

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340125

研究課題名(和文) 太陽系内氷小天体の起源と進化に関する理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study on the origin and evolution of small icy bodies in the solar system

研究代表者

大槻 圭史(Ohtsuki, Keiji)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00250910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：まず、不規則衛星の起源等に関連して重要である巨大惑星の重力による微惑星の一時捕獲過程について詳細に調べ、木星の順行不規則衛星の起源の一つとしてヒルダ群小惑星領域が考えられること、等を明らかにした。次に土星リング中の粒子集積および衝突破壊過程を調べ、小衛星核の周囲への粒子集積条件、ならびに惑星潮汐場での衝突破壊条件を明らかにした。また巨大惑星の規則衛星形成と関連して重要である周惑星円盤からのガス抵抗による微惑星捕獲過程に着目し、周惑星円盤からのガス抵抗を考慮した軌道計算を実行して捕獲確率を求めた。

研究成果の概要(英文)：First, we examined temporary capture of planetesimals by a giant planet, which likely played an important role in capture of irregular satellites of giant planets. Using numerical simulations, we investigated capture rates as well as their dependence on various orbital parameters. Our results suggest that the source region of some of the prograde irregular satellites of Jupiter corresponds to the Hilda region. Next, we examined the process of particle accretion and collisional disruption of aggregates in the tidal environment. We obtained the critical radial distance for particle accretion, and clarified the condition for disruption. Finally, we examined capture of planetesimals by the circumplanetary gas disk of a growing giant planet, which is important in relation to the origin of regular satellites of giant planets. We obtained capture rates and also investigated their dependence on various parameters.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：衛星 リング 巨大惑星

1. 研究開始当初の背景

2004年7月に土星に到着し土星周回軌道から観測を続ける探査機カッシーニは土星の衛星・リング系に関する我々の知見を飛躍的に増大させた。一方、巨大惑星の不規則衛星が多数発見され総数は百を超える。さらに近年、高精度流体シミュレーションを用いた研究等により巨大惑星の形成過程の理解が大きく進んだため、巨大惑星の周囲での衛星形成過程もより現実的なものが提案されてきた。このような状況の中にあつて、探査機・望遠鏡による観測を念頭において、これらを総合的に理解するために理論研究の推進が必要となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、以下のことを目的として研究を行った。(1) 巨大惑星の重力により微惑星が一時的に捕獲される、一時捕獲という現象を詳しく解析し、その過程と不規則衛星の起源との関連を解明すること。(2) 巨大惑星の規則衛星の起源と関連して、周惑星ガス円盤から受けるガス抵抗により微惑星が捕獲される過程の詳細を調べ、衛星形成において微惑星が果たす役割を明らかにすること。(3) リング-衛星系の起源進化を考える上で重要となる粒子円盤での角運動量輸送過程を解明するために、粒子の自転の効果も考慮して、円盤内での粒子同士の衝突と重力散乱による角運動量輸送効率(粘性)を求めること。(4) リング-衛星系における粒子集積の基礎過程を明らかにするため、相互重力による粒子の集積率ならびに小衛星への粒子集積過程の詳細を明らかにすること。(5) リング-衛星系における粒子集積の基礎過程として、惑星潮汐場において粒子同士が重力によって集まって形成されたアグリゲイトが衝突する際の破壊条件の解明。(6) 太陽系における衛星系の多様性の起源を理解するために、粒子円盤から複数の衛星系が形成される過程を明らかにすること。

3. 研究の方法

以下の手法を用いた理論シミュレーションを実施した：(1) 太陽、惑星、微惑星からなる系に対する三体問題軌道計算、(2) (1)に周惑星円盤からのガス抵抗を考慮した計算、(3) 粒子同士の衝突及び重力相互作用を考慮した局所N体シミュレーション、(4) 粒子同士の衝突及び重力相互作用を考慮した大域的N体シミュレーション。

4. 研究成果

本研究により、以下のような成果を得た。

(1) 巨大惑星の重力による微惑星の一時捕

獲過程は、不規則衛星の起源等に関連して重要である。本研究では、局所三体問題軌道計算ならびに大域的三体問題軌道計算を用いて、巨大惑星による微惑星一時捕獲過程を詳細に調べた。その結果、捕獲中の軌道の形状は局所計算と同様に4つに分類でき、微惑星のエネルギーと軌道離心率に依存すること、順行軌道への捕獲は惑星より内側にあつた微惑星の方が起こりやすいこと、木星の順行不規則衛星の起源の一つとして、ヒルダ群小惑星領域が考えられること、等が明らかになった。

