

pebble accretion 過程を考慮した新たな衛星形成モデルの構築に向けて

芝池諭人 (東京工業大学地球惑星科学専攻)

Abstract

木星と土星の衛星は内部海を持ち、生命誕生の場として注目されている。しかし、衛星の形成過程はまだよくわかっていない。一方で、近年惑星形成論において従来とは描像の異なる “pebble accretion モデル” が提唱された。このモデルは、円盤外側で形成された cm サイズの固体物質 “pebble” が (原始) 惑星に大量に集積し、惑星が急成長するモデルである。この pebble accretion 過程は、衛星形成過程においても重要となる可能性がある。そこで本研究では、原始惑星系円盤と周惑星円盤の条件設定を変えつつ以下を計算し、pebble accretion 過程を考慮した衛星形成モデルを構築する。本発表では、これまでの研究経過を報告し、今後の見通しを紹介する。

1 Introduction

木星と土星の衛星が、地球に次ぐ第二の生命存在環境として近年注目されている。特に、エンケラドスとエウロパは内部海を持ち、プルームが噴出している。また、エンケラドスの内部には、生命誕生の場として有力な海底熱水系が確認された (Hsu et al. 2015)。さらに、タイタンは窒素とメタンから成る厚い大気を持ち、有機物が豊富に存在すると考えられる。しかし、これらの衛星の形成過程はまだよくわかっておらず、現在の衛星の環境も不明な点が多い。とくに、これまでの研究においては、原始惑星系円盤 (PPD) から周惑星円盤 (CPD) への流入モデルは、単純かつ恣意的な仮定が為されていた。

一方で、近年、惑星形成論において従来とは描像の異なる “pebble accretion モデル” が提唱された (Lambrechts & Johansen 2012)。このモデルは、PPD 外縁で形成された cm サイズの固体物質 “pebble” が (原始) 惑星に大量に集積し、惑星が急成長するモデルである。この pebble accretion 過程は、衛星形成過程においても重要となる可能性がある。

2 Methods

本研究では、PPD および CPD の条件設定を変えつつ以下を計算し、pebble accretion 過程を考慮した衛星形成モデルを構築する。すなわち、まず大規模

数値流体計算 (Tanigawa et al. 2012) を用いて、ガスにトラップされて周惑星円盤流入する pebble のモデルを作る。そして、両円盤内での pebble の移動と成長の同時計算を行う。そして、各衛星の pebble 集積量の推移と各衛星の成長を計算する。

まず第一段階として、PPD から CPD に進入する固体物質の質量フラックスを、円盤面と円盤上空の二つの進入経路に分けて解析的に見積もった。これは、ガスは PPD から CPD に円盤上空から進入し、円盤面では逆に CPD から PPD に流出すると、前述の数値流体シミュレーションで推定されているためである。このとき、中心星から 5.2AU にある、質量が木星の 1/3 程度のギャップがあまり開いていないガス惑星周りの CPD を仮定した。また、Lambrechts & Johansen (2012) での PPD の仮定を、面密度の中心星からの距離依存性を $-3/2$ 乗に置き換えて仮定する。CPD に進入する固体物質の経路は、以下のように上空と円盤面に分ける。まず、上空からの進入は、Tanigawa et al. (2012) でガスが流入する領域 ($2.2 < b < 2.4$ かつ $z > h_c, h_c = 0.2r_H$) に存在する固体物質がすべて CPD に進入すると仮定した。このとき、 b はインパクトパラメータ、 r_H は惑星のヒル半径 (ここではガスのスケールハイト h に一致すると仮定) である。固体物質は、拡散と沈殿の釣り合いから存在する高さが決まり、その分布は正規分布となる。よって、高さ h_c より上に存在する物質の量は、誤差関数で表される。一方で円盤面からの進

入は、Tanigawa et al. (2014) で得られた固体物質の進入確率 P_{disk} を用いた。これは、Tanigawa et al. (2012) で得られたガスの流体シミュレーション結果を背景に、ガスから力を受ける様々なサイズの固体物質の円盤面での挙動を計算し、惑星に捕獲される確率を求めて、フィッティングして得られたものである。詳細は各引用元を参照のこと。

3 Results

まず、ある時間での固体物質の半径 r_s を推定した。このとき、半径は一つの値に代表させている。図 1 の横軸は円盤形成初期からの時間、縦軸は固体物質の半径である。赤い実線が固体物質の半径、黒い点線が P_{disk} のカットオフを示す (Tanigawa et al. (2014) 参照のこと)。図 1 より、cm サイズ、つまり pebble が代表的なサイズであるとわかる。

