)：太陽系の惑星形成・衛星形成に関する様々な物理過程の検証、および新しい枠組みの提案を行った。主に以下の3つの研究を行った。(1) 動的トルクを組み込んだ惑星移動プロセスの表式をまとめ、具体的な惑星形成過程に適用した。(2) 地球形成時の天体衝突過程が、地球の初期進化に対して力学および化学的に大きな影響を与える可能性を指摘し、新しい進化シナリオを提案した。(3) 大規模N体計算コードを開発し、超高解像度の月集積計算を行うことで、月形成過程に関する計算結果に解像度依存性があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I studied about various physical processes of planet/satellite formation in the solar system, and proposed new scenarios about them. (1) I derived a new torque formula for planet migration by taking into account dynamic corrections, and showed that inward migration was slowed by the dynamic effects. (2) I proposed a new scenario that planetary impact processes would affect the evolution of the early Earth dynamically and geochemically. (3) I developed an N-body simulation code and execute extra-high-resolution N-body simulations of lunar accretion to show the results depended on the numerical simulation.

研究分野：惑星科学

キーワード：惑星形成 太陽系形成 初期地球 月形成 惑星移動 N体計算

1. 研究開始当初の背景

太陽系形成理論の標準モデルは、現在の惑星の位置で微惑星が集積し成長するというその場形成モデルである。このモデルでは現在の太陽系の基本的な性質は説明可能なものの、原始惑星系円盤内で惑星が動径方向に大きく動く可能性があること、太陽系形成後期の力学的な進化過程が明らかでないことなど、未解決の問題も多かった。しかし、理論を制約する対象が太陽系の1サンプルしかないこともあり、モデルを更新・再構築することは容易ではなかった。

一方、1995年に始めて太陽系外の惑星が発見されて以降、その発見数は加速度的に増え続け、多様な惑星系の存在が明らかになってきた。これら系外惑星系の多様性は、惑星形成過程における多様な物理過程を反映しており、標準モデルとは異なる惑星形成プロセスの存在を示唆していた。

さらに、惑星形成の現場である原始惑星系円盤についても、重要な観測が相次ぎ、多様性に富んだ円盤が存在していることが明らかになってきていた。また、こうした円盤と微惑星・原始惑星との間の相互作用などに関する理論的研究も急速に進み始めていた。

2. 研究の目的

過去の標準的な太陽系形成理論の抱えていた様々な問題を解決する、新しい惑星形成モデルを提案することを目的とする。この新しいモデルのもと、原始惑星系円盤内での多様な物理過程をそれぞれ検証し、最終的に全プロセスをモデル化して組み込んだモンテカルロ計算を行うことにより、太陽系形成過程の新たな枠組みを示す。

太陽系は1サンプルしかなく、原始惑星系円盤の初期条件など未だ不明な部分も多いが、幅広いパラメータ範囲のもとに大量のモンテカルロ計算を行い、その結果を統計的に解析することで、太陽系形成過程における普遍/特殊な現象の切り分けが可能となる。また一方、これらの結果から逆に太陽系形成の初期条件への制約を与えることも期待される。

3. 研究の方法

ローカルな物理過程を詳細に追う大規模 N 体計算と、その結果に基づいたグローバルなモンテカルロ計算を組み合わせ、重層的に研究を進めていく。前者では並列計算コードを用いて詳細な議論を行い、後者では大量のパラメータスタディによる統計的な議論を行う。

汎惑星形成理論に基づいたモンテカルロシミュレーションについては、過去の研究において作成した数値計算コード (Sasaki et al., 2010) を拡張して用いる。N 体計算については、最新の計算機環境に合わせて、新たに大型並列計算機用の数値計算コードを開発して用いる。

4. 研究成果

太陽系の惑星形成・衛星形成に関する様々な物理過程の検証、および新しい枠組みの提案を行った。主に以下の3つの研究を行った。

(1) 原始惑星系円盤との相互作用により原始惑星が中心星に落下する問題に対し、新たな物理過程を考慮することで問題が解決される可能性を検討した。先行研究で指摘されていた惑星移動に対する動的トルクの表式をまとめ直し、具体的な惑星形成過程に適用したところ、実際に中心星への原始惑星の落下を自律的に抑えることに成功した。またこれらの表式を計算コードに導入することで、太陽系形成理論に関する基本的な数値計算コードを再構築した。本研究で拡張した計算コードは汎用性が高く、今後様々な惑星形成の研究に応用することが可能である。

