

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：55502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14787

研究課題名（和文）氷惑星の衛星系形成過程の解明

研究課題名（英文）Investigating satellite formation around ice giants

研究代表者

末次 竜（Suetsugu, Ryo）

大島商船高等専門学校・一般科目・准教授

研究者番号：40737334

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：1. 惑星大気に捕獲された微惑星の一部は、大気が散逸した後でも惑星の周りを公転する。これらの一部は現在、氷惑星の周りにある不規則衛星になった可能性がある。2. 木星衛星ガニメデの表面にあるファロウ構造と呼ばれる地形は、かつて同心円状に全球的に存在していたことがわかった。また、その中心点に150km程度の天体が衝突することで形成された可能性がある。3. 巨大惑星へのガスおよびダスト供給過程の惑星質量への依存性を調べた。ヒル圏に対する周惑星円盤への質量降着率の比は、惑星質量に関わらず、一定であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、天王星や海王星などの氷惑星の衛星形成過程を調べたが、系外惑星の質量は地球から氷惑星の間に分布しているものが多いことが知られている。そのため本研究から、太陽系外衛星をもちうる惑星の候補に対して制約を与えられることが期待される。

木星の衛星ガニメデは欧州宇宙機関（ESA）が推進し日本も参加する木星氷衛星探査計画（JUICE計画）の探査目標である。そのため、本研究の結果がこの探査により検証でき、木星の衛星系の形成と進化の解明が進むと期待される。

研究成果の概要（英文）：1. We studied capture of planetesimals by gas drag from an atmosphere of a growing ice-giant planet. We found that some of the captured planetesimals can survive in the atmosphere for a long period of time under weak gas drag. Our results suggest that some of the present irregular satellites of ice-giant planets would have been captured by gas drag.
2. We studied the global distribution of ancient tectonic troughs, furrows on Jupiter's satellite Ganymede. We found that furrows used to be a global-scale multi-ring structure. If it is impact origin, 150-km radius impactor is plausible.
3. We studied planetary-mass dependence of delivery of gas and dust particles onto circumplanetary disk of a growing giant planet. We found that the ratio of the mass accretion rate onto the circumplanetary disk and that into the Hill sphere is about 0.4 regardless of the planetary mass.

研究分野：惑星物理学

キーワード：惑星 衛星 小天体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究課題で主に三つの研究を行ったので、それぞれ以後、それぞれ分けて報告する。

研究テーマ① 氷惑星大気による微惑星捕獲

惑星の周りには衛星がある。惑星探査から衛星は多様で、水を保持しているものさえあり、今や衛星は太陽系形成論からだけでなく、アストロバイオロジーの観点からも注目されている。しかし、これまでの研究は木星と土星の衛星形成が大半であり、天王星と海王星の衛星形成は詳しく調べられてない。特に海王星は巨大な衛星トリトンを持ち、その軌道は逆行回転でほぼ円軌道という珍しい軌道をもつ。この起源として、トリトンが昔はバイナリーであり、それが海王星と遭遇することで破壊され、トリトンのみ捕獲されたというモデルが有力とされている。しかしバイナリーを構成する微惑星の質量が非常に大きいなど問題点もある。一方、惑星大気からのガス抵抗でトリトンが捕獲されたというモデルもあるが、初期軌道が限られており詳細な軌道計算はこれまで無い。

研究テーマ② 木星衛星ガニメデへの天体衝突

木星のガリレオ衛星の一つであるガニメデの表面にはファロウ構造と呼ばれる特徴的な地形がある。このファロウ構造は、惑星探査機ボイジャーと木星探査機ガリレオによる観測から、ガニメデ表面に局所的に存在し、形成された年代は非常に古いと推定されている。ファロウ構造の成因は未だ明確ではないため、私達はボイジャーとガリレオが撮った画像の再解析を行い、ファロウ構造の分布を調べた。その結果、ファロウ構造は従来考えられてきた局所的な構造ではなく、マリウス領域を中心とした同心円状に分布する全球的な構造であることが明らかとなった。これは過去には全球的な多重リング構造であったことを示唆している。ファロウ構造と似た地形はガリレオ衛星カリストのヴァルハラ盆地にもある。このヴァルハラ盆地は天体衝突によって形成された可能性が高いとされているが、ファロウ構造形成への天体衝突の影響を調べた研究はほとんどなかった。

研究テーマ③ 周惑星円盤への材料物質供給過程

木星や土星などの巨大惑星は、その形成過程において惑星のまわりに周惑星円盤が形成されると考えられており、衛星はその中で形成されたとされる。そのため周惑星円盤へのガス供給過程は惑星形成のみならず、衛星の形成過程にもおいても重要といえる。近年、惑星周りのガス流は数値流体計算を用いて精力的に調べられている。しかしながら、衛星を作る材料物質の供給過程には不明な点が多い。また惑星質量の違いによって惑星周りのガス流れがどのように変化し、それが周惑星円盤へのガス供給に与える影響などは不明である。

