

木星系 subnebula における粒子成長と微衛星の形成

Particle coagulation and satellitesimal formation in a jovian subnebula

島沢 竜平[1]; 倉本 圭[2]

Ryuhei Shimazawa[1]; Kiyoshi Kuramoto[2]

[1] 北大・理・地球惑星; [2] 北大・理・地球惑星

[1] Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ; [2] Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ.

木星型惑星の順行衛星は軌道の力学的特徴から原始惑星を取り囲む subnebula 中で形成されたと考えられているが、その過程については不明な点が多い。木星系では質量の近いガリレオ衛星が規則的に並んで存在しており、しかも内側のもので構成に占める氷成分の割合が順に増加していることから、subnebula の面密度と温度分布を復元することができる。subnebula の空間スケールや進化のタイムスケールは原始太陽系星雲のそれとは大きく異なっており、原始太陽系星雲において惑星形成を説明する諸過程をそのままスケールダウンして衛星形成が説明できるかどうかは自明ではない。本研究では復元された木星系 subnebula (Mosqueira and Estrada, 2003) において、 μm サイズの粒子の付着成長から衛星の形成が開始したと仮定し、その初期段階にあたる粒子の微衛星への成長過程について、数値的な解析を行った。

原始太陽系星雲中の粒子と同様に、subnebula においても粒子はガス抵抗のために赤道面への沈殿運動と中心方向への落下運動を起こす。subnebula はその広がり小さく大きな面密度を持ち、しかも公転周期が短いことから、運動速度は原始太陽系星雲中でのそれに比べて大きい。cm サイズ以下の粒子については粒子集団を流体とみなした二流体方程式の解 (渡邊・井田, 1998)、m サイズ以上の粒子についてはガス抵抗を加えた運動方程式の解 (Adachi et al., 1976)、中間サイズについては両者の解を外挿してそれぞれの運動を求めた。ガリレオ衛星の軌道領域での木星方向への移動速度は粒子半径が約 10 cm のときに最大となり、その大きさは 100 m/s オーダーに達する。この速度で粒子が移動した場合には、数日から 1 ヶ月 (数公転周期) で粒子は木星に落ち込んでしまう。したがって粒子が微衛星 (ここでは粒子の運動がガスの運動と切り離される 10メートルサイズ以上の粒子を微衛星と呼ぶ) まで成長するためには、この急速な移動を起こすサイズを短時間で乗り越える必要がある。

粒子はサイズによって移動運動が異なるために互いに衝突して合体成長する。この過程について付着成長方程式を用いた数値的な解析を行った。計算領域内ではガスと粒子は均一に混合しているものとし、その混合比は太陽組成から期待される値を与えた。粒子間の相対速度にはガス中の粒子運動の解の差を与え、衝突断面積として球形粒子を仮定した幾何学的断面積を与える。ここでは破壊は無視し、衝突時にはかならず合体するものとする。初期状態における粒子の平均半径は $1\mu\text{m}$ とした。付着成長方程式の数値積分ではサイズについて等対数幅で区切ったバッチを作り、そこに移動バッチスキーム (Inaba et al., 1999) を適用して計算を行った。

計算の結果、ガニメデ軌道領域では約 4 ヶ月後に約 1 mm サイズの粒子集団が現れ、その後これらは急成長して 1 ヶ月後には約 10 m サイズに達した。この急成長は粒子サイズが mm サイズを超えると相対運動速度が上昇し、粒子の成長が著しく加速されることに起因する。この間の木星方向への移動距離を求めると、10 m サイズの微衛星が形成されるまでに軌道半径のせいぜい 1/10 しか移動しない。一方ガスおよび粒子密度の小さなカリスト軌道領域では衝突頻度が低下するために微衛星サイズに達するには数ヶ月かかる。単純に見積もると粒子は微惑星が形成される前に木星まで落ち込んでしまう。

カリスト軌道領域の結果は、subnebula 中の固体成分の割合が小さいと微衛星を形成することが困難になることを示している点で重要である。惑星形成の最終段階で形成される subnebula の組成は実際には太陽組成から変化しているはずである。固体成分はすでに惑星に取り込まれて枯渇していたとすると、成長が遅くなるために粒子は微衛星へ成長する前に木星へ落下してしまう可能性が高くなる。計算では考慮されていない付着の不完全性や、衝突破壊も同様の効果をもつ。一方、現在の木星大気の組成から、大気の延長部にあたる subnebula も重元素に富んでいたのかも知れない。この場合には微衛星の形成以前に粒子が失われることは避けられ、現在のガリレオ衛星はほぼその場での粒子成長と微衛星集積を経て誕生した可能性が高くなる。