

巨大衝突に伴う大気散逸の数値計算と理論的考察

黒崎健二

2021年4月11日

1 研究背景

宇宙望遠鏡や地上望遠鏡の観測精度の向上に伴い、近年では多様な惑星系が発見されてきている。観測された惑星の質量と半径の関係をみると、大気を多く保持する天体が多数存在していることがわかっており、その大気量は数%程度から10%を超えるものまでである。このような大気量の違いは、惑星の形成過程を反映しているが、形成した後の進化過程においても影響を受けることがわかっている。

惑星が成長するプロセスを考えると、その大気がいつ獲得したものかを理解することができる。原始惑星系円盤内で形成した固体コアはそれ自身も重力によって円盤ガスを大気として獲得する。このようにして獲得した大気はそのまま現在観測されている惑星の大気となることはなく、その成長過程において様々な要因により大気量や組成が変化していく。その代表的な要因が天体の衝突現象である。天体同士の衝突において、質量比が近い場合は非常に激しい衝突現象が発生する。このような巨大衝突が発生すると、天体のコアは激しく振動し、それに伴って大気が流出する現象がおこる。このとき、形成期に獲得した大気を失ってしまうため、現在観測で期待される大気量や大気組成と、形成期のそれは異なることが考えられる。

本研究では、天体の巨大衝突に伴う大気散逸を議論するために Smoothed Particle Hydrodynamics 法を用いた。これまでの研究でも天体衝突に伴う大気流出は議論されていたが、衝突規模が大きい部分ではまだ理解が不十分であった。そこで、惑星質量を $1-10 M_{\oplus}$ 、大気質量を 10-30% の天体に対しての衝突現象を詳細に議論する。

2 計算手法

本研究に用いる数値計算手法は Standard Smoothed Hydrodynamics 法である (e.g. Monaghan 1992)。使用した状態方程式は、水素ヘリウム大気は, Saumon et al. (1992), 岩石は ANEOS basalt を用いた。

3 計算の結果

衝突における計算の結果をまとめる。Figure 1 は衝突エネルギーに対する流出エネルギーの相関を示したものである。今回の解析の結果、衝突エネルギーと流出エネルギーには、

$$K_{\text{esc}} = \frac{E}{\Phi} K_{\text{imp}} \quad (1)$$

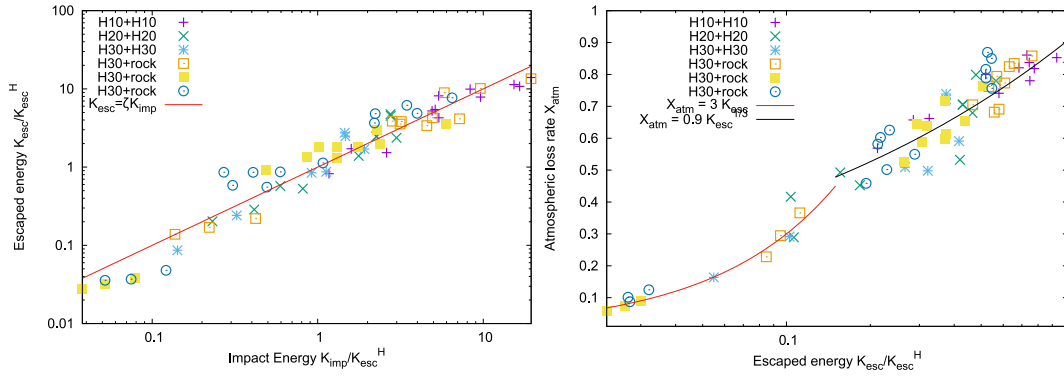


図1 衝突エネルギーに対する流出エネルギーの相関関係.

という相関があることがわかった. このとき, 衝突エネルギーを K_{imp} , 流出エネルギーを K_{esc} , 衝突後の天体の重力ポテンシャルエネルギーを Φ , 内部エネルギーを E とした. また, 流出エネルギーと流出大気量にも相関がある. 流出エネルギーが小さい場合は脱出速度で流出することを考え,

$$\frac{M_{\text{esc}}}{M_{\text{atm}}} \propto \frac{K_{\text{esc}}}{K_{\text{esc}}^H} \quad (2)$$

となることがわかった. また, 大気流出のエネルギーが大きい場合は脱出速度よりも早く流出することがあるため,

$$\frac{M_{\text{esc}}}{M_{\text{atm}}} \propto \left(\frac{K_{\text{esc}}}{K_{\text{esc}}^H} \right)^{1/3} \quad (3)$$

となることがわかった.

4 まとめ

本研究では水素大気を持った天体に対する巨大衝突の数値流体計算を行い, 大気散逸現象を解析し, 衝突エネルギーに対する大気流出効率の相関を求めた. 計算の結果, 衝突エネルギーから流出エネルギーへの変換効率は惑星内部構造の重力ポテンシャルエネルギーと内部エネルギーの比によって相関づけられることが示唆された. また, 流出大気量と流出エネルギーの相関関係は二種類の領域に分けられ, エネルギーに比例する領域と運動量に比例する領域からなることがわかった. 特に, エネルギーに比例する領域は大気は脱出速度で流出するものが主要であるのに対し, 運動量に比例する領域は大気が脱出速度以上に加速されて流出することも示唆された. 本研究の成果は, 衝突エネルギーが大気流出におけるエネルギー分配を明らかにすることができ, 天体衝突に伴う大気流出を予測精度を向上につなげられると考えている.