



Formation and evolution of Saturn's ring-moonlet system

安井, 佑貴

(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6130号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006130>

※ 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 安井 佑貴

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 and evolution of Saturn's ring-moonlet system
(土星リング-小衛星系形成進化過程に関する理論的研究)

指導教員 大槻 圭史

本研究では、リング衛星系の形成と進化に対する手がかりを得るため、リング中の粘性および重力的な粒子集積現象に注目した。本論文は四部からなり、第一部は土星リング衛星系の簡単な紹介、第二部は土星リングの粘性に対する本研究の結果、第三部はリング中の重力的な粒子集積に対する本研究の結果、第四部は全体のまとめとした。本要旨では、第二部と第三部に関してまとめた。

(第二部)

土星リングは多数の水粒子で形成されており、これら粒子間の衝突および重力相互作用によって角運動量は輸送される。リングはこのような粒子間相互作用に起因する粘性をもつ粒子円盤とみなすことができ、粘性はリングの力学進化および構造形成過程を支配する重要な物理量である。また上星リング外縁付近の小衛星は、リング粒子が粘性拡散によって広がり、ロッシュ限界半径（粒子が相互重力により合体集積できるかどうかを決める臨界軌道半径）の外側で集積し形成されたと考えられているが、形成される小衛星の質量がリング粘性に依存するなど、リング粘性は小衛星の起源にも深く関わっている。

このようにリングの粘性はリングの起源や力学進化に関係する基本的な物理量であるが、粘性そのものに関する研究は、ごく限られたものしかない。粘性に関する従来の研究のほとんどでは粒子間相互重力を無視してきた。相互重力を考慮した研究においても、リング粘性の土星からの距離や粒子空間密度に対する依存性は、限られた範囲でしか調べられていない。また、リング粒子には表面摩擦があり自転していると考えられているが、自転と相互重力の両方を考慮した場合のリング粘性は調べられていない。加えて、個々の粒子を直接識別できた観測はこれまでに無く、粒子の表面状態はよくわかっていない。そこで本研究では、粒子間相互重力に加え、衝突の際の表面摩擦の効果及び粒子自転を考慮した局所多体問題軌道計算を用いて、表面摩擦及び粒子自転がリング粘性に与える影響を明らかにした。また、従来の研究に比べてリング粘性の土星からの距離や粒子空間数密度などの様々なパラメータに対する依存性をより広い範囲で調べた。

リングの平衡状態は、粒子間衝突および重力散乱による粒子のランダム運動エネルギーの増加(粘性加熱)と粒子間の非弾性衝突によるエネルギー散逸のつり合いによって決まる。ここでランダム運動とは、平面円軌道からのずれの運動を意味する。光学的に薄い自己重力リングにおいて、粒子のランダム速度（平面円軌道からのずれの速度）が粒子間の非弾性衝突で決まる場合、表面摩擦を考慮することでランダム速度は抑えられる。ランダム速度が小さくなると、粒子の動径方向に対する運動領域も小さくなり、結果として粘性もランダム速度の減少に従いわずかに減少する。一方で、粒子間相互重力が粒子の速度進化に対して支配的になると、ランダム速度の表面摩擦に対する依存性は小さくなる。その結果、表面摩擦が強く働く方が衝突時のエネルギー散逸量が多くなり、それと釣り合うように粘性が増加する。これらの結果から表面摩擦によって、光学的に薄いリングの粘性は二倍程度変わり得ることを明らかにした。しかしながら、このような表面摩擦のわずかな効果を

無視すると、粘性は粒子のランダム速度で記述される。一方で、土星から遠く、粒子の空間数密度が高いリング領域では、リングの自己重力と差動回転のために微細な縞状構造が形成されることが従来の研究から明らかになっており、このような縞状構造が形成される領域では粘性が著しく増加することがわかっている。本研究でこのようなリングに対する粒子の反発係数の違いによる影響を調べた結果、光学的に薄い場合と同様に粘性は二倍程度変わり得ることを明らかにした。また従来の研究で、このようなリングの粘性に対する半解析式が得られている。本研究で得た結果も従来の研究で得られている半解析式と同様の式で再現可能であることを確認した。しかし、従来の粘性に関する研究で調べられた領域よりも土星からより遠い領域ではアグリゲイト(粒子の自己重力による一時的な粒子の集合体)が形成されることがわかっている。本研究でアグリゲイトが形成されるような領域における粘性を調べた結果、従来の研究で得られた半解析式では粘性値を過大評価してしまうことを明らかにした。そこで本研究では、従来の研究で得られていた半解析式を修正し、本研究で調べたパラメータ範囲全域に対する数値計算結果をうまく再現する半解析式を得た。

