



Formation of satellite systems of giant planets: Contribution of planetesimals from heliocentric orbits

末次, 竜

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2016-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6127号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006127>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 末次竜

専 攻 地球惑星科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Formation of satellite systems of giant planets: Contribution of planetesimals from
heliocentric orbits (巨大惑星衛星系の形成：太陽周回微惑星の寄与)

指導教員 大槻圭史

1. Introduction

惑星は原始惑星系円盤内で微惑星同士が衝突し形成されたと考えられている。近年、惑星は現在の場所ではなく別の場所で形成され移動してきた可能性が指摘されている。惑星が移動している間に微惑星と何度も近接遭遇し散乱されることで、微惑星もかき混ぜられたと考えられる。こうした惑星と微惑星の移動は小天体の起源や分布だけでなく、地球の水の起源にも関わっている可能性がある。一方、巨大惑星の衛星系の形成過程が明らかにされつつある。その結果、衛星系の形成過程は惑星周りのガスや微惑星の運動状態に大きく依存することが示されている。つまり衛星系の起源を解明することは、惑星形成時の微惑星やガスの運動状態、さらに微惑星の輸送にも制約を与える。そこで本論文では太陽周りを公転していた微惑星の惑星近傍での運動や衛星系形成への寄与について詳しく調べる。

2. Temporary capture of planetesimals by a planet from their heliocentric orbits

惑星近傍を微惑星が通過すると、稀に惑星の重力に微惑星が捕獲され、惑星を中心にしばらく公転して近傍にとどまった後、遠方へ飛ばされてゆくことがある。この現象を一時捕獲という。近年、この一時捕獲が短周期彗星の力学進化、不規則衛星の形成といった惑星系形成の重要な役割を担っている可能性が示唆されている。しかしながら、これまで詳しく研究されてこなかった。そこで本論文では、離心率をもった微惑星の一時捕獲についての研究を行った。研究手法としては太陽中心に公転する惑星、微惑星の三体問題軌道計算を行い、一時捕獲された微惑星の軌道や、一時捕獲の頻度などを詳細に調べた。その結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類できることがわかった。また離心率の増加とともに一時捕獲頻度は増加し続けることが分かった。特に離心率が大きい時の増加は、離心率が小さい時の増加に比べると、急激である。これは一時捕獲の軌道の典型的な型が、離心率が大きい場合と小さい場合で異なるからである。一方、順行の一時捕獲の頻度は特定の離心率でピークをもつことがわかった。

3. Temporary capture of planetesimals by a giant planet and implication for the origin of irregular satellites

巨大惑星の周りには多くの不規則衛星がある。それらの軌道は楕円で大きく傾いていることから捕獲された微惑星が起源だと考えられている。様々な捕獲過程が提案されているが、それらの一つに微惑星が惑星重力に一時的に捕獲され惑星周りを公転している間にエネルギー散逸が働き不規則衛星が形成されたとするモデルがある。このモデルでは一時捕獲が重要な役割を果たしている。しかし、惑星質量が中心星に比べ非常に小さいと仮定したヒル近似下での一時捕獲過程は第二章で調べたが、この結果を巨大惑星による一時捕獲に適用できるのかは不明である。そこで太陽、惑星、微惑星の円制限三体問題軌道計算を行い、一時捕獲の軌道、頻度や巨大惑星に一時捕獲された微惑星が捕獲前にもっていた太陽周り

の軌道要素との関係を調べた。その結果、惑星質量が木星程度ある場合でも、惑星質量が小さい場合と同様、典型的な四つの一時捕獲軌道があることがわかった。しかし一時捕獲軌道のうち惑星から離れた場所を公転するものは惑星軌道の曲率の効果によって、惑星軌道に沿って曲がった。一時捕獲頻度は離心率が増加すると増加したが、微惑星の初期軌道が惑星軌道より内か外かで一時捕獲される頻度は大きく変化することがわかった。また木星周りで順行の一時捕獲軌道になる微惑星の初期位置は、火星と木星の間にあるメインベルト小惑星帯のヒルダ群の領域に相当することがわかった。

