惑星形成における天体の衝突・破壊の理論と数値シミュレーションについて

加納 孝基 (名古屋大学大学院 理学研究科 M2)

Abstract

現在の理論では、原始惑星系円盤内において微惑星同士が衝突・合体することにより原始惑星が形成され、原始惑星が 10 倍の地球質量程度まで成長すると、周囲のガスを集積させることによって木星型惑星 (巨大ガス惑星) が形成されると考えられている。ガス集積を起こせるような大きな原始惑星ができる過程では、天体の衝突は合体だけでなく破壊ももたらす。破壊によって生成された小さな破片は、ガス抵抗によって減速されて角運動量を失い、中心星に落下し消失してしまう。その結果、原始惑星の成長できる大きさには限界が存在し、その限界は天体の破壊強度によって決められることになる。この様に、天体の破壊強度は巨大ガス惑星の形成の可否を決めるために非常に重要である。しかし、十分に理解されているとは言い難く、破壊を記述するモデルは各々が独自のものを使っている状態であり、まだまだ発展途上であるといえる。そのため、惑星形成に適用するための破壊モデルを完成させることが私の目標である。今回は、1km 以上の大きさの自己重力の効いた天体の破壊に必要なエネルギーを簡単に見積もり、その結果と数値シミュレーションとの比較を行い、破壊モデルの構築を目指す。

1　イントロダクション

天体の衝突の結果は、衝突速度によって合体・破壊の２種類に分けられる。衝突速度が小さいと天体はそのまま合体し、衝突速度が大きいと衝突の衝撃で天体はいったん壊れる。しかし、天体が壊れてできた破片の持つ速度が小さいと破片同士が重力によってくっつき、その結果合体する。破片の速度が大きいと破片はそのままばらばらになって飛んでいき、結果破壊となる。図にまとめると以下のようになる。

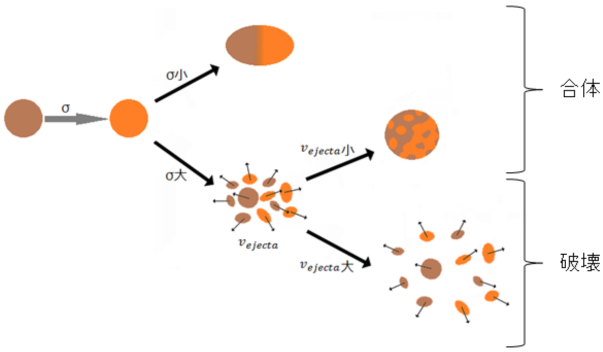

図 1: 衝突の結果

これまでの惑星形成論では、微惑星の寡占成長段階における天体の衝突の結果は合体しか考えられてこなかった。しかし最近になって、破壊についても考える必要があるといわれるようになってきた。そこで、本当に破壊を考える必要があるのか確かめる。

2　破壊が起きる条件

まず、どういう条件で破壊が起きるのかを考える。２つの天体 1·2 が衝突するとする。天体の質量、半径、ランダム速度はそれぞれ $m_1 \cdot m_2$、$r_1 \cdot r_2$、$\sigma_1 \cdot \sigma_2$ とし、破片の一般的な速度を v_{ejecta} とする。破片ができてすぐは破片同士の距離があまり離れていないため、破片は重心にある質量 $m_1 + m_2$ の質点と重力相互作用をすると考えることができる。破壊が起きるには破片がこの質点から $r_1 + r_2$ 以上離れられれば良い。よって破壊が起きる条件は以下のように書ける。

$$v_{ejecta} > v_{esc} = \sqrt{\frac{2G(m_1 + m_2)}{r_1 + r_2}}$$

また、以下の式を用いると破片の速度は天体のランダム速度 $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ で表すこともできる。

$$v_{ejecta} = \varepsilon v_{col}$$

$$\frac{1}{2}v_{col}^2 - \frac{1}{2}v_{esc}^2 = \frac{1}{2}v^2$$

$$v^2 = \langle(\vec{\sigma_1} - \vec{\sigma_2})^2\rangle = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

