

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13604

研究課題名（和文）高解像度シミュレーションを用いた周惑星円盤の形成・進化モデルの構築と衛星形成

研究課題名（英文）Modeling of the formation and evolution of circumplanetary disks and satellite formation

研究代表者

藤井 悠里 (Fujii, Yuri)

京都大学・人間・環境学研究所・助教

研究者番号：40815164

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）：惑星は原始惑星系円盤の中で誕生し、木星のような巨大ガス惑星が生まれる際には、惑星の周りに回転しながら円盤状に集積するガスによって周惑星円盤が形成される。周惑星円盤は衛星形成の場であると考えられており、周惑星円盤の構造は其中で形成される衛星を特徴付ける重要な要素である。本研究では、その進化の最終段階である散逸中の周惑星円盤をモデル化し、其中で形成された衛星の軌道進化を調べた。形成当初の木星および土星の内部構造を計算し、それぞれが持つ磁場の強さによって、円盤の進化が異なることを明らかにした。そして、長年の謎であった、木星と土星の衛星系の構造の違いを説明するシナリオを構築することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

衛星系の力学構造は、衛星の起源を理解する上で非常に重要であることはもちろん、惑星系の多様性の理解にも役立つトピックである。これまでに多種多様な惑星系が発見されているが、それらは遠くにあるため、その起源を明らかにするのは容易ではない。近傍の惑星系は太陽系のみであるが、衛星系は太陽系内においても複数存在する。本研究で構築した木星と土星の衛星系の起源に関する理論を足掛かりとして、他の衛星系や岩石惑星系の理解に貢献することができる。

また、太陽系の天体は専門家以外の方々にも馴染みがあり、アウトリーチの題材としても意義深い。

研究成果の概要（英文）： In the formation phase of gas giants in protoplanetary disks, circumplanetary disks are formed by rotating gas around the planet. Circumplanetary disks are thought to be the site of satellite formation, and the structure of circumplanetary disks is an important factor in characterizing the satellites formed in the disks.

In this study, we model dissipating circumplanetary disks, the final stage of their evolution, and investigate the orbital evolution of satellites forming in the disks. We calculated the thermal evolution of young Jupiter and young Saturn and found that the evolution of the disks is affected by the planetary magnetic field depending on the strength. We propose a scenario that explains the differences between the satellite systems around Jupiter and Saturn, which had long been a mystery.

研究分野：天文学

キーワード：衛星形成 周惑星円盤

1. 研究開始当初の背景

太陽系には複数の衛星を持つ惑星が複数存在する。それら衛星系の中には内部海を持つ衛星もあり、最初の地球外生命体発見の候補として、衛星への関心は学術的にも社会的にも高まりつつある。また、スケールは異なるものの、力学的な系として見ると、中心惑星 + 衛星系は中心恒星 + 惑星系、特に近年注目を集めている“複数の地球型惑星を持った系”と類似しており、衛星系はいわば惑星系のミニチュアである。この類似性から、これらの系の形成にはスケールによらない普遍的な法則がある可能性があり、その検証のためにも衛星系がいつどのような過程を経てできたのかという「衛星系の起源」を明らかにすることは重要である。しかしながら、個々の衛星に関しては内部構造や大気組成などの観測に基づく形成過程の研究があるものの、系として捉えた場合には理論の不確定性が多く、統一的な理解が得られているとは言えない。惑星形成論を応用することも現実的でない。というのも、系外惑星の多様性が明らかになりつつある一方で、その起源は未だ謎に包まれているというのが現状であり、惑星形成論は統一に向かうというよりも混沌としてきている。その理由の一つに、遠くにある系外惑星はその詳細を観測によって調べることが困難であることが挙げられる。

