

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03950

研究課題名(和文)大規模数値計算を用いた巨大天体衝突に伴う多様な衛星系形成モデルの構築

研究課題名(英文) Numerical simulations of the formation of various satellite systems via giant impact

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大規模N体計算を用いて、多様なデブリ円盤からの多様な衛星系の形成過程を調べた。以下に主な3つの成果について紹介する。(1) 天王星への巨大天体衝突後に形成されるデブリ円盤からの天王星衛星系の形成過程を検証し、問題点の指摘およびその解決策の提示を行った。(2) 準惑星ハウメアのリングおよび衛星が天体衝突によって形成されたとするシナリオを提示した。(3) 大量のパラメータスタディにより、太陽系外衛星も含む多様な衛星の巨大天体衝突による形成過程を統計的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大天体衝突後に形成されるデブリ円盤からの、太陽系の天体(月・天王星衛星・ハウメアリングなど)の形成過程を明らかにするだけでなく、系外衛星を含めた多様な衛星系の形成過程を検証した点は、国際的にもユニークで新しい試みであり学術的意義は大きい。また系外衛星の候補天体が報告されつつある今、世界に先駆けて系外衛星形成に関する研究を行ったことも重要である。さらに近年、系外惑星観測や太陽系内の天体探査に対する社会全体の関心は急速に高まっており、本成果の社会的意義も大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：Large-scale N-body calculations were executed to investigate the formation process of various satellite systems from diverse debris disks. Three main results are introduced below. (1) We examined the formation process of Uranian satellite systems from debris disks formed after the giant impact on Uranus, and problems are pointed out and solutions are proposed. (2) We proposed a scenario in which the rings and satellites of the dwarf planet Haumea were formed by an impact on Haumea. (3) We statistically verified the formation process of various satellites, including extrasolar satellites, by giant impact using a large number of parameter studies.

研究分野：惑星科学

キーワード：衛星系形成 N体計算 月形成 天王星衛星系形成 巨大天体衝突 ハウメア

1. 研究開始当初の背景

(1) 惑星形成過程の最終段階では、巨大な天体同士の衝突が頻繁に起きていると考えられている。地球も複数回の巨大天体衝突を経験したと考えられており、その際に地球の周囲にばらまかれた衝突破片が再集積することで、月が形成されることが数値計算によって示されてきた。一方で、より一般的な巨大天体衝突による衛星系形成に関する研究はあまり進んでいなかった。

(2) 近年、地球の月以外にも、例えば火星や天王星の衛星系が巨大天体衝突によって形成される可能性が明らかになってきた。これらの研究は、系外惑星も含めたより一般的な惑星系においても、巨大天体衝突による衛星系形成が普遍的に起こりうる可能性を示唆している。

(3) 研究代表者は、衛星系形成過程に関する大規模数値計算を行うために、様々な計算機上で利用できる汎用性の高い N 体計算コードを開発した[1]。この計算コードを拡張し、さらに計算の高速化をはかることで、大規模なパラメータスタディを行うことが可能な状況であった。

2. 研究の目的

(1) 多様な原始惑星同士の巨大天体衝突によって形成された多様な衝突破片円盤内での、多様な衛星系に対する形成条件を明らかにする。

(2) 惑星形成過程を同時に解くことで、実際に起こりうる巨大天体衝突によって、系外惑星を含めた一般的な惑星の周囲にどのような衛星系が形成されうるかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 既存の N 体計算コードを、物性を考慮したより汎用的な計算コードに拡張し、さらに大量の GPU 搭載計算機やスーパーコンピュータ等を利用することで計算の高速化をはかる。この計算コードを用いて、様々なパラメータのもとで衛星系形成過程に関する大規模 N 体計算を行う。

(2) 惑星形成過程に関する大規模モンテカルロ計算を行い、実際に起きうる原始惑星同士の巨大天体衝突のパラメータを推定し、これを N 体計算の結果と合わせることで、各惑星系で実際に形成されうる衛星系の特徴を統計的に導き出す。