4. Capture of irregular satellites by weak gas drag from circumplanetary disks

不規則衛星の捕獲モデルの一つに周惑星円盤からのガス抵抗によって微惑星が捕獲されたというものがある。本研究ではこのガス抵抗による捕獲モデルに注目した。なぜなら、ガス密度が高い場合には、捕獲後すぐに惑星に落下してしまうが、規則衛星形成の終盤ではガス密度が非常に低いので、捕獲後も長時間の間、円盤内で生き残りうるからである。また、捕獲された微惑星が落下したとしても、規則衛星の表層進化に寄与した可能性がある。しかしながら、ガス密度が低い散逸直前の周惑星円盤による微惑星捕獲過程はこれまで詳しく調べられてこなかった。そこで太陽、周惑星円盤をもつ惑星、微惑星の三体問題軌道計算を行い、捕獲過程や捕獲頻度を調べた。その結果、ガス抵抗が弱い場合には、微惑星はまず惑星に一時的に捕獲され、惑星の周りを公転している間にエネルギーをゆっくりと失い捕獲されることがわかった。またこのような捕獲は順行でも逆行でも特定の離心率で起こり、非常に長い間、円盤内で生き残りうる微惑星もあることがわかった。また円盤が散逸後の捕獲された微惑星の軌道要素についても調べた。その結果、ガスによって捕獲された微惑星は比較的短い軌道長半径を持ちうることがわかった。実際の不規則衛星はもっと大きな軌道長半径をもつものもあるため、ガスによる捕獲モデルだけではすべての不規則衛星の分布を説明できないことがわかった。

5. Distribution of captured planetesimals in circumplanetary disks

巨大惑星の周りにはかつて、周惑星円盤と呼ばれるガス円盤があり、ガリレオ衛星などの質量の大きな規則衛星はこの周惑星円盤内で形成されたと考えられている。現在の衛星形成論ではガスと共に流れてきたダストが円盤内で集積することで形成されたと考えられており、太陽周りにはまだ多くの微惑星が存在していたにも関わらず、微惑星の規則衛星形成への寄与は考えられていない。そこで本研究では太陽周りを円軌道で公転している微惑星が周惑星円盤に捕獲されると円盤内でどのような分布になるのかを三体問題軌道計算を用いて調べた。その結果、捕獲された微惑星が惑星周りを順行で公転している場合、周惑星円盤内に微惑星は長時間溜まりうることが分かった。得られた結果を木星の衛星系に適

用すると、現在のガリレオ衛星の領域には 1m-1km サイズの微惑星が溜まることがわかった。一方、逆行で公転している微惑星は常に向かい風をうけるのですぐに惑星に落下する。しかし稀に軌道減衰している間に順行方向になるものもあることがわかった。こうした微惑星は惑星のごく近傍で公転方向が変化するため、順行になってもすぐに落下するため衛星形成に寄与しにくいと考えられる。

6. Summary

本論文では太陽周りを公転している微惑星の惑星近傍での運動や衛星系形成への寄与について詳しく調べた。その結果、ガス抵抗による不規則衛星の捕獲モデルだけでは、観測されている軌道長半径の大きい不規則衛星が説明できないことや、規則衛星の形成に捕獲された微惑星も寄与した可能性があることを明らかにした。また木星の順行不規則衛星はヒルダ群起源である可能性があるといった微惑星の輸送に関しての示唆も得ることができた。