衛星の中でも特にその形成が困難であることが知られているのが、木星のガリレオ衛星に代表されるガス惑星の周りの比較的大きな衛星である。木星は、太陽が生まれた際にその残りのガスによって太陽の周りに形成された原始太陽系円盤の中で生まれたと考えられている。原始太陽系円盤のガスが木星に流入し、その大気を形成する際には、角運動量の保存から円盤状のガスの流れができる。この円盤は周惑星円盤と呼ばれ、ガリレオ衛星は其中で形成されたと考えられている。しかし、その過程の詳細は未だ明らかにされていない。ガス惑星の衛星系の起源が明らかになると、イオのような火山活動が活発な衛星やエウロパのような内部海を持った衛星がどのように作り分けられたのかを理解する手がかりとなる。また、近年、系外衛星の観測が可能になりつつあるため、系外衛星も含めた衛星形成一般の理論を系外衛星の発見に先駆けて整備しておくことも重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木星のガリレオ衛星や土星のタイタンのようなガス惑星の周りの巨大衛星の形成環境である周惑星円盤の形成および進化のモデル化を行うことである。特に、これまでは簡単化のために疎かにされてきた周惑星円盤の温度構造に重点を置く。ガス惑星の形成の場である原始惑星系円盤から衛星形成の場である惑星近傍の周惑星円盤へのガスの流れを考慮し、周惑星円盤の面密度・温度構造の進化とそれに伴う円盤ガスの電離状況を計算し、周惑星円盤のガスの磁場との相互作用や降着率を評価する。円盤進化は周惑星円盤の散逸までを取り扱う。そして、得られた円盤モデルの中で形成され得る衛星系と太陽系の中の衛星系との比較検討を行い、ガス惑星の衛星系の起源を明らかにする。

3. 研究の方法

周惑星円盤の形成に着目し、原始惑星系円盤内でどのようにガスが木星の重力圏に流れ込むのか、また、流れ込んだガスの運動や温度分布はどのようにになっているのかを調べる。大局シミュレーションでは解像度が低いという問題があり、局所シミュレーションではギャップと呼ばれる原始惑星系円盤内の惑星の軌道に見られる密度の薄い領域の形成など、大局的な現象を考慮できないといった問題があるため、適合格子細分化法 (AMR; Adaptive Mesh Refinement) を実装した原始惑星系円盤のグローバルシミュレーションを行う。計算には NIRVANA 3.5 コード (Ziegler 2004, 2011) を改良したものをを用いる。ガスの流入の様子を調べるためには温度構造が非常に重要であるため、輻射輸送も同時に解く。円盤の大部分は光学的に厚いため、拡散近似を用いた輻射流体力学計算モジュールを用いる。その際には断熱近似が成り立たない高温領域の取り扱いが含まれるため、水素やヘリウム分子の解離や電離を考慮した状態方程式 (Tomida et al. 2013, 2015) を用いる。これにより、より現実的な温度分布を得ることができると。

シミュレーション結果をもとに、周惑星円盤のモデル化を行う。円盤内で形成される衛星の軌道は、衛星が円盤ガスと角運動量をやり取りすることにより刻一刻と変化する。衛星の移動の向きや速さは円盤の面密度および温度構造に強く依存する。また、最終的に得られる衛星系の力学的な構造は、大まかには周惑星円盤が散逸し、それ以上ガスと角運動量のやり取りを行わなくなった際に決定される。よって、本研究では、原始惑星系円盤からの質量流入の減衰に伴い散逸していく周惑星円盤を1次元でモデリングする。周惑星円盤の構造を単純な半径の関数としてべ

キ分布で与える従来の研究とは異なり、面密度と温度構造を同時に解きながら、周惑星円盤の時間進化を計算する。

多くの場合、周惑星円盤内の衛星は円盤ガスとの相互作用で角運動量を失い中心の惑星に向かって移動するため、形成された衛星を中心惑星への落下で失わないためには何らかの構造が必要になる。本研究では、惑星磁場による効果を検討する。惑星近傍に惑星磁場による磁気圏が生じる際には、円盤ガスが磁力線に沿って惑星の極方向から降着できる可能性がある。磁気圏降着が起こると、磁気圏境界の内側では円盤ガスが存在しないため、衛星が角運動量を失うことがなくなる。その場合には、外側から移動してきた衛星が磁気圏の境界(=円盤内縁)に捕獲される可能性がある。これらの可能性について探るため、若い惑星の内部進化を計算し、惑星の表面における磁場強度を推定する。そして、磁気圏降着を考慮した円盤モデルを構築する。惑星の内部進化の計算は、共同研究者である堀氏に依頼する。

次に、散逸中の周惑星円盤における衛星の軌道進化について、離心率や衛星同士の相互作用を無視した計算を行い、円盤進化と衛星の移動との関係についての傾向を把握する。そして、注目すべきパラメータ範囲を絞ったのち、多数の N 体シミュレーションを用いて離心率や衛星同士の相互作用を考慮した精密な計算を行い円盤散逸時に形成される衛星系の力学構造や氷・岩石比などを調べる。そして、実際の衛星系の構造と比較検討を重ね、それらの形成過程を再現できるシナリオを導く。