4. 研究成果

(1) N 体計算コードを天王星衛星系に適用した[2]。先行研究の結果から示唆される巨大天体衝突後のデブリ円盤を初期条件として、衛星の集積過程に関する N 体計算を行うことで、天王星衛星系の形成可能性を検証した。さらにその結果をもとに、周天王星円盤の熱力学的進化過程に関する計算を行い、天王星衛星系の形成過程を明らかにした[3] (図 1, 2)。

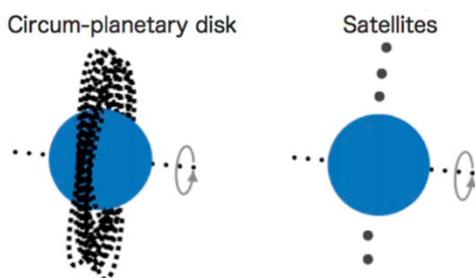


図 1. 天王星衛星系の形成過程の模式図

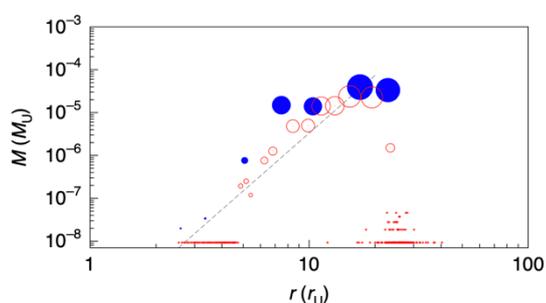


図 2. N 体計算による衛星系の再現計算結果

(2) 天王星衛星系について、周天王星円盤の進化を考慮した場合のデブリ円盤を初期条件として N 体計算を行い、最終的に形成される衛星系の特徴を定量的に評価した[4]。実際に天王星衛星の個数等が再現できることがわかった一方で、現在の衛星系には存在しない衛星が複数形成されてしまうことが明らかになった。

(3) N 体計算を用いて、準惑星ハウメアのリングおよび衛星が天体衝突によって形成されたとするシナリオを提示した[5]。衝突破片から形成された衛星のうち、ハウメアの近傍にある衛星の潮汐破壊についてラブルパイル物体の反発係数を変数とした N 体計算を行ったところ、ロッシュ限界半径の位置が現在のリングの位置付近になることを示した (図 3, 4)。

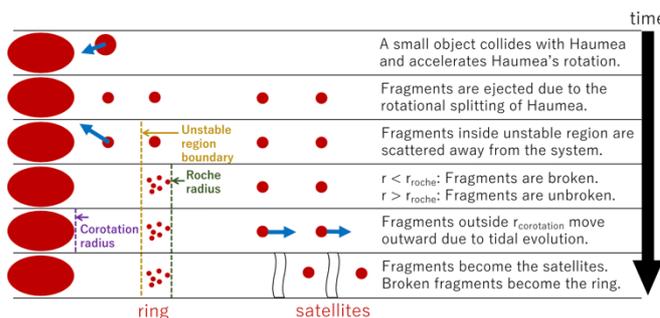


図 3. ハウメア系の形成シナリオの概略図



図 4. N 体計算による潮汐破壊計算結果

(4) 系外衛星も視野にいれ、一般的な惑星形成過程における巨大天体衝突から生じる多様な質量・半径のデブリ円盤に対して N 体計算を行い、多様な衛星の形成過程について統計的に調べた[6]。その結果、常にロッシュ限界半径のやや外側に最大の衛星が形成されること、初期円盤半径が大きい場合にはさらにその外側に複数の衛星が形成されることなどがわかった。

(5) PEZY-SC を用いたラブルパイル N 体計算コードを拡張し、計算の大幅な高速化を実現することで、月形成過程に関する長期間・大規模数値計算を行った[7]。原始月円盤の長期進化を考慮した N 体計算により、新たな月形成プロセスについて検証し、その可能性および問題点を明らかにした。

(6) 開発した数値計算コードを応用することで、当初の予定にはなかった複数の課題にも取り組んだ。N 体計算を用いて、連星周りの系外惑星の軌道進化過程を明らかにした[8] (図 5)。また木星のガリレオ衛星について、ペブル集積を考慮した新しい形成シナリオの提案を行い、数値計算による検証を行った[9]。さらにこれら氷衛星の熱力学的進化を解くための数値流体計算コードの開発を行った[10]。