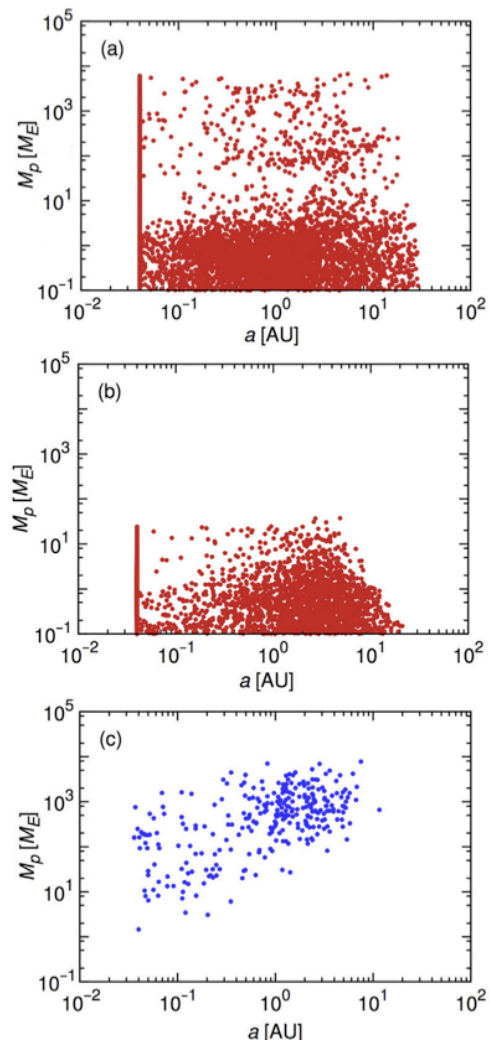


図 1: 動的トルクを考慮した場合 (上) と考慮しない場合 (中) の、形成される惑星の軌道と質量の分布。実際の系外惑星の分布 (下) を再現するためには動的トルクを考慮する必要があることがわかる。(Sasaki et al., 2017 より引用)

(2) 太陽系形成直後の巨大惑星移動プロセスや、それに伴う地球への小天体衝突過程を検証するために、地球の冥王代における天体衝突である後期重爆撃期の影響について議論した。複数のモデルのもと、幅広いパラメータ範囲で天体衝突のフラックスと、それによる大陸地殻の掘削率・熔融率を計算したところ、冥王代の地球表面の大部分がマグマで覆われる可能性が高いことが示唆された。また、巨大天体衝突の際にばらまかれる衝突破片の地球への再集積が、初期地球に対して力学的・化学的にどのような影響を及ぼすかについて詳細な議論を行った。その結果、地球の軌道離心率が小さいこと、地球マントル中の親鉄元素が過剰であること、および冥王代地球の大気が還元的であったこと、などを統一的に説明することが可能となった。

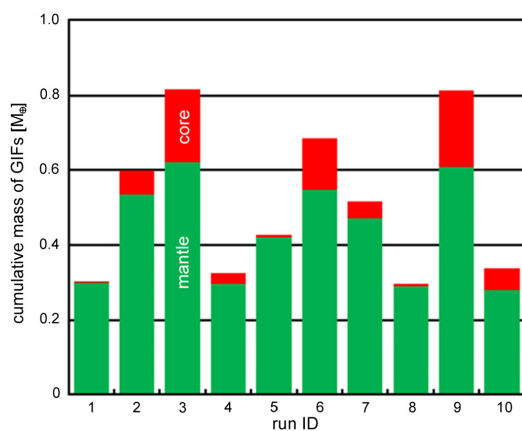


図 2：巨大天体衝突の際にばらまかれた衝突破片の積算質量およびその起源。多くのランで地球質量の数割程度の衝突破片がばらまかれ、その一部はコア起源であることがわかる。コア起源の親鉄元素に飛んだ衝突破片が地球に再集積することで、地球マントル中の親鉄元素の過剰が説明可能である。(Genda et al., 2017 より引用)