(2) 巨大惑星の規則衛星形成に関して、ある程度大きな微惑星はガス流とは独立に運動して惑星に近づき、周惑星円盤からのガス抵抗によってエネルギーを散逸して捕獲されると考えられる。本研究ではこの過程に着目し、周惑星円盤からのガス抵抗を考慮した三体問題軌道計算を実行して捕獲確率を求めた。その結果、アブレーションの効果も考慮しても捕獲確率に大きな変化はないが、捕獲された時の微惑星サイズはかなり小さくなること、微惑星空間分布が非一様の場合には、捕獲率は大きく減少すること、等が明らかになった。また、周惑星円盤による微惑星捕獲と不規則衛星の起源との関連についても詳細に調べた。

(3) 惑星リングでは粒子間の衝突と重力散乱により角運動量が輸送され、その効率は粘性によって表される。本研究ではN体シミュレーションを用いて惑星リングの粘性を数値的に求め、様々なパラメータに対する依存性を調べた。その結果、粒子の反発係数を変えると粘性の値は2~3倍程度、変化すること、粒子間相互重力の効果が強くなりアグリゲイトが形成されるリング外縁部での粘性は、そのような効果を見積もった従来の見積りより小さくなること、等を明らかにした。また計算結果を再現する近似式を導出した。

(4) 土星リング中およびリング外縁付近に存在する小衛星は粒子の集積によって形成されたと考えられており、その形成過程ならびに形成条件を明らかにすることが、リング衛星系の起源の解明のために必要である。本研究では三体問題軌道計算とN体シミュレーションを用いて土星リング中の小衛星核への粒子集積率を調べた。その結果、小衛星核の周囲に粒子層が形成されていない時の集積率は三体軌道計算結果から得られる集積率で記述できること、粒子層が小衛星の重力圏を埋め尽くすと集積率が減少し、粒子の集積と離脱を繰り返す平衡状態に達すること、等が明らかになった。また土星Cリングより

内側の領域では重力による粒子集積はできないこと、リングの厚さが薄くても、厚さ以上の大きさの小衛星の集積が可能であること、等を明らかにした。

(5) 土星Fリングの領域では、粒子の物理半径と重力圏の半径が似た大きさであるため、衝突した天体はその条件によって、合体する場合もあれば破壊する場合もある。これはリング衛星系の起源進化を考える上で重要である。本研究では惑星潮汐場にある小粒子が重力によって集まってできたアグリゲイト同士が衝突する過程をN体シミュレーションによって調べ、破壊の条件を求めた。その結果、自由空間での衝突に対して従来の研究で得られていた、最大破片サイズと衝突エネルギーの関係、いわゆる普遍法則が、惑星潮汐場では成り立たないことを明らかにした。

(6) 太陽系の惑星が持つ衛星系は惑星間で様々であり、その多様性の解明は惑星形成過程を理解する手掛かりを与える。本研究では、惑星の周りにある粒子円盤から複数の衛星が形成される過程を、N体シミュレーションを用いて調べた。その結果、形成される衛星系の特徴は中心惑星の質量に対する円盤質量の値によって大きく異なり、惑星に対する円盤質量比が大きい時には単一の衛星が形成されるのに対し、それが小さい場合には複数の衛星が形成されることを示した。また、後者の場合、形成される衛星質量の円盤質量依存性は、単一の衛星が形成される場合とは異なることを確認した。

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 18 件)

1. Hyodo, R., K. Ohtsuki (2014). Collisional disruption of gravitational aggregates in the tidal environment. *Astrophys. J.* 787, 56 (13pp). (査読有)
2. Fujita, T., K. Ohtsuki, T. Tanigawa, R. Suetsugu (2013). Capture of planetesimals by gas drag from circumplanetary disks. *Astron. J.* 146, 140 (13pp). (査読有)
3. Ohtsuki, K., Y. Yasui, H. Daisaka (2013). Accretion rates of moonlets embedded in circumplanetary particle disks. *Astron. J.* 146, 25 (12pp). (査読有)