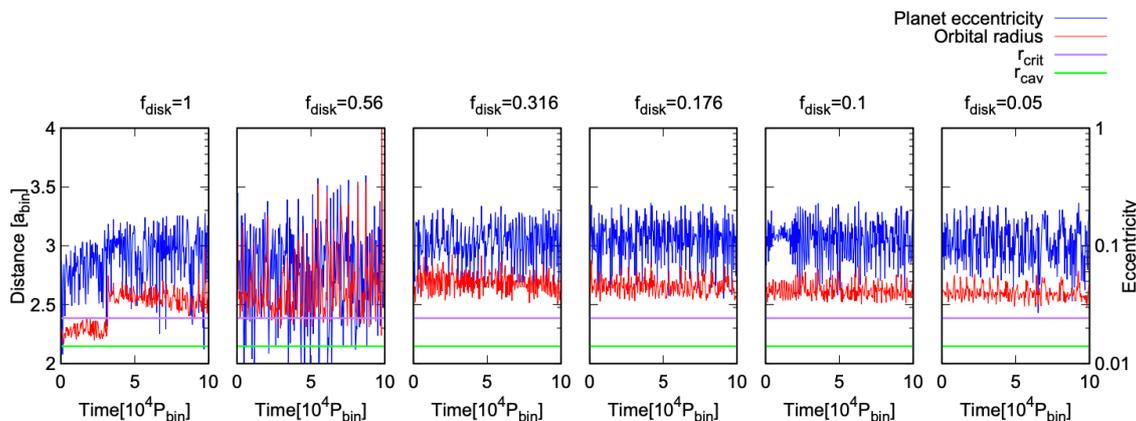


図 5. N 体計算による連星周りの系外衛星の軌道進化過程の計算結果

<引用文献・学会発表>

1. T. Sasaki & N. Hosono, *The Astrophysical Journal* **856**, 175(14pp) (2018)
2. Y. Ishizawa, T. Sasaki & N. Hosono, *The Astrophysical Journal* **885**, 132(10pp) (2019)
3. S. Ida, S. Ueta, T. Sasaki & Y. Ishizawa, *Nature Astronomy* **4**, 880-885 (2020)
4. 木原, 佐々木 & 井田, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会 (2021)
5. I. Sumida, Y. Ishizawa, N. Hosono & T. Sasaki, *The Astrophysical Journal* **897**, 21(11pp) (2020)
6. Y. Hasegawa, Y. Ishizawa, N. Hosono & T. Sasaki, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020* (2020)
7. T. Sasaki & N. Hosono, submitted
8. A. Yamanaka & T. Sasaki, *Earth, Planets and Space* **71**, 82 (2019)
9. Y. Shibaike, C. W. Ormel, S. Ida, S. Okuzumi & T. Sasaki, *The Astrophysical Journal* **885**, 79(19pp) (2019)
10. 村嶋, 細野, 斎藤 & 佐々木, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Naho Fujita, Yasunori Hori, Takanori Sasaki	4. 巻 928
2. 論文標題 Orbital Evolution of Close-in Super-Earths Driven by Atmospheric Escape	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 105-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac558c	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 Iori Sumida, Yuya Ishizawa, Natsuki Hosono, Takanori Sasaki	4. 巻 897
2. 論文標題 N-body Simulations of Ring Formation Process around the Dwarf Planet Haumea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 21-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab93bb	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, Ueta Shoji, Sasaki Takanori, Ishizawa Yuya	4. 巻 4
2. 論文標題 Uranian satellite formation by evolution of a water vapour disk generated by a giant impact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 880-885
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41550-020-1049-8	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 Ishizawa Yuya, Sasaki Takanori, Hosono Natsuki	4. 巻 885
2. 論文標題 Can the Uranian Satellites Form from a Debris Disk Generated by a Giant Impact?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 132 ~ 141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab48ef	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 Shibaïke Yuhito, Ormel Chris W., Ida Shigeru, Okuzumi Satoshi, Sasaki Takanori	4. 巻 885
2. 論文標題 The Galilean Satellites Formed Slowly from Pebbles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 79 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab46a7	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 Yamanaka Akihiro, Sasaki Takanori	4. 巻 71
2. 論文標題 Orbital evolution of a circumbinary planet in a gaseous disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 71 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1064-0	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 Yamashiki Yosuke A., Maehara Hiroyuki, Airapetian Vladimir, Notsu Yuta, Sato Tatsuhiko, Notsu Shota, Kuroki Ryusuke, Murashima Keiya, Sato Hiroaki, Namekata Kosuke, Sasaki Takanori, Scott Thomas B., Bando Hina, Nashimoto Subaru, Takagi Fuka, Ling Cassandra, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari	4. 巻 881
2. 論文標題 Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2a71	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