2. 研究の目的

研究テーマ①の目的

トリトンを模擬した様々な軌道の微惑星を、大気をもつ惑星に接近させ、大気からのガス抵抗による微惑星の捕獲過程を解明する。また捕獲後の軌道進化過程を明らかにする。

研究テーマ②の目的

ガニメデサイズの氷衛星表層に全球的な影響を及ぼすようなインパクトのサイズを明らかにする。

研究テーマ③の目的

衛星材料の周惑星円盤への供給過程を調べる。また惑星近傍のガス流れの惑星質量依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

研究テーマ①の研究手法

大気は球対称を仮定し、太陽とその周りを公転する微惑星と大気を持つ惑星の三体の軌道計算を行う。様々な初期軌道の微惑星で計算を行い、捕獲されやすい軌道を明らかにし惑星の大気内での軌道進化を調べる。またガスを次第に散逸させることで大気ガスを次第に散逸させ、惑星周りに残った微惑星の軌道を明らかにする。計算コードはこれまでの周惑星円盤による微惑星捕獲の研究で使用したものを改良し研究を行う。

研究テーマ②の研究手法

ガニメデサイズの氷衛星への天体衝突を調べるにあたり衝突シミュレーションを行う。衝突シミュレーションは弾性・塑性モデル、破壊モデル、空隙モデルなどが多数実装されている Shock physics code の iSALE を利用する。衝突速度は固定し、インパクトのサイズをパラメータにすることで、多くの衝突シミュレーションを行い、氷衛星表層全体に影響を与えるような衝突条件を調べる。

研究テーマ③の研究手法

3次元流体シミュレーションを行うことで惑星へのガスの流入過程を調べる。特に惑星近傍は周惑星円盤などの構造を調べる必要があるため、nested-grid 法による高解像度の計算を行う。材料物質の供給過程は、流体シミュレーション結果を軌道計算に組み込むことで、複雑なガス流が材料物質に与える抵抗力を計算する。

4. 研究成果

研究テーマ①の研究成果

(1) これまでの固体物質の捕獲の研究と同様に、稀に惑星周りを非常に長い間、公転する軌道が存在する(図1左)。(2) 大気によって捕獲され長時間惑星の周りを公転する固体物質は、順行方向に捕獲された場合においても逆行方向に捕獲された場合においても軌道進化過程に違いがほとんど無い。これは、どちらの方向から捕獲されてもガスとの相対速度が非常に大きいことに起因する。この特徴は、ほぼケプラー速度で公転し順行と逆行で軌道進化が異なる木星などの周惑星円盤ガスによる捕獲とは大きく異なる。(3) 捕獲後の軌道進化過程では惑星に落下するまでの期間の大半は、離心率が非常に大きく、惑星のヒル半径の1/3程度の軌道長半径を維持して公転するが、最終的に急速な軌道減衰が起こり惑星に落下する(図1右)。(4) 球対称大気中からのガス抵抗による微惑星の軌道進化過程を解析的な手法でも調べ、これまでに得た軌道計算と比較した。その結果、軌道計算の結果と良い一致を示すことが明らかとなった。