(第三部)

太陽系における巨大惑星リング-衛星系の起源と進化を考える上で、衝突および重力的な集積現象が重要となる。これまでにカッシーニ探査機によって、土星リング中および近傍に自身の重力圏に非常に近い形状をした小衛星が発見されており、そのうちのいくつかは重力圏形状に加えて赤道面付近に膨らみを持つ特徴的な形状をしている。さらに主要リングの外側領域中では、大きさが数十メートルから数キロメートルの小衛星が間接的に多数観測されている。また最近、主要リングの中ほどおよび内側領域でも同様に、小衛星や周囲のリング粒子よりも大きな粒子の存在が報告されている。一方でリング中に存在する比較的大きな小衛星はリング中に溝構造を形成しており、この溝構造は小衛星からの重力散乱と粒子間の衝突および重力散乱による粘性拡散に支配されており、小衛星の形状形成過程とリングの粘性が深く関係する。さらにこれらは、リング-衛星系の起源及び進化の素過程としても重要である。そこで本研究ではリング中での小衛星コア周りの集積現象に注目した。

上星リング中および近傍に存在する小衛星に関する従来の研究では、リング中の高密度コア周りの集積シミュレーションによって、重力圏形状の天体が形成されることが確認されている。しかし、より内側のリング領域について、小衛星の粒子集積度合いが土星からの距離とともにどう変わるのか、またどれくらい土星に近くなると集積できないのか等について、定量的には調べられていない。また従来の研究では、赤道面付近に膨らみのある小衛星の形成シナリオとして、(i) それら小衛星の赤道面の膨らみを除いた中心部分はリングが厚いときに形成され、ほぼ重力圏形状となり、(ii) その後リングの厚みが薄くなった後、また周りからリング粒子がいなくなる前に、(i)で形成された天体の赤道面にリング粒子が集

積することで形成されたと考えられている。しかし、集積によって形成される小衛星形状とリングの力学的な状態との関連は詳しく調べられていない。主要リング中で存在が示唆されている小衛星および大きな粒子はリング形成時の母天体の破片、もしくは小粒子の集積で形成されたと考えられているが、よくわかっていない。

そこで本研究では、重力多体軌道計算を用いて、リング中で高密度コア周りのリング粒子の重力的集積度合いおよび集積過程を詳しく調べる。本研究の目的は、リングのどの領域において集積が可能で、粒子集積の度合いが様々なパラメータ（例えば土星からの距離、粒子密度）にどう依存するのか明らかにすることで、これら小衛星および大きな粒子の起源に制約を与えることである。またリングの厚みや粒子密度などが集積過程および小衛星の形状形成に与える影響を明らかにし、観測されているこれら小衛星の形状形成過程に対して制約を与えることを目指す。

本研究で行った数値計算の結果、小衛星の密度が氷の密度より十分大きいのか、重力以外の力が働かない限り、リングの内側領域の外縁部よりも内側では集積が不可能であることがわかった。このことから、リングの内側領域で間接的に観測されている周囲のリング粒子よりも大きな粒子は、リング形成時の最大サイズの衝突破片である可能性がある。またリング外側領域中に存在する小衛星は、高密度コア周りに小さなリング粒子が集積することで形成された可能性が考えられる。またリングの厚みを様々な変化させた数値計算結果より、リングの厚みが例えば小衛星サイズに比べて十分薄くても、粒子の小衛星の高緯度面への集積が可能であることを示した。本研究の結論として、小衛星表面上に集積したリング粒子がその表面上を移動できるような状況下では、例えばリングの厚みが薄くても、重力圏形状の天体形成が可能であることが示唆される。