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Naho Fujita, Yasunori Hori, Takanori Sasaki
2. 発表標題 Observational implications of atmospheric and orbital evolution of super-Earths
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Yosuke A. Yamashiki, Hiroyuki Maehara, Vladimir Airapetian, Yuta Notsu, Kosuke Namekata, Riko Shimizu, Nami Kimura, Tatsuhiko Sato, Takanori Sasaki
2. 発表標題	Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability, Search for Extra-terrestrial Mother Plants Catalogue for influence of stellar activities on the extraplanetary system
3. 学会等名	Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	山敷庸亮, Vladimir Airapetian, 佐藤達彦, 野津湧太, 前原裕之, 行方宏介, 野津翔太, 佐々木貴教, 佐藤啓明, 木村なみ, 清水里香, 大山航, 清水海羽, 白樫聖夢, 高木風香, 坂東日菜, 野上大作, 柴田一成, 他 ExoKyoto 開発チーム
2. 発表標題	恒星高エネルギー粒子のフルエンスを考慮した惑星への影響評価(その2)
3. 学会等名	日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	石澤祐弥, 井田茂, 佐々木貴教
2. 発表標題	原始天王星への巨大衝突により生じた蒸気円盤におけるダスト成長と微衛星形成
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

1. 発表者名	藤田菜穂, 堀安範, 佐々木貴教
2. 発表標題	短周期 super-Earth の大気的光蒸発に伴う軌道進化: 観測への示唆
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

1. 発表者名	山敷庸亮, Vladimir Airapetian, 佐藤達彦, 野津湧太, 前原裕之, 行方宏介, 野津翔太, 佐々木貴教, 佐藤啓明, 木村なみ, 清水里香, 高木風香, 坂東日菜, 野上大作, 柴田一成, 他 ExoKyoto 開発チーム
2. 発表標題	恒星高エネルギー粒子のフルエンスを考慮したハビタブルゾーンの再評価
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