(3) Pezy Computing 社が開発した低消費電力型のコアプロセッサである Pezy-SC 上で動作する N 体計算コードを開発した。衝突計算にはラブルパイルモデルを採用し、自己重力計算には FDPS を用いて並列化を行った。本コードを用いて、地球へのジャイアントインパクトによって作られた原始月円盤内での月の集積シミュレーションを複数の解像度のもとで行った。最大粒子数は 10^7 であり、この場合 1 粒子が約 10km 程度の微衛星に対応している。原始月円盤を表現する粒子数が大幅に増えたことで、先行研究では見られなかった新たな物理過程が現出し、地球のロッシュ限界半径の内側でのスパイラル構造が、低解像度 ($N \leq 10^5$) の場合と高解像度 ($N \geq 10^6$) の場合で異なることが示された。その結果、角運動量輸送率、またそれに伴う月形成のタイムスケールも数値計算の解像度に依存することがわかった。

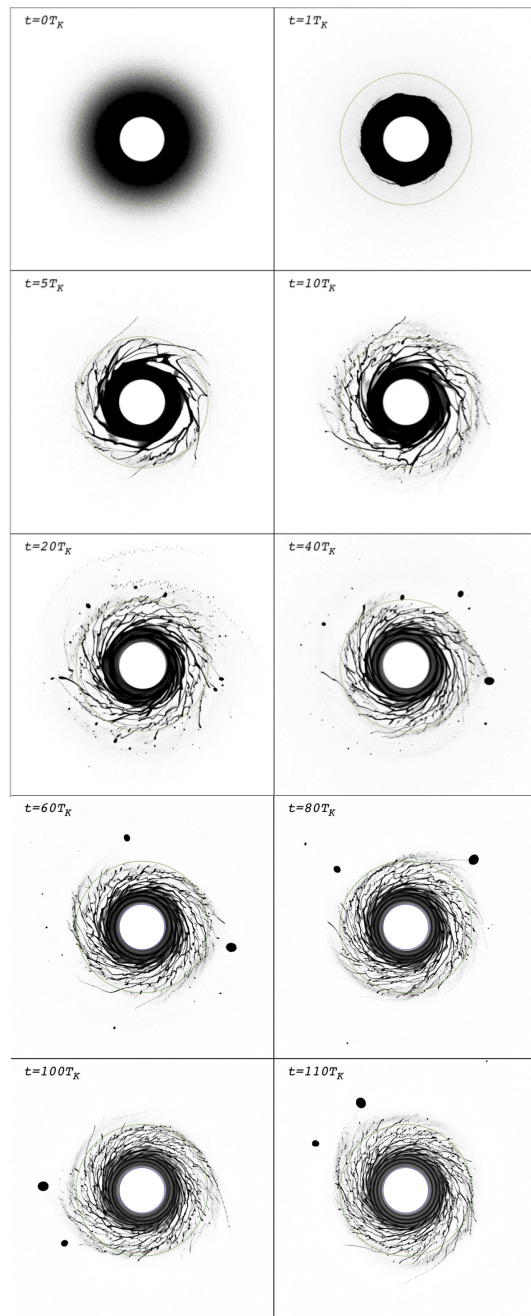


図 3： 10^7 粒子を用いた原始月円盤からの月集積シミュレーションの結果。ロッシュ限界半径（緑色）の内側に複雑な構造が形成されているのがわかる。これは現在までの世界最高解像度での月形成シミュレーションである。(Sasaki & Hosono, 2018 より引用)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Takanori Sasaki & Natsuki Hosono, Particle Number Dependence of The N-Body Simulations of Moon Formation, *Astrophysical Journal*, 856, 175(14pp) (2018) 査読有
doi:10.3847/1538-4357/aab369