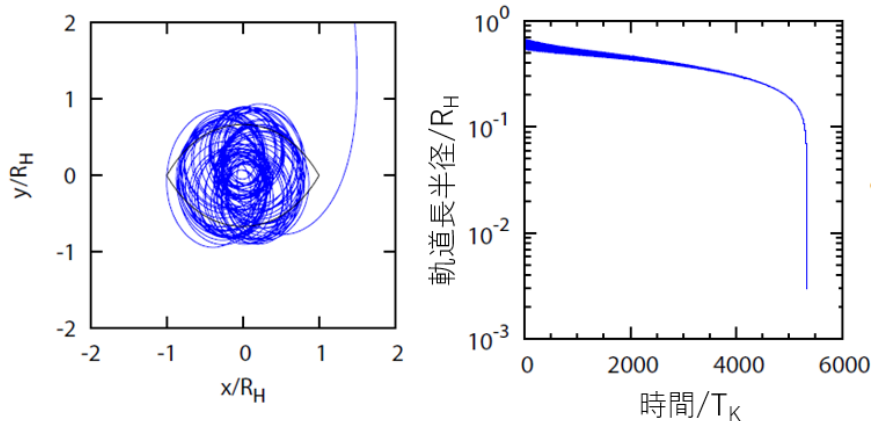


図1: (左)典型的な捕獲軌道、(右) 捕獲された微惑星の軌道長半径の時間進化

研究テーマ②の研究成果

(1) インパクターの半径が50kmの場合、衝突が氷衛星に与える影響は衝突点近傍のみに限定される。(2) インパクターの半径が150kmの場合、解像度の問題で影響を及ぼす領域を明確に推定することは困難であるが、少なくとも衝突点を中心とした半球の全域には確実に影響を与えることが明らかとなった。そのためガニメデ表層に多重リング構造を形成するには150km程度の天体衝突が必要である。(3) 衝突後の結果はターゲットのパラメータに大きくは影響にほとんど影響されず同様の結果が得られた(図2)。(4) リソスフェアのモデルから推定したインパクターのサイズも、おおよそ150km程度であり、このことからガニメデ表層に多重リング構造を形成した衝突天体の半径は150km程度の可能性が高いと言える。(5) ガニメデの内部は岩石と鉄と氷が分化した層構造をもつが、今回の巨大衝突によって与えられた熱が、分化を引き起こした可能性がある。

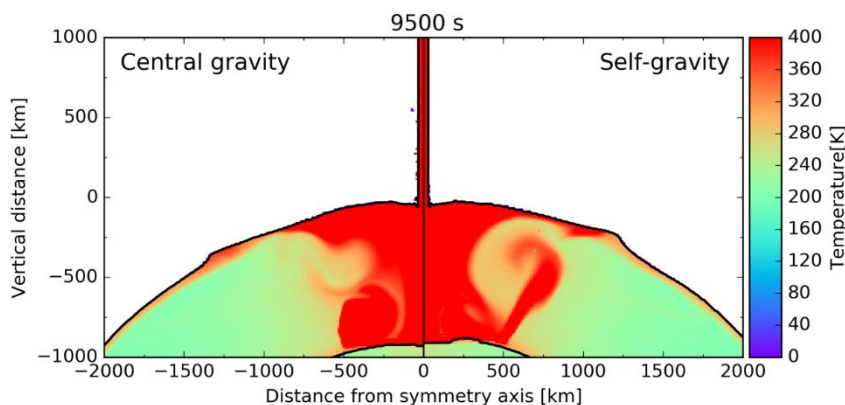


図2: 氷衛星への衝突の様子

研究テーマ③の研究成果

(1) 衛星材料物質のサイズが小さい場合、それらは赤道面から周惑星円盤に流入することができないが、鉛直方向から周惑星円盤に流入するガスとともに供給される。(2) 周惑星円盤に降着するガスの降着帯の動径方向の幅は惑星質量が大きいほど広くなり、その惑星質量依存性は、惑星質量が0.2木星質量以下では惑星質量の1/6乗に、0.2木星質量以上では惑星質量に比例する。(3) 周惑星円盤とヒル圏への質量降着率の比は、惑星質量に関わらず一定で、おおよそ0.4であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Homma Toru, Ohtsuki Keiji, Maeda Natsuho, Suetsugu Ryo, Machida Masahiro N., Tanigawa Takayuki	4. 巻 903
2. 論文標題 Delivery of Pebbles from the Protoplanetary Disk into Circumplanetary Disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 98 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbc08	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 Hirata Naoyuki, Suetsugu Ryo, Ohtsuki Keiji	4. 巻 352
2. 論文標題 A global system of furrows on Ganymede indicative of their creation in a single impact event	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113941 ~ 113941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.113941	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 Maeda Natsuho, Ohtsuki Keiji, Tanigawa Takayuki, Machida Masahiro N., Suetsugu Ryo	4. 巻 935
2. 論文標題 Delivery of Gas onto the Circumplanetary Disk of Giant Planets: Planetary-mass Dependence of the Source Region of Accreting Gas and Mass Accretion Rate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7ddf	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 末次竜、田中秀和、小林浩、玄田英典
2. 発表標題 微惑星の衝突破壊：物質強度依存性
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 末次竜、門野敏彦、荒川大、笠木祥喜、永山秀一、鈴木絢子、長谷川直
2. 発表標題 DEMによるイジェクタカーテン模様の解析
3. 学会等名 惑星形成討論会2019夏
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末次竜、門野敏彦、荒川大、笠木祥喜、永山秀一、鈴木絢子、長谷川直
2. 発表標題 数値計算によるイジェクタカーテン模様の解析
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末次竜
2. 発表標題 LIGGGHTSによる衝突計算
3. 学会等名 天体の衝突物理の解明 (XV) ~小惑星の表層進化~
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末次竜
2. 発表標題 不規則衛星の起源
3. 学会等名 第7回衛星系研究会(招待講演)
4. 発表年 2020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
---------	---------