氏名	安井佑貴		
論文 題目	Formation and evolution of Saturn's ring-moonlet system (土星リング-小衛星系形成進化過程に関する理論的研究)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	大槻 圭史
	副 査	教授	吉岡 祥一
	副 査	准教授	中村 昭子
	副 査		
	副 査		
要 旨			
巨大惑星のリング-衛星系の形成と進化では、惑星周囲の円盤を構成する粒子間の衝突及び相互重力散乱による拡散と、拡散の結果、ロッシュ半径と呼ばれる臨界軌道半径以遠に広がった粒子間の相互重力による集積が重要な素過程である。本論文はこの二つに着目し、リング粒子間の衝突及び相互重力散乱によるリングの粘性と、小衛星の周りへのリング粒子の重力的な集積現象について調べたものである。 第一章は本研究の対象となる土星リング-衛星系の概説、ならびに研究の背景が述べられている。 第二章は、土星リングの粘性に対する研究結果について述べられている。土星リングは多数の氷粒子で形成されており、粒子間の衝突と重力相互作用によって角運動量が輸送され、その効率は粘性を用いて表される。このため粘性はリングの力学進化と構造形成過程、さらにはリング外縁での小衛星集積過程にも関係する重要な物理量である。本研究では、粒子間相互重力、表面摩擦及び粒子自転を考慮した多体問題軌道計算により、様々なパラメータに対する依存性を含めて、惑星リングの粘性について詳しく調べた。 その結果、以下の結果が得られた：(1) 粒子空間密度が小さなリングでは、表面摩擦の効果により粘性は二倍程度変わり得る。また、惑星からの距離に対する依存性などに於いて、粘性は粒子のランダム速度と同様の振舞をする。(2) 惑星から遠く粒子の空間数密度が高いリング領域ではリングの自己重力と差動回転のために縞状構造が形成され、その効果により粘性は著しく増加する。このとき表面摩擦の効果により粘性は二倍程度変わり得る。(3) 従来得られていたリングの粘性に対する半解析式は、惑星から遠く自己重力アグリゲイトが形成されるような領域には適用できないことを示した。そして、本研究で調べたパラメータ範囲全域に対する数値計算結果を再現する新たな半解析式を導出した。 第三章は、土星リング中の小衛星への粒子集積過程に関する研究結果について述べている。最近の惑星探査によって、土星リング中に自身の重力圏に非常に近い形状をした小衛星が発見されており、赤道面付近に膨らみを持つ特徴的な形状をしたものもある。またリングの内側領域でも小衛星の存在を示唆する構造の発見が報告されている。これらの小衛星は核となる小天体の上に粒子が集積したものであると解釈されてきた。しかしその集積過程の詳細は不明であり、リングの内側領域で集積が可能かどうか、明らかでない。赤道面付近に膨らみのある小衛星の形成過程として、膨らみを除いた中心部分はリングが厚いときに形成され、リングの厚みが薄くなった後にさらに粒子が集積することで膨らみ部分が形成された、と考えられてきた。しかし、集積による小衛星形状形成とリングの厚さとの関連は不明である。本研究では重力多体軌道計算を用い、核となる小天体へのリング粒子の集積過程を詳しく調べた。 その結果、土星リングの内側領域では粒子の重力的な集積が不可能であること、従ってその領域に存在する小衛星は集積により形成されたのではなく大きな母天体の破片であると考えられること、リングの厚みが薄くても小衛星の高緯度面への粒子集積が可能であり、小衛星の形状形成に関する従来のシナリオは見直しが必要であること、等を示した。 第四章は、全体のまとめである。 以上のように本研究は、惑星リングの粘性について粒子の表面摩擦を含めた幅広いパラメータ範囲での振舞を明らかにするとともに、リング中で小衛星上への粒子集積過程の詳細を明らかにしたものである。これらはいずれも、巨大惑星のリング-衛星系の形成と進化過程を考える上で極めて重要な基礎過程であり、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、学位申請者の安井佑貴は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。			