- ② Yuhito Shibaike, Satoshi Okuzumi, Takanori Sasaki & Shigeru Ida, Satellitesimal Formation via Collisional Dust Growth in Steady Circumplanetary Disks, *Astrophysical Journal*, 846, 81(10pp) (2017) 査読有 doi:10.3847/1538-4357/aa8454
- ③ Hidenori Genda, Tsuyoshi Iizuka, Takanori Sasaki, Yuichiro Ueno & Masahiro Ikoma, Ejection of iron-bearing giant-impact fragments and the dynamical and geochemical influence of the fragment re-accretion, *Earth and Planetary Science Letters*, 470, 87-95 (2017) 査読有 doi:10.1016/j.epsl.2017.04.035
- ④ Takanori Sasaki & Toshikazu Ebisuzaki, Population synthesis of planet formation using a torque formula with dynamic effects, *Geoscience Frontiers*, 8, 215-222 (2017) 査読有 doi:10.1016/j.gsf.2016.04.002
- ⑤ Yuhito Shibaike, Takanori Sasaki & Shigeru Ida, Excavation and Melting of the Hadean Continental Crust by Late Heavy Bombardment, *Icarus*, 266, 189-203 (2016) 査読有 doi:10.1016/j.icarus.2015.10.023

[学会発表] (計 26 件)

- ① Yuya Ishizawa, Takanori Sasaki & Natsuki Hosono, In-situ formation of Uranian satellites from debris disk formed by giant impact, AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 11-15 December, 2017
- ② 佐々木貴教 & 細野七月, 高解像度 N 体計算による月形成シミュレーション, 日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会, 大阪大学, 2017 年 9 月 27-29 日
- ③ 芝池論人, 奥住聡, 佐々木貴教 & 井田茂, ペブル集積によるガス惑星周りの衛星形成, 日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会, 大阪大学, 2017 年 9 月 27-29 日
- ④ 山中陽裕 & 佐々木貴教, 原始惑星系円盤中での周連星惑星の軌道進化, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 北海道大学, 2017 年 9 月 11-13 日
- ⑤ 石澤祐弥, 佐々木貴教 & 細野七月, 巨大衝突によるデブリ円盤からの天王星の衛星形成, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 北海道大学, 2017 年 9 月 11-13 日
- ⑥ 山敷庸亮, 黒木龍介, 佐藤啓明, 村嶋慶哉, 野津湧太, 前原裕之, 野津翔太, 佐々木貴教, 野上大作, 柴田一成, 他 ExoKyoto 開発チーム, 恒星フレア影響の評価に向けた、太陽系外惑星データベース ExoKyoto の整備, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 北海道大学, 2017 年 9 月 11-13 日
- ⑦ 佐々木貴教, 系外惑星最前線 ～「第二の地球」を探して～, 2017 年天文教育普及研究会年会, 西本願寺聞法会館, 2017 年 8 月 6-8 日 (招待講演)
- ⑧ Takanori Sasaki, How to make an ocean planet habitable, Japan Geoscience Union Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May, 2017 (invited)
- ⑨ 佐々木貴教 & 細野七月, Pezy-SC プロセッサを用いた大規模 N 体計算, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2017 年 5 月 20-25 日
- ⑩ 山敷庸亮, 土井隆雄, 佐々木貴教, 山中陽裕, 齋藤優樹, 立木茂朗, 村嶋慶哉, 細野七月, 野津翔太, 野津湧太, 黒木龍介, 佐藤啓明 & 高木風香, 系外惑星探査データベース ExoKyoto を用いた系外惑星探査システムの構築, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2017 年 5 月 20-25 日
- ⑪ 芝池論人, 奥住聡, 佐々木貴教 & 井田茂, 周惑星円盤内でのペブルアクリーションによる衛星形成, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2017 年 5 月 20-25 日
- ⑫ 佐々木貴教, 土井隆雄, 山敷庸亮, 山中陽裕, 熊代慶, 木原孝輔, 野津翔太, 野津湧太, 村嶋慶哉, 芝池論人, 石川裕之, 下崎紗綾 & 藤田汐音, ExoKyoto を用いたアマチュアも含めた系外惑星探査システム, 日本天文学会 2017 年春季年会, 九州大学, 2017 年 3 月 15-18 日
- ⑬ 山敷庸亮, 細野七月, 黒木龍介, 村嶋慶哉, 佐々木貴教, 土井隆雄, 佐藤啓明, 真柳和也, 野津翔太, 野津湧太, 伊藤岳陽, 嶋田侑治, 芝池論人, 石川裕之, 下崎紗綾 & 藤田汐音, 太陽系外惑星データベース ExoKyoto の開発, 日本天文学会 2017 年春季年会, 九州大学, 2017 年 3 月 15-18 日
- ⑭ 石澤祐弥, 佐々木貴教 & 細野七月, 巨