4. 研究成果

本研究では、衛星が生まれる環境である周惑星円盤の温度や面密度、そしてその時間進化について調べた。形成当初の木星および土星の内部構造を計算し、それぞれの磁場強度を求めた。

木星の周りでは、一定の間、磁気圏降着が可能な時期があることが分かった。よって、磁気圏降着中は周木星円盤の内縁は木星表面に達しないため、木星に向かって移動してきた衛星は円盤の内縁で停止する。さらに後続の衛星が共鳴軌道に捕獲されることによって複数の衛星を持つ系を構築することが可能である。また、円盤の散逸とともにその面密度が小さくなり円盤の温度が下がると、ガスの電離度が下がるため磁気圏降着が起こらなくなる。よって、ガリレオ衛星のような衛星系を形成するためには、円盤が比較的高温の時期に共鳴軌道に捕獲することが好ましいことが分かった。つまり、衛星の表面に十分な量の氷成分を獲得するためには、衛星がある程度成長した後に、氷ペブルなどによる供給があったことを示唆する。今後は氷のみならず、微量元素についても着目した研究を行いたい。

一方、土星の周りの円盤では磁気圏降着が起こらないことを明らかにした。これはタイタンのように大きな衛星が惑星から少し離れた場所に一つだけ存在する系を説明するのに好都合である。従来のモデルでは、巨大衛星を円盤内に留める機構が存在すると、複数の衛星が生き残り、そのような気候が存在しない場合には全ての衛星が失われてしまうという状況が非常に起こりやすいことが指摘されていた。我々は、周惑星円盤の温度および面密度構造を精密に計算して決めたことにより、土星から少し離れた位置に衛星の移動が外向きになる領域が一定期間存在することを発見した。この領域に捕らえられた衛星のみが生き延び、他の衛星が土星に落下することで、土星-タイタン系のように巨大衛星が一つだけしか存在しない衛星系の形成を再現することができる。

以上のように、長年の謎であった木星と土星の衛星系の構造の違いを説明するシナリオを構築することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fujii I. Yuri, Ogihara Masahiro	4. 巻 635
2. 論文標題 Formation of single-moon systems around gas giants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L4 ~ L4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/201937192	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 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler	4. 巻 13
2. 論文標題 Gas flow into the vicinity of gas giants and formation of circumplanetary disks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019	6. 最初と最後の頁 1408
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33件（うち招待講演 7件/うち国際学会 15件）