ここで ε は反発係数、v_{col} は衝突速度、v は 2 天体の相対速度である。これらの式をまとめると破壊の条件は以下のように書き直せる。なお、ε は実験による値を用いた (Stewart et al.2009)。この式により、破壊が起きるかどうかは衝突天体のランダム速度で決まることがわかる。

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 > \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}v_{esc}^2 \approx 3v_{esc}^2$$

3 天体のランダム速度

破壊が起きるかどうかを判断するには衝突天体のランダム速度が必要であるので、今度は天体のランダム速度について考えていく。微惑星の寡占成長段階においては、多数の小さな微惑星と少数の大きな微惑星 (原始惑星) が存在する。この段階では原始惑星同士の衝突は起きず、原始惑星と微惑星もしくは微惑星同士の衝突が起きる。原始惑星と微惑星の衝突の結果破壊が起きるなら原始惑星の成長に影響が出るのは当然だが、微惑星同士の衝突は原始惑星の成長に影響はないように思える。しかし、微惑星が衝突により破壊されて小さくなると原始惑星に集積される微惑星の総質量は小さくなる (Kobayashi et al.2011)。つまり衝突する天体に関わらず、破壊が起きるなら破壊を考慮に入れないといけないのである。

衝突には原始惑星と微惑星、微惑星同士の 2 種類あるがどちらのほうが破壊が起きやすいのだろうか。エネルギー等分配則より、質量の十分小さい微惑星のほうが原始惑星よりランダム速度が十分大きいと考えられるので、微惑星のランダム速度を考えることが重要であるといえる。よって、原始惑星と微惑星の衝突で破壊が起きる条件は、微惑星の質量・半径・ランダム速度を $m \cdot r \cdot \sigma$、原始惑星の質量・半径を $M \cdot R$ とすると、

$$\sigma > 3v_{esc}^2 = 3\sqrt{\frac{2G(M+m)}{R+r}} \simeq 3\sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

$$\simeq 3\sqrt{\frac{8\pi G\rho}{3}}R$$

微惑星同士の衝突で破壊が起きる条件は

$$2\sigma > 3v_{esc}^2 = 3\sqrt{\frac{2G(m+m)}{r+r}} = 3\sqrt{\frac{2Gm}{r}}$$

$$\simeq 3\sqrt{\frac{8\pi G\rho}{3}}r$$

となる。$R \gg r$ より微惑星同士の衝突のほうが破壊が起きやすいといえる。よって、以降は微惑星同士の衝突について考えていくことにする。

微惑星同士の衝突による破壊を考えるために、微惑星のランダム速度を求める。微惑星は原始惑星との重力相互作用による加速と円盤ガスの抵抗による減速を受ける。微惑星と原始惑星の重力相互作用として viscous stirring を考える。これは、微惑星を原始惑星とすれ違う際に軌道がほとんど変わらない程度の力しか受けない距離におくことで何度も重力相互作用を起こすことができるというものである。これによって微惑星が受ける加速の力とそのタイムスケールは以下のように書ける。n_M は円盤内における原始惑星の数密度、Λ は Coulomb logarithm と呼ばれるもので、$ln\Lambda = \mathcal{O}(1)$ である。