氏名	末次 竜		
論文 題目	Formation of satellite systems of giant planets: Contribution of planetesimals from heliocentric orbits (巨大惑星衛星系の形成：太陽周回微惑星の寄与)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	大槻 圭史
	副 査	教授	荒川 政彦
	副 査	教授	巽 好幸
	副 査		
	副 査		
要 旨			
巨大惑星の衛星は、惑星の周囲で衝突合体して形成されたと考えられる規則衛星と、太陽の周りを公転する微惑星を捕獲したと考えられる不規則衛星の二種類がある。前者の形成過程の解明からは巨大惑星形成過程の手掛かりが得られると考えられ、後者の起源と捕獲前の軌道を明らかにできれば太陽系内での小天体輸送過程に関する制約に繋がる可能性がある。本論文では太陽周りを公転していた微惑星が惑星周囲に捕獲される過程を詳しく調べ、規則衛星と不規則衛星の形成過程への寄与について考察している。 第一章は研究の背景について述べている。 第二章では、惑星重力による微惑星の一時捕獲過程を、三体問題に関する局所軌道計算法を用いて調べている。惑星近傍を微惑星が通過すると、惑星の重力に捕獲され惑星を中心にしばらく公転して近傍にとどまった後、遠方へ飛ばされることがあり、一時捕獲と呼ぶ。一時捕獲は短周期彗星の力学進化、不規則衛星の形成といった惑星系形成の重要な役割を担っている可能性が示唆されてきたが、詳しく研究されてこなかった。本研究の結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類できることを初めて示すとともに、その軌道の特徴や捕獲確率を明らかにした。 第三章では、上述の一時捕獲過程を、大域的軌道計算法を用いて調べている。局所計算法では惑星質量が中心星に比べ非常に小さいと仮定しているが、木星のような大質量の惑星に対する妥当性は不明であった。そこで太陽、惑星、微惑星の円制限三体問題の大域的軌道計算を行い、一時捕獲過程について調べた。その結果、惑星質量が小さい場合と同様に四種類の一時捕獲軌道があること、局所計算では無視していた惑星軌道の曲率の効果が捕獲軌道の形状や捕獲確率において重要となること等を示した。また木星周囲で順行方向の一時捕獲軌道になる微惑星の初期位置は、小惑星帯ヒルダ群領域に相当することがわかった。 第四章では、周惑星円盤ガスから受けるガス抵抗を考慮した計算を行い、不規則衛星の捕獲過程について調べている。従来の研究では強いガス抵抗を考えたため、衛星は捕獲後に速やかに軌道減衰して惑星に衝突するという問題があった。本研究は、巨大惑星形成最終段階で円盤ガス密度が低い状況での捕獲に着目した。その結果、ガス抵抗が弱い場合には、微惑星は惑星に一時捕獲された後、惑星の周りを公転しながら徐々にエネルギーを失い捕獲されるという過程が主であることを発見した。この機構により、惑星周りの比較的小さな軌道を持つ不規則衛星の捕獲は説明可能なこと、より大きな軌道長半径をもつ不規則衛星の分布はこのモデルでは説明できないこと、等を明らかにした。 第五章では、周惑星円盤から受けるガス抵抗によって捕獲された微惑星の、捕獲後の軌道進化と周惑星円盤内での分布について調べている。現在の規則衛星形成論ではガスとともに流れてきたダストが円盤内で集積して形成されたと考えられており、ガスとは独立に運動する微惑星の寄与は考えられていない。本研究の結果、周惑星円盤内に微惑星は長時間溜まりうること、微惑星サイズによって溜まる場所が異なること、等を明らかにした。得られた結果を木星の衛星系に適用すると、現在の規則衛星領域には1m-1kmサイズの微惑星が溜まることになり、規則衛星の集積と表面進化に重要な役割を果たした可能性がある。 第六章は、全体のまとめである。 以上のように本研究は、太陽周りを公転している微惑星の惑星近傍での運動や周惑星円盤による微惑星捕獲と捕獲後の軌道進化、ならびにそれらが衛星系形成に及ぼす影響について詳しく調べた。これらは当該分野の今後の研究の発展にも大きく寄与しうる重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の末次竜は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。			