次に、この pebble の円盤上空から (図 2 赤実線)、および円盤面から (緑実線) の進入フラックスを計算した。さらに、PPD 内の惑星軌道を中心星に向かって横切る固体物質のフラックス (黒点線) を求めた。図 2 より、上空から進入する量よりも、円盤面から進入する量のほうが一桁以上多いとわかった。ただし、PPD の乱流がもっと激しい (すなわち α が大きい) ときは、物質は上空に巻き上げられて、二つの進入量はあまり変わらなくなった。一方で、緑実線と黒点線を比較すれば、円盤面から進入する質量フラックスを、惑星周辺に PPD 外縁から落下してくる質量フラックスよりも多く見積もってしまっているとわかる。これより、落下してきた pebble は中心星まで落下せず、全て CPD に進入することが示唆される。これは、差動回転する PPD 内を惑星 (と随伴する CPD) がガスに対して一周する時間 t_{sweep} と、pebble が惑星の公転軌道を横切る時間 t_{cross} の比較から納得できる。すなわち両者を計算したところ、 t_{sweep} は t_{cross} よりも短かった。

4 Conclusion

以上の解析的な見積もりから、以下の二点がわかった。

1. 固体物質は円盤面からの CPD への進入が支配的である。
 2. PPD 外縁から落下してきた固体物質はすべて CPD に進入する。
- このとき、進入する固体物質の質量フラックスは、年間約 10^{-3} 地球質量である。

5 Future Work

今回の見積もりは解析的なものであり、今後 PPD および CPD 内での固体物質の移動と成長、そして各衛星の集積と成長を数値シミュレーションする必要がある。このとき、CPD への進入経路は円盤面のみを考えれば良いことが、今回の見積もりからわかる。

さらに、この衛星形成モデルは、土星 (と木星) より優位に高く彗星に等しいエンケラドスの D/H 比を説明できる可能性がある。つまり、氷 pebble は彗星同様円盤の外側で形成され高い D/H 比を持つと考えられるため、これら氷 pebble により D/H 比を保ったままエンケラドスを形成すれば良い。また、円盤外側にて氷 pebble にクラスレートとして捕獲された揮発性元素は、タイタン大気やエンケラドスなど氷衛星の内部海の元素組成に影響を与えたと考えられる。各衛星の集積した揮発性元素量、特に有機物量は生命存在可能性にも示唆を与えるだろう。

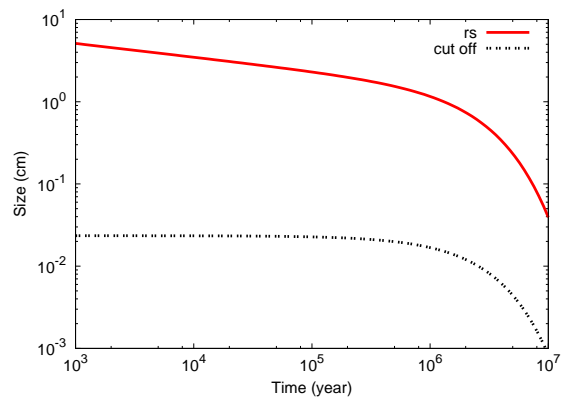


図 1: 5.2AU での固体物質の半径

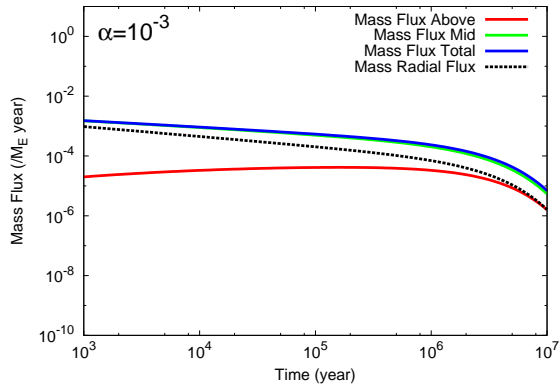


図 2: CPD に進入する質量フラックス

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号 : YITP-W-15-04)
及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- H.W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horanyi, A. Juhasz, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer and R. Srama, *Nature*, 519, 207-210 (2015)
- M. Lambrechts and A. Johansen, *A&A*, 544, A32 (2012)
- T. Tanigawa, K. Ohtuki M.N. Machida, *ApJ*, 747, 47 (2012)
- T. Tanigawa, A. Maruta and M.N. Machida, *ApJ*, 748, 109 (2014)