

物質強度を考慮した微惑星破壊

末次竜¹、田中秀和²、小林浩³、玄田英典⁴

¹産業医科大学、²東北大学、³名古屋大学、⁴東京工業大学・ELSI

太陽の周りの公転している惑星や小天体は天体同士の衝突による合体及び破壊で形成されたため、衝突現象は太陽系形成において非常に重要な物理過程といえる。天体は様々な規模の衝突を経験しており、破壊規模は衝突エネルギー Q_R (初期のインパクターの運動エネルギーを標的天体の質量で割った単位質量あたりのエネルギー)に依存する。特に衝突によって標的天体の質量が元の半分となる時のエネルギーは臨界衝突エネルギー Q_{RD}^* と呼ばれ、 Q_{RD}^* の値や性質は実験や衝突シミュレーションを用いて研究されてきた (e.g., Benz & Asphaug 1999)。その結果、 Q_{RD}^* の値は衝突速度、標的天体のサイズ、物質強度、さらに計算解像度にも依存することが明らかとなった (e.g., Jutzi 2015, Genda et al. 2015)。こうした結果は、主にSPH法で得られていたが、最近、我々はメッシュ法による衝突シミュレーションを行い、高解像度の計算では、SPH法によって得られた Q_{RD}^* の値とよい一致を示すことを明らかにした (Suetsugu et al. 2018)。この研究では天体の物質強度などの組成の効果は入れていなかったが、天体の組成による効果も Q_{RD}^* の値に影響を与えることが知られている (Jutzi 2015)。しかし、こうした天体組成と Q_{RD}^* の値の詳細な関係は不明である。そこで本研究では、衝突シミュレーションコードの一つで、弾性・塑性モデル、破壊モデル、空隙モデルなどが導入されているiSALE(Amsden et al. 1980, Ivanov et al. 1997, Wunnemann et al. 2006)を用いて微惑星破壊の計算を行い、物質強度を考慮した時の Q_{RD}^* の値や、 Q_{RD}^* の解像度及び物質強度への依存性について明らかにする。

計算設定であるが、標的天体の半径は 10, 30, 100, 300 km の 4 つの場合で、インパクターの衝突速度は 3km/s で固定し、インパクターサイズをパラメータにすることで様々な衝突エネルギーでの天体の破壊の様子を調べる。天体の組成は basalt で状態方程式は Tillotson を使用する。物質強度モデルは圧力下において岩石の挙動を再現する ROCK モデルを使う。また自己重力は考慮するが、空隙率は考慮しない。標的天体の半径に使用する格子数を 100, 200, 400 (ただし標的天体のサイズが 100 km の時のみ 800 の計算も行う)の異なる 3 つの場合で計算を行い、解像度依存性も調べる。

図 1(左)は、標的天体(100 km)の脱出速度を超えて放出されたイジェクタの総質量と衝突エネルギーの関係を示しており、衝突エネルギーが増加するほど放出されるイジェクタの量が増加していることが分かる。また色の違いは、衝突速度やインパクターのサイズなどの衝

突条件は同じだが標的天体の半径に使用した格子の数を変えた場合を示している。計算解像度がよくなるにつれてイジェクタの量が増加し破壊されやすくなっている。

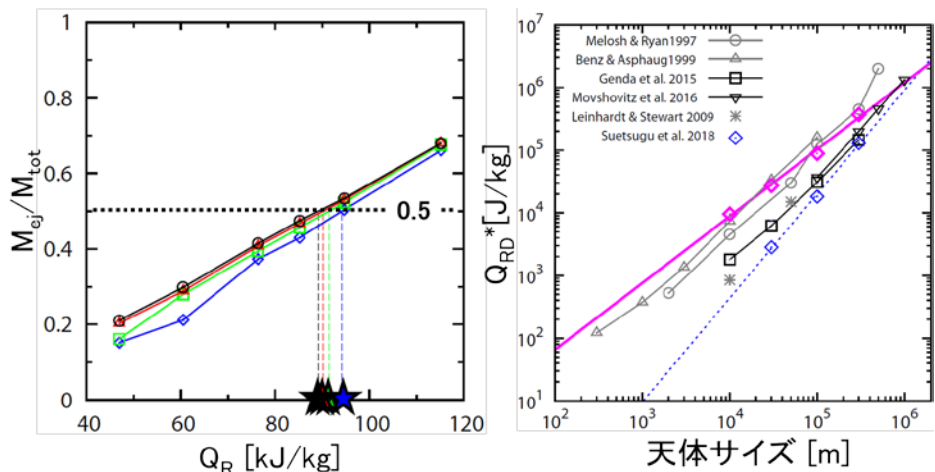


図 1:(左) 衝突エネルギーと破片の総質量の関係。色は解像度の違いで青、緑、赤、黒の順に標的天体半径に使用した格子の数が 100, 200, 400, 800 と増加し解像度が高くなる。(右)標的天体のサイズと Q_{RD}^* の関係。色付きのものが iSALE による計算結果で、ピンクが物質強度を考慮した場合で、青が物質強度を考慮しなかった場合である(Suetsugu et al. 2018)。

そのため物質強度を考慮した場合でも、天体の大規模破壊に必要とされるエネルギー Q_{RD}^* の値(図中の星印)が計算解像度に依存することは明らかである。各解像度から得られた Q_{RD}^* の値をフィッティングすることで得られた収束値は約 88.6 kJ/kgであった。図 1(右)は標的天体のサイズに対する Q_{RD}^* の収束値を示している。青色はiSALEで得た物質強度を考慮しなかった場合の Q_{RD}^* の値であり、比較すると物質強度を考慮することで3~10倍程度 Q_{RD}^* の値が増加していることが分かる。

今回、物質強度モデルで用いたROCKモデルは亀裂などが無い岩の圧力に対する挙動を示したモデルと破壊された岩の挙動を示したモデルを繋ぎ合わせたものであるが、基本的に衝突による衝撃波により衝突後の天体の物質モデルは後者に大きく依存する。後者の破壊された岩のモデルでは、挙動は摩擦係数のみに依存するので、最後に摩擦係数と Q_{RD}^* の関係を調べた(図2)。摩擦係数が増加することで衝突エネルギーが散逸しやすくなるため、破壊されにくくなり Q_{RD}^* が増加している。しかし摩擦係数が0.6以上では Q_{RD}^* の増加はゆるやかに摩擦係数に対する依存性は小さくなる。実際の岩の摩擦係数は0.5以上のものが多いため、現実的な摩擦係数を使っている限り、 Q_{RD}^* の摩擦係数依存性は小さいと言えるだろう。

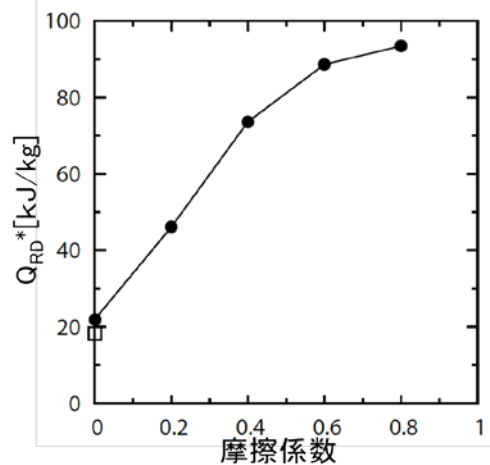


図 2 : 摩擦係数と Q_{RD}^* の関係。四角のマークは摩擦を考慮しなかった場合。

We gratefully acknowledge the developers of iSALE, including Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, Jay Melosh, Dirk Elbeshausen, and Thomas Davison.