1. 発表者名	木原遥大, 佐々木貴教, 井田茂
2. 発表標題	N体計算を用いた天王星周り衛星形成過程の研究
3. 学会等名	日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	村嶋慶哉, 細野七月, 斎藤貴之, 佐々木貴教
2. 発表標題	Modification of SPH for the simulation of an icy moon with internal ocean
3. 学会等名	日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Naho Fujita, Yasunori Hori, Takanori Sasaki
2. 発表標題	Orbital evolution of close-in super-Earths via atmospheric escape
3. 学会等名	JpGU-AUG Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 Yuichi Hasegawa, Yuya Ishizawa, Natsuki Hosono, Takanori Sasaki
2. 発表標題 Parameter Study of Satellite Formation via Giant Impact by N-body Simulation
3. 学会等名 JpGU-AUG Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keiya Murashima, Takanori Sasaki, Natsuki Hosono, Yosuke A. Yamashiki
2. 発表標題 Toward a global SPH simulation of an icy moon with internal ocean
3. 学会等名 JpGU-AUG Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke A. Yamashiki, Hiroyuki Maehara, Vladimir Airapetian, Yuta Notsu, Tatsuhiko Sato, Takanori Sasaki
2. 発表標題 Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability
3. 学会等名 JpGU-AUG Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川祐一, 細野七月, 佐々木貴教
2. 発表標題 N 体計算を用いた巨大天体衝突に伴う衛星系形成のパラメータスタディ
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中陽裕, 佐々木貴教, 芝池諭人
2. 発表標題 超木星質量の惑星周囲における巨大衛星の形成可能性
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村嶋慶哉, 細野七月, 斎藤貴之, 佐々木貴教
2. 発表標題 衛星の内部海のシミュレーションのための SPH 法のコード開発
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田菜穂, 堀安範, 佐々木貴教
2. 発表標題 短周期 super-Earth の大気散逸に伴う軌道進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山敷庸亮, 野津湧太, 前原裕之, 佐藤達彦, 野津翔太, 佐々木貴教, 佐藤啓明, 木村なみ, 清水里香, 高木風香, 坂東日菜, 野上大作, 柴田一成, Vladimir Airapetian, 他 ExoKyoto 開発チーム
2. 発表標題 大気散逸を考慮した M 型星周りのハビタブルゾーンの再評価 (2)
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Ishizawa, Takanori Sasaki & Natsuki Hosono
2. 発表標題 Formation and Orbital Evolution of the Uranian Satellites based on Giant Impact Scenario
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 Yuhito Shibaïke, Chris Ormel, Shigeru Ida, Satoshi Okuzumi & Takanori Sasaki
2. 発表標題 Origin of the Galilean satellites: Slow-pebble-accretion scenario
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 Akihiro Yamanaka & Takanori Sasaki
2. 発表標題 Orbital evolution of a circumbinary planet in a protoplanetary disk
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takanori Sasaki
2. 発表標題 Re-entry of giant-impact fragments and early evolution of the Earth's ocean
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	Yosuke A. Yamashiki, Hiroyuki Maehara, Yuta Notsu, Tatsuhiko Sato, Vladimir Airapetian, Shota Notsu, Ryusuke Kuroki, Keiya Murashima, Hiroaki Sato, Hina Bando, Kosuke Namekata, Takanori Sasaki, Scott Thomas, Daisaku Nogami & Kazunari Shibata
2. 発表標題	Radiological Assessment of Martian and Terrestrial Surface during Young Sun
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	石澤祐弥, 佐々木貴教 & 細野七月
2. 発表標題	天王星衛星のその場形成と軌道進化
3. 学会等名	日本惑星科学会2019年秋季年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	角田伊織, 石澤祐弥, 細野七月 & 佐々木貴教
2. 発表標題	N 体計算による準惑星ハウメアのリング形成過程の検証
3. 学会等名	日本惑星科学会2019年秋季年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	山敷庸亮, 野津湧太, 前原裕之, 佐藤達彦, 黒木龍介, 野津翔太, 佐々木貴教, 佐藤啓明, 村嶋慶哉, 坂東日菜, 梨元昂, 高木風香, 木村なみ, 野上大作, 柴田一成, Vladimir Airapetian, 他 ExoKyot 開発チーム
2. 発表標題	大気散逸を考慮した M 型星周りのハビタブルゾーンの再評価
3. 学会等名	日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 佐々木貴教 & 細野七月
2. 発表標題 原始月円盤の冷却進化過程を考慮した月形成 N 体計算
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石澤祐弥, 佐々木貴教 & 細野七月
2. 発表標題 IN-SITU FORMATION OF THE URANIAN SATELLITES FROM WIDE DEBRIS DISK FORMED BY GIANT IMPACT
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山敷庸亮, 前原裕之, Vladimir Airapetian, 野津湧太, 佐藤達彦, 野津翔太, 黒木龍介, 村嶋慶哉, 佐藤啓明, 行方宏介, 佐々木貴教, Scott Thomas, 坂東日菜, 梨元昂, 高木風香, Cassandra Ling, 野上大作 & 柴田 一成
2. 発表標題 恒星フレアによる太陽系外惑星ハビタビリティ評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 佐々木貴教	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 126
3. 書名 地球以外に生命を宿す天体はあるのだろうか？	

1. 著者名 京都大学宇宙総合学研究所	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 144
3. 書名 宇宙にひろがる文明	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Sasaki Takanori Online http://sasaki-takanori.com

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
---------	---------