4. Suetsugu, R., K. Ohtsuki (2013). Temporary capture of planetesimals by a giant planet and implication for the origin of irregular satellites. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 431, 1709-1718. (査読有)
5. Fujita, T., K. Ohtsuki (2013). Effect of ablation on capture of planetesimals by gas drag from circumplanetary disks. 44th Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1719, 1438. (査読無)
6. Yasui, Y., K. Ohtsuki, H. Daisaka (2013). Accretion of Particles onto Moonlets in Saturn's Rings. 44th Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1719, 1791. (査読無)
7. Hyodo, R., K. Ohtsuki, T. Takeda (2013). Evolution of circumplanetary particle disks and formation of multiple-satellite systems. 44th Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1719, 1856. (査読無)
8. Yasui, Y., K. Ohtsuki, H. Daisaka (2012). Viscosity in planetary rings with spinning self-gravitating particles. *Astron. J.* 143, 110 (10pp). (査読有)
9. Ohtsuki, K. (2012). Collisions and gravitational interactions between particles in planetary rings. *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 195, 29-47. (査読有)
10. Tanigawa, T., K. Ohtsuki, M. N. Machida (2012). Distribution of accreting gas and angular momentum onto circumplanetary disks. *Astrophys. J.* 747, 47 (16pp). (査読有)
11. Yasui, Y., K. Ohtsuki, H. Daisaka (2012). Influence of Formation of Temporary Gravitational Aggregates on Ring Viscosity. 43rd Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1659, 1698. (査読無)
12. Suetsugu, R., K. Ohtsuki (2012). Global Orbital Integration for Temporary Capture of Planetesimals by a Giant Planet: Implication for Their Source Region. 43rd Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1659, 1157. (査読無)

13. Fujita, T., K. Ohtsuki, T. Tanigawa (2012). Capture of Planetesimals by Circumplanetary Disks. Sci. Conf., LPI Contribution 1659, 1378. (査読無)
14. Suetsugu, R., K. Ohtsuki, T. Tanigawa (2011). Temporary capture of planetesimals by a planet from their heliocentric orbits. Astron. J. 142, 200 (11pp). (査読有)
15. Morishima, R., L. Spilker, K. Ohtsuki (2011). A multilayer model for thermal infrared emission of Saturn's rings. III: Thermal inertia inferred from Cassini CIRS. Icarus 215, 107-127 (査読有)
16. Tanigawa, T., K. Ohtsuki, M. N. Machida (2011). Gas Accretion Flow onto Circumplanetary Disks, 42nd Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1608, 1822. (査読無)
17. Yasui, Y., K. Ohtsuki, H. Daisaka (2011). Angular momentum transport in planetary rings: Effects of self-gravity and spins of particles, 42nd Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1608, 1135. (査読無)
18. Suetsugu, R., K. Ohtsuki, T. Tanigawa (2011). Effects of planetesimals' random velocity on temporary capture by a planet, 42nd Lunar Planet. Sci. Conf., LPI Contribution 1608, 1154. (査読無)

[学会発表] (計 36 件)

1. 末次竜、周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、2013. 11. 20-22、石垣市
2. 兵頭龍樹、惑星周りの粒子円盤の進化と衛星形成、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、2013. 11. 20-22、石垣市
3. 兵頭龍樹、潮汐場における自己重力アグリゲイトの衝突破壊、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、2013. 11. 20-22、石垣市
4. 岡山博明、トロヤ群小惑星の力学進化、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、2013. 11. 20-22、石垣市
5. 清水俊平、周惑星円盤内におけるガス抵

抗による微惑星軌道進化、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、2013. 11. 20-22、石垣市

6. 末次竜、Capture of irregular satellites due to gas drag from circumplanetary disk、45th DPS meeting、2013. 10. 7-11、アメリカ合衆国コロラド州
7. 兵頭龍樹、Formation of multiple-satellite systems from circumplanetary particle disks、45th DPS meeting、2013. 10. 7-11 アメリカ合衆国コロラド州
8. 末次竜、Capture of Irregular Satellites due to Gas Drag from Circumplanetary Disk、3rd Binary Workshop、2013. 6. 30-7. 2、アメリカ合衆国ハワイ州
9. 兵頭龍樹、Formation of Multiple Satellites from Circumplanetary Particle Disks、3rd Binary Workshop、2013. 6. 30-7. 2、アメリカ合衆国ハワイ州
10. 安井佑貴、Particle Accretion and Releasing Process around Moonlets in Saturn's Rings、8th Catastrophic Disruption Workshop、2013. 6. 23-27、アメリカ合衆国ハワイ州
11. 兵頭龍樹、Aggregate Collision in the Tidal Environment、8th Catastrophic Disruption Workshop、2013. 6. 23-27、アメリカ合衆国ハワイ州
12. 末次竜、周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲と軌道進化、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013. 5. 19-24、幕張市
13. 安井佑貴、土星リング中における小衛星への粒子集積、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013. 5. 19-24、幕張市
14. 安井佑貴、Accretion of Particles onto Moonlets in Saturn's Rings、44th Lunar and Planetary Science Conference、2013. 3. 17- 24、アメリカ合衆国テキサス州
15. 兵頭龍樹、Evolution of circumplanetary particle disks and formation of multiple-satellite systems、44th Lunar and Planetary Science Conference、2013. 3. 17-24、アメリカ合衆国テキサス州