1. 発表者名 藤井悠里
2. 発表標題 ガス惑星周りの巨大衛星の形成
3. 学会等名 形成中の惑星およびその兆候のALMA観測に向けた勉強会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Masahiro Ogihara, and Yasunori Hori
2. 発表標題 Formation of Dynamically Distinct Satellite Systems of Jupiter and Saturn
3. 学会等名 The 82nd Fujiwara Seminar: To Expand Our Knowledge About the Solar System Through Future Exploration Mission（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, and Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Formation of a single large moon around a gas giant: Saturn-Titan system
3. 学会等名 Europlanet Science Congress 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井悠里
2. 発表標題 神話通りの衛星形成シナリオ!? 天文学×人文学のいろいろ
3. 学会等名 第52回天文・天体若手夏の学校(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井悠里
2. 発表標題 Formation of satellite systems around Jupiter and Saturn
3. 学会等名 理論天文学ミニワークショップ 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井悠里
2. 発表標題 ガス惑星の磁場強度の違いによる周惑星円盤構造と衛星系の軌道
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, and Masahiro Ogihara
2. 発表標題 On the formation scenario of giant-moon systems
3. 学会等名 Circumplanetary Disks and Satellite Formation II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井悠里, 荻原正博
2. 発表標題 周惑星円盤の進化と衛星軌道
3. 学会等名 第22回惑星圏研究会 (SPS2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii and Masahiro Ogihara
2. 発表標題 A Possible Scenario of Configuring Saturn-Titan System
3. 学会等名 COSPAR-2021-Hybrid (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii and Masahiro Ogihara
2. 発表標題 A Potential Scenario the Formation of Saturn-Titan System
3. 学会等名 Division for Planetary Sciences of the American Astronomical Society 52nd Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii and Masahiro Ogihara
2. 発表標題 A Possible Formation Scenario of Saturn-Titan System
3. 学会等名 Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井悠里, 荻原正博
2. 発表標題 周惑星円盤の散逸と衛星系の軌道進化
3. 学会等名 第8回衛星系研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井悠里, 荻原正博
2. 発表標題 散逸中の周惑星円盤における衛星系の形成について
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler,
2. 発表標題 Gas Flow into the Vicinity of Gas Giants and Formation of Circumplanetary Disks
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 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 Early-phase Simulations of Circumplanetary Disk Formation
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamic Simulation of the Formation of Circumplanetary Disks
3. 学会等名 Zooming in on Star Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井悠里, 萩原正博
2. 発表標題 土星衛星タイタンの起源
3. 学会等名 新学術領域「星惑星形成」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井悠里, 萩原正博
2. 発表標題 周土星ガス円盤における単一巨大衛星系の形成
3. 学会等名 第7回衛星系研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井悠里, 荻原正博
2. 発表標題 周惑星円盤における単一衛星系の形成について
3. 学会等名 32回理論懇シンポジウム「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井悠里, 荻原正博
2. 発表標題 周惑星円盤起源の単一衛星を持った衛星系の形成について
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, 富田賢吾, Udo Ziegler
2. 発表標題 周惑星円盤の形成に関する輻射流体力学シミュレーション
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 藤井悠里, Oliver Gressel, 富田賢吾, Udo Ziegler
2. 発表標題 ガス惑星近傍へのガスの流入と周惑星円盤の形成について
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 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Udo Ziegler
2. 発表標題 RHD Simulations of Formation of Circumplanetary Disks
3. 学会等名 Copenhagen-Lund Disk Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 On the gas flow to the vicinity of gas giants and the temperature structure of the system
3. 学会等名 Japanese-German meeting on Exoplanets and Planet Formation 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamic Simulations of the Gas Flow into the vicinity of gas giants
3. 学会等名 The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 Radiation Hydrodynamic Simulations of the Formation of Circumplanetary Disks
3. 学会等名 Frejus meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Oliver Gressel, Kengo Tomida, and Udo Ziegler
2. 発表標題 On the Gas Flow into the Vicinity of Gas Giants and the Temperature Structure of Circumplanetary Disks
3. 学会等名 The 20th Symposium on Planetary Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, Udo Ziegler
2. 発表標題 輻射流体力学シミュレーションを用いた周惑星円盤の形成について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, Udo Ziegler
2. 発表標題 周惑星円盤の形成に関する輻射流体力学シミュレーション
3. 学会等名 第6回衛星系研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, 富田賢吾, Udo Ziegler,
2. 発表標題 周惑星円盤の形成とその構造について
3. 学会等名 新学術領域研究「新しい星形成理論によるパラダイムシフト:銀河系におけるハビタブル惑星開拓史の解明」キックオフミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, 富田賢吾, Udo Ziegler,
2. 発表標題 ガス惑星近傍へのガスの流れと温度構造
3. 学会等名 日本惑星科学会惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井悠里, Oliver Gressel, 富田賢吾, Udo Ziegler,
2. 発表標題 周惑星円盤の形成についての輻射流体力学シミュレーション
3. 学会等名 第31回理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へむけての再考」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri I. Fujii, Hiroshi Kobayashi, Sanemichi Z. Takahashi, & Oliver Gressel
2. 発表標題 Formation and Evolution of Satellite Systems: Lifetime of protosatellites
3. 学会等名 UBIAS Topic of the year 2018 "Aging - Life, Culture, Civilizations" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Safety Zone Saves Giant Moons from Fatal Plunge http://en.nagoya-u.ac.jp/research/activities/news/2020/03/safety-zone-saves-giant-moons-from-fatal-plunge.html 土星の衛星タイタンがひとりぼっちになった訳 http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20190309_sci1.pdf</p>

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
研究協力者	荻原 正博 (Ogihara Masahiro)		
研究協力者	堀 安範 (Hori Yasunori)		
研究協力者	Gressel Oliver (Gressel Oliver)		
研究協力者	富田 賢吾 (Tomida Kengo)		
研究協力者	Ziegler Udo (Ziegler Udo)		

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			
ドイツ	AIP			
デンマーク	The Niels Bohr Institute			