

固体天体衝突シミュレーションによる蒸発の理論的研究

伊藤広大(名古屋大学大学院理学研究科)

利用カテゴリ XC30-Trial

一般的に惑星は、ダストから微惑星・原始惑星を経て、最終的には様々なサイズの天体が原始惑星に衝突することで形成される。その際の衝突にともない温度が上昇し、天体の物質では蒸発現象が起こる。蒸発現象は物質の化学変化や脱ガスなど、天体の組成に大きな影響を与える。特に氷を主成分とする天体では、氷の蒸発に必要なエネルギーが比較的小さいため、小さい衝突速度でも蒸発が十分起こりやすい。つまり、天体の同士の衝突にともなう蒸発現象は、惑星の多様性を理解する上で重要な物理的素過程である。

先行研究である O'Keefe et al. (1982)では、二次元円柱座標系で天体衝突シミュレーションをおこない、蒸発量を求めている。数値計算の結果から蒸発量が衝突速度の二乗に比例することを明らかにした。一方で、二次元円柱座標系では天体の正面から衝突する場合の計算しかおこなうことができないという問題がある。しかし、実際の天体同士の衝突では正面からの衝突よりも斜めから衝突する頻度のほうが明らかに多いため、斜めからの衝突に対する場合も考慮したシミュレーションをおこなう必要がある。そこで我々は Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いた3次元衝突計算コードを作り、衝突条件と蒸発量の関係を調べた。

コード開発

衝突計算は、ラグランジュ的流体数値計算法である SPH法を用いる。SPH法は連続の式とエネルギー方程式、状態方程式の3式を基にした数値計算方法である。SPH法の特徴として、密度を質量の広がりを持つSPH粒子の重ね合わせで表現し、大規模変形の計算に長けている。さらに3次元の計算も容易にできる点がある。さらに蒸発を扱うために、気体から固体まで扱うことができる Tillotson状態方程式を導入する。物質が蒸発するかどうかは、状態方程式に則って物質が低密度で、あるエネルギーよりも内部エネルギーが大きい場合に蒸発したと考える。さらに OpenMP並列化をおこない、大規模計算を効率的におこなえるようにした。図1に使用したコア数と計算時間とを比較したスケーリングを示す。(現在は理化学研究所の開発したFDPSコードを参考にMPI並列化もおこない、さらに大規模な数値計算を効率的におこなえるようになった。)

実験結果

数値計算コードを用いて、天体の衝突シミュレーションをおこなった。初期条件として、衝突する天体(半径5km)に対して十分大きなターゲット天体を想定し、衝突する付近がほぼ平面である仮定のもと、球と平面(半球)への衝突とする。衝突天体、ターゲット天体ともに氷の天体として、O'Keefe et al. (1982)の値を用いた。ある衝突速度のときの結果を図2に示す。さらに衝

突速度速度を変化させて、衝突速度とターゲット天体の蒸発量の関係を示したものが図3である。我々の数値計算結果から先行研究と同様にある程度の大きな衝突速度では速度の2乗に比例して蒸発量が増加することが分かった。一方でより低速度（～音速の2倍程度(6 km/s)）でも蒸発が生じる結果が得られた。この結果はO'Keefe et al. (1982)とは異なる結果である。この蒸発量は一次元的な衝撃波加熱の理論の理解から簡単に見積もることができ、その見積もりを示したものが図3の青線である。このことから低速度でも蒸発する我々の数値計算結果が合致していると言える。一方で速度が上がると三次元的に衝撃波が広がることによる影響が生じ、蒸発量が速度の2乗に比例する関係があることがわかった。

今後の課題

- ・ より多くの衝突パラメータによるシミュレーションをおこなう。
現在は正面衝突の場合のみだが、斜め衝突によるシミュレーションもおこなう。
- ・ より高解像なシミュレーションをおこなう。（現在は50万粒子だが500万粒子を目標とする）
- ・ 得られた数値計算結果から衝撃波加熱による蒸発量の理論を検証・理解する。

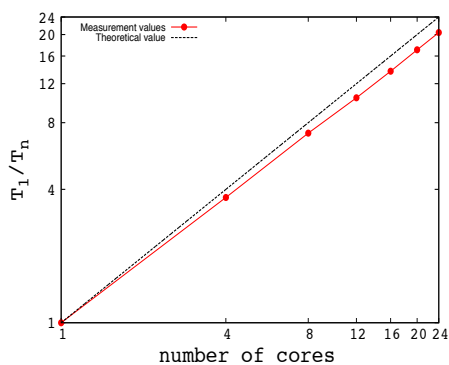


図 1：使用したコア数とそれにかかる計算時間を1コア使用したときとの比較。

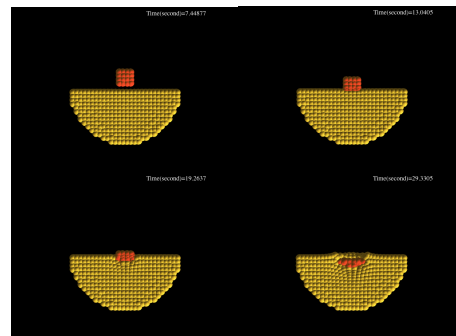


図 1：衝突シミュレーション結果

赤色が衝突する天体、黄色がターゲット天体を示している。左上から右下にかけて各時間でのスナップショットである

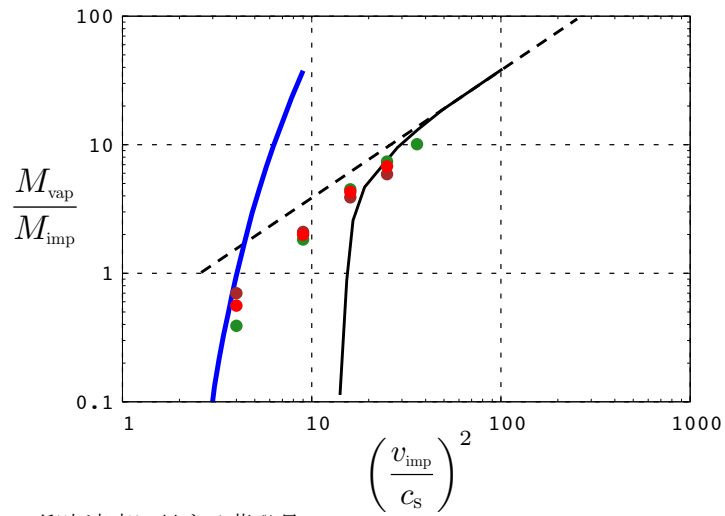


図 3：衝突速度に対する蒸発量

横軸がマッハ数の 2 乗、縦軸が衝突天体の質量で規格化されたターゲット天体の蒸発質量を表す。プロット点は数値計算結果であり、色の違いは用いた SPH 粒子数の違い。

黒線が O'Keefe et al. (1982)、青線が理論的に見積もられる蒸発量を示す。