$$F_{acc} = \frac{4\pi G^2 M^2 m n_M ln\Lambda}{\sigma^2}$$

$$t_{acc} \propto \frac{\sigma^4}{M^{5/3}}$$

また、微惑星が受ける減速の力とそのタイムスケールは以下のように書ける。c_D は抵抗係数で $c_D = \mathcal{O}(1)$ である。

$$F_{dec} = c_D \pi r^2 \rho_{gas} \sigma^2$$

$$t_{dec} \propto \sigma^{-1}$$

微惑星のランダム速度は $t_{acc} = t_{dec}$ より、以下のようになる。

$$\sigma \propto M^{1/3}$$

つまり、微惑星同士の衝突で破壊が起きるかは原始惑星の質量によって決まるといえる。

4 微惑星の破壊が起きる原始惑星の質量

原始惑星の質量がどの程度になると破壊が起きるのかを考える。中心星の質量が $1M_\odot$、原始惑星の軌道半径を 1AU、微惑星の半径を 10km、微惑星の質量密度を $3g/cm^3$ として微惑星の衝突を考えると、原始惑星の質量と微惑星のランダム速度の関係は以下の図のようになった。図にも書いてあるように、破壊を考えない場合の原始惑星の質量の成長限界より破壊が起きる原始惑星の質量のほうが小さい。つまり、破壊を考えない今までの理論は間違っており、原始惑星の成長を考えるにあたり破壊を考えることは必要であるということがわかる。

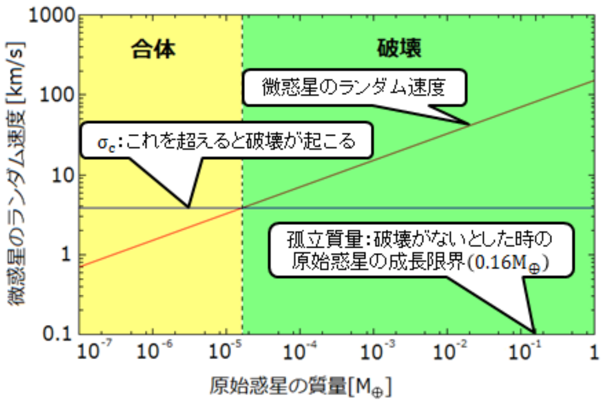

図 2: 原始惑星の質量と微惑星のランダム速度の関係

5 数値シミュレーション

前節までで理論については説明したので、今節では数値シミュレーションについて説明する。今回は先人の研究を参考に、個別要素法という計算手法を使う (Wada et al.2005)。これは一つ一つの要素 (今回では微惑星を構成する欠片) に働く力をすべて求め、それぞれの要素の動きを追うというものである。それぞれの要素の結合を表す方法として Voigt モデルを用いる。それぞれの要素間に働く力を以下の図のように垂直方向と水平方向に分け、垂直方向にはバネとダッシュポット、水平方向にはそれに加えて滑り摩擦の力が働くと考える。ある 2 粒子間において、それぞれの方向に働くバネとダッシュポットの力は以下のようにかける。

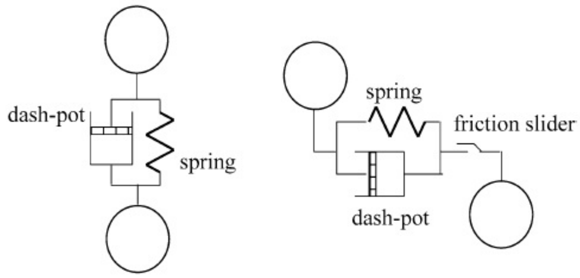

図 3: 要素間に働く力

$$f_n = -\Sigma k_n \Delta d_n - \eta_n v_n$$

$$f_s = -\Sigma k_s \Delta d_s - \eta_s v_s$$

k、Δd、η、v はそれぞれバネ定数、微小移動距離、ダッシュポット定数、2 粒子の相対速度である。よって、ある粒子 i に働く力を並進、回転運動成分にわけて書くと以下のようになる。

$$m_i \ddot{x}_i = \sum_j [f_{n,ij} + f_{s,ij}] + m_i g$$

$$I\dot{\omega}_i = \sum_j r_{ij} \times f_{s,ij}$$

以上の式を用いてシミュレーションを行い、結果を前節までの理論と比較しようと思う。

Reference

Stewart and Leinhardt . 2009 ApJ,691,L133

Kobayashi and Tanaka and Alexander. 2011 ApJ,738:35(11pp)

Wada and Senshu and Matsumi . 2005 Icarus,180,528-545