

土星リング中における小衛星への粒子集積

Local N-body Simulation for Accretion of Particles onto Moonlets in Saturn's Rings

安井 佑貴^{1*}, 大槻 圭史², 台坂 博³Yuki Yasui^{1*}, Keiji Ohtsuki², Hiroshi Daisaka³¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 一橋大学商学部¹Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS, ³Hitotsubashi Univ.

周惑星円盤中での重力による粒子集積は、太陽系に存在する巨大惑星のリング-衛星系の起源に関わる重要な問題である。カッシーニ探査機による観測から、土星Fリングのすぐ外側を公転している衛星パンドラの軌道より内側に位置する小衛星は、空隙率の高い小さなリング粒子の集積によって形成されたと考えられている。またN体計算によって、高密度の大きな核の周りに小粒子が集積することで、その天体自身の重力圏を埋める天体が形成されることが示されている。さらに土星Aリングでは、プロペラ構造と呼ばれる構造が発見されており、それは観測では直接見えていない小衛星によって形成されていると考えられている。これら小衛星は、高密度の大きな破片に低密度の小粒子が集積することで形成された可能性がある。このように、リング中における集積現象はこれら小衛星の起源にも関係する可能性がある。

ロッシュ領域内での重力による粒子集積が起こるかどうかがという判定条件は、三体問題のヒル近似に基づいて導かれている。ここでその判定条件を「三体捕獲判定条件」と呼ぶが、その判定条件は衝突後、衝突した二粒子がそれらの重力圏内にあり、相対運動エネルギーと潮汐ポテンシャルの和が負であれば、重力的に束縛されたとみなすという条件である。また、この判定条件を用いて、三体軌道計算からリング粒子間の衝突後の捕獲確率が求められている。しかしリング粒子が集積し、アグリゲイトが成長するにつれて、マントル部分を構成する粒子群による多体効果が重要になると期待されるが、この効果は三体計算では考慮されていない。

本研究の局所N体計算では、計算領域の中心に小衛星を固定する。そしてタイムステップ毎に、軌道運動方向の境界から小衛星の摂動の影響を受けていない粒子を加える。また、軌道運動方向の境界を通過して計算領域から出て行った粒子は領域から取り除く。一方で、動径方向の境界には周期境界条件を用いる。集積過程と小衛星の成長タイムスケールを詳しく調べるため、異なる二つの方法を用いて、アグリゲイトを構成している粒子数を数えた。初めに、小衛星と個々の衝突した粒子に対して粒子が小衛星の重力圏に重力的に捕獲されるかどうか、三体捕獲判定条件を用いて調べた。しかしこの方法では、小衛星に集積した粒子の自己重力は無視しており、時間とともに小衛星に集積する粒子数は増加するので、アグリゲイトを構成する粒子の数を過少評価してしまう。この問題を解決するために、二つ目の方法として、我々はアグリゲイトに接触している粒子をアグリゲイトの一員と考えて粒子数を数えた。この判定条件をここでは「アグリゲイト接触判定条件」と呼ぶ。

本研究では、このアグリゲイト接触判定条件を用いて、 $R_p=0.7$ に対応するような土星の距離において、集積率を時間の関数として計算した。ここで、 R_p は衝突している粒子の物理半径の和と重力半径の比である。集積の初期段階では、N体計算の結果から得られる集積率と三体計算の結果から得られるものがよく一致することを確認した。粒子集積が進むと、小衛星の周りに多数の粒子が集積してくるので、アグリゲイトの衝突断面積が増加し、N体計算から求められる集積率は三体計算のものよりわずかに大きくなることが示される。その後、アグリゲイトは自身の重力圏を粒子で埋め、ほぼ一定の構成粒子数となるような準平衡状態に達する。それから、アグリゲイトは粒子集積と粒子放出を交互に繰り返すということがわかった。上述のように、二つの判定条件を用いて、アグリゲイト構成粒子の数も数えた。その結果、三体捕獲判定条件ではアグリゲイトを構成する粒子の数を過少評価してしまうことがわかった。また、アグリゲイト接触判定条件を用いて数えたアグリゲイト構成粒子数の結果からも、準平衡状態では粒子の集積と放出が交互に繰り返されることが明らかとなった。

キーワード: 粒子集積, 小衛星, 土星リング, N体計算

Keywords: accretion, moonlet, Saturn's rings, N-body simulation