16. 末次竜、巨大惑星による微惑星一時捕獲過程、日本惑星科学会 2012 年秋季講演会、2012. 10. 24-26、神戸市
17. 藤田哲也、周惑星円盤から受けるガス抵抗による微惑星捕獲、日本惑星科学会 2012 年秋季講演会、2012. 10. 24-26、神戸市
18. 末次竜、Planet Mass Dependence of Rates and Source Region of Temporary Capture of Planetesimals by a Planet、44th DPS meeting、2012. 10. 14-21、アメリカ合衆国ネバダ州
19. 藤田哲也、Capture of Planetesimals by Gas Drag from Circumplanetary Disks、44th DPS meeting、2012. 10. 14-21、アメリカ合衆国ネバダ州
20. 末次竜、Dependence of Temporary Capture on Planet's Mass、Asia Oceania Geosciences Society 2012 Meeting、2012. 8. 13-17、シンガポール
21. 末次竜、巨大惑星による微惑星一時捕獲過程、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012. 5. 20-25、幕張市
22. 藤田哲也、周惑星円盤による微惑星捕獲、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012. 5. 20-25、幕張市
23. 末次竜、Temporary Capture of Planetesimals by a Giant Planet、Asteroids, Comets, Meteors 2012、2012. 5. 15-20、新潟市
24. 末次竜、Global Orbital Integration for Temporary Capture of Planetesimals by a Giant Planet: Implication for Their Source Region、43rd Lunar and Planetary Science Conference、2012. 3. 19-23、アメリカ合衆国テキサス州
25. 藤田哲也、Capture of Planetesimals by Circumplanetary Disk、43rd Lunar and Planetary Science Conference、2012. 3. 19-23、アメリカ合衆国テキサス州
26. 末次竜、惑星による微惑星一時捕獲過程、日本惑星科学会 2011 年秋季講演会、2011. 10. 23-25、相模原市
27. 安井佑貴、粒子間の衝突と重力相互作用に起因する土星リングの粘性、日本惑星科学会 2011 年秋季講演会、2011. 10. 23-25、相模原市
28. 末次竜、Dynamical behavior of planetesimals temporarily captured by a planet、EPSC-DPS Joint Meeting、2011. 10. 2-7、フランス・ナント
29. 安井佑貴、Viscosity in Planetary Rings: Results from numerical simulations、EPSC-DPS Joint Meeting、2011. 10. 2-7、フランス・ナント
30. 末次竜、Temporary Capture of Planetesimals by a Planet from Heliocentric Orbits、Asia Oceania Geosciences Society 2011 Meeting、2011. 8. 8-12、台北
31. 安井佑貴、Effects of Particles' Spins and Surface Friction on Viscosity in Planetary Rings with Self-gravitating Particles、Asia Oceania Geosciences Society 2011 Meeting、2011. 8. 8-12、台北
32. 安井佑貴、Viscosity in Planetary Rings with Spinning Self-Gravitating Particles Obtained by N-body Simulation、Workshop Rings 2011、2011. 7. 27-29、アメリカ合衆国ニューヨーク州
33. 末次竜、惑星による微惑星の一時捕獲、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011. 5. 22-27、幕張市
34. 安井佑貴、自己重力と粒子自転を考慮した惑星リングの粘性、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011. 5. 22-27、幕張市
35. 安井佑貴、Angular momentum transport in planetary rings: Effects of self-gravity and spins of particles、42nd Lunar and Planetary Science Conference、2011. 3. 06-13、アメリカ合衆国テキサス州
36. 末次竜、Effects of planetesimals' random velocity on temporary capture by a planet、42nd Lunar and Planetary Science Conference、2011. 3. 06-13、アメリカ合衆国テキサス州
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
大槻 圭史 (Keiji Ohtsuki)
神戸大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：00250910

(2) 研究分担者

荒川 政彦 (Masahiko Arakawa)
神戸大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：10222738

(3) 連携研究者

台坂 博 (Hiroshi Daisaka)
一橋大学大学院商学研究科・准教授
研究者番号：80399295

谷川 享行 (Takayuki Tanigawa)
北海道大学低温科学研究所・博士研究員
研究者番号：30422554

武田 隆顕 (Takaaki Takeda)
ヴェイサエンターテイメント・研究員
研究者番号：70413961

(4) 研究協力者

末次 竜 (Ryo Suetsugu)
神戸大学大学院理学研究科・大学院生

安井 佑貴 (Yuki Yasui)
神戸大学大学院理学研究科・大学院生

藤田 哲也 (Tetsuya Fujita)
神戸大学大学院理学研究科・大学院生

兵頭 龍樹 (Ryuki Hyodo)
神戸大学大学院理学研究科・大学院生