- 大衝突による天王星の衛星形成, 日本天文学会 2017 年春季年会, 九州大学, 2017 年 3 月 15-18 日
- ⑮ 芝池論人, 奥住聡, 佐々木貴教 & 井田茂, 定常な周惑星円盤における微衛星形成, 日本天文学会 2017 年春季年会, 九州大学, 2017 年 3 月 15-18 日
- ⑯ Takanori Sasaki, Formation of Uranian Satellites via Giant Impact, Japan-Germany planet & disk workshop, Ishigaki Island, 26-30 September, 2016
- ⑰ 山敷庸亮, 細野七月, 黒木龍介, 村嶋慶哉, 佐藤啓明, 真柳和也, 野津翔太, 野津湧太, 伊藤岳陽, 嶋田侑治, 下崎紗綾, 藤田汐音 & 佐々木貴教, 系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発, 日本惑星科学会 2016 年度秋季講演会, ノートルダム清心女子大学, 2016 年 9 月 12-14 日
- ⑱ 芝池論人, 奥住聡, 佐々木貴教 & 井田茂, 周惑星円盤内での微衛星形成の困難, 日本惑星科学会 2016 年度秋季講演会, ノートルダム清心女子大学, 2016 年 9 月 12-14 日
- ⑲ 石澤祐弥, 佐々木貴教 & 細野七月, 巨大衝突により生じるデブリ円盤からの天王星の衛星形成, 日本惑星科学会 2016 年度秋季講演会, ノートルダム清心女子大学, 2016 年 9 月 12-14 日
- ⑳ 山敷庸亮, 伊藤岳陽, 嶋田侑治, 稲澤真里子, 佐々木貴教, 西浦理, 野津翔太, 石川裕之, 鈴木杏那, 坂上峻仁, 野津湧太, 中村尚樹, 行方宏介, 磯部洋明, 柴田一成, 下崎紗綾 & 藤田汐音, 異なるハビタブルゾーン定義の比較のための系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 22-26 日
- ㉑ 芝池論人, 奥住聡 & 佐々木貴教, 周惑星円盤内での微衛星形成とペブル集積, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 22-26 日
- ㉒ Takanori Sasaki, How long “was” a day on Earth?, UBIAS Intercontinental Academia Nagoya Workshop, Nagoya University, Japan, 6-18 March, 2016 (invited)
- ㉓ 河瀬哲弥, 佐々木貴教 & 細野七月, WPH 法による月形成シミュレーション, 日本惑星科学会 2015 年度秋季講演

会, ELSI, 2015 年 10 月 14-16 日

- ㉔ 芝池論人, 奥住聡 & 佐々木貴教, 周惑星円盤への固体物質流入と衛星形成, 日本惑星科学会 2015 年度秋季講演会, ELSI, 2015 年 10 月 14-16 日
- ㉕ 河瀬哲弥, 佐々木貴教 & 細野七月, WPH 法による月形成シミュレーション, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学, 2015 年 9 月 9-11 日
- ㉖ 芝池論人, 佐々木貴教 & 井田茂, 後期重爆撃による冥王代大陸の溶融と環境への影響, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2015 年 5 月 24-28 日

[図書] (計 2 件)

- ① 佐々木貴教, 工学社, 「惑星」の話: 「惑星形成論」への招待, 2017 年, p143
- ② 佐々木貴教 他, 青土社, 現代思想 2017 年 7 月号 特集=宇宙のフロンティア, 2017 年, p140-149
- ③ 佐々木貴教 他, 朝倉書店, 系外惑星の事典, 2016 年, p226-227

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://sasakitakanori.com>

アウトリーチ活動

一般講演 3 7 件

系外惑星データベース

<http://www.exoplanetkyoto.org>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 貴教 (Takanori Sasaki)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 7 0 6 1 4 0 6 4

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし