

天体衝突による高速度放出物の特徴

黒澤耕介¹, 鎌田俊一², 玄田英典³,

¹千葉工業大学, ²北海道大学, ³東京工業大学,

はじめに: 全ての天体衝突は垂直衝突でなく斜め衝突である。斜め衝突時に衝突点近傍の物質は、衝突速度の数 10%に及ぶ高速度で放出されることが知られている。例えば惑星表層の水平混合や惑星間物質移動の文脈では高速度放出物の質量-速度-方向分布を理解することが必要である。

ところが、斜め衝突は 3 次元現象であり、実験的にも数値的にもデータに限られ、特に放出方向分布についての理解は乏しい。この現状は 2010 年以降に急速に進展した高速撮像技術、計算機性能によって打破できる可能性がある。Okamoto et al. (2020)は高速度斜め衝突実験を実施し、弾丸貫入特徴時間以上の時間分解能で詳細に放出物の様子を撮影した。また同時にこれまでにない空間解像度の 3 次元数値衝突計算を実施し、高速度放出物の様相を再現することを確認した。この事実は我々が実在物質の斜め衝突時の放出挙動を再現する数値計算コードを手にしたことを意味する。Kurosawa et al. (2019)及び Hyodo et al. (2019)ではこのコードを用いて衝突速度、角度を系統的に変化させた網羅的な数値衝突計算を実施し、火星から火星衛星への物質輸送量を定量化した。今回はこの網羅的計算についてさらに解析を進めることとした。

仰角-方位角-質量分布: 3 次元数値衝突計算コードの出力は 3 次元の位置座標と速度ベクトルであり、6 次元位相空間上のデータとなっている。高速度放出物分布を再現するには衝突天体そのものを 100 万粒子以上で表現する必要があり、データ量は数 100 GB に及ぶ。このデータを扱うのは煩雑であるし、ストレージコストの点で現実的ではない。そこでまずはデータ量を落とすことを検討した。上空へ放出された物質の速度ベクトルが得られているため、仰角(緯度)と方位角(経度)が張る天球を格子状に分割し、その質量分布を求めることが可能である。惑星科学応用ではそれほ

ど細かく天球を区切ることにはあまり意味はないので、この処理でデータ量を <1GB に落とすことができる。厳密には放出位置の情報を消してしまっていることになるが、高速度放出物は長距離移動するため、放出位置の微妙な差異は重要ではないと判断した。数値衝突計算を用いることで、かゆいところに手が届くような解析も可能になるだろう。そうではあるが、やはり天球上のデータ(3 次元: 仰角, 方位角, 質量)でも情報量が多すぎる。それに加えてこのデータをどのように評価するか? という問題はつきまとう。恣意性を排除しつつ、定量的に評価可能な手法を検討する必要がある。

球面調和関数展開の利用: 天球上に表現された関数は球面調和関数群を用いて展開することができる。緯度、経度に対応する 2 つの整数は次数 l と位数 m と呼ばれる。天球上の起伏の大きさを表現する波長 λ は次数 l を用いて $\lambda = 2\pi/\sqrt{l(l+1)}$ と表される。位数 m は $-l$ から l の値を取る整数であるので、展開係数の総数は $(l+1)^2$ である。また放出物の分布は衝突の斜線面に対して面対称であることが期待されること、もとの地表面よりも上空、すなわち天球の北半球のみをとればよいこと、球面調和関数の性質から必要な展開係数の総数は $(l+1)^2/4$ になる。すなわち l を 80 次までとった(波長 4.5°)としてもわずかに 1,640 個の定数で天球上の構造を表現できる。測地学分野では詳細に得られた惑星、衛星の高度分布、重力異常分布を表現するための常套手段である。展開係数は数学的に算出され、データフィッティングを行っているわけではないことに注意してほしい。

最低限必要な次数: まずは火星への典型的な衝突条件である 15 km s^{-1} , 45 度衝突の場合のデータを 80 次まで展開したところ、得られた展開係数からの再合成によって、もとの分布をよく再現できることを確認した。続いて次

数をどこまで下げても放出物の挙動を大局的に表現できるのかを検討したところ、少なくとも10次程度までは取る必要があることを確かめた。この場合展開係数の総数はわずか31個である。球面調和関数群の2乗和は振幅強度としてその次数の寄与を表す定量的指標となる。ある次数 l に対して展開係数は $2l+1$ 個存在するので、それぞれの係数を2乗して総和をとればよい。80次まで展開した場合、10次までの項で全体の50%程度の情報をもっていることがわかった。なお今回は衝突天体質量で規格化した無次元質量分布を展開しているので、展開係数も無次元である。

位数方向の振幅強度: 続いて位数に対する振幅強度を求めた。これはある位数 m に対して、次数方向の係数を2乗和している。次数と比較すると、位数方向には細かい構造の寄与があまりなく、位数2-3までとれば~80%の情報をもっていることがわかった。また衝突角度を固定した場合、衝突角度が浅い場合(15°)を除き衝突速度 6 km s^{-1} から 18 km s^{-1} までほぼ同じ強度分布になることがわかった。このことは高速度放出物の方位角方向分布は衝突速度には依存せず、衝突角度のみで決まることを示唆している。

実験&理論研究への示唆: 今回はまだ提案手法の有効性をみるための簡易的な解析を実施したに過ぎないが、高速度放出物を扱う研究への示唆が得られた。高速度放出物の分布を調べる実験を行う際には仰角方向により細かく調べることが推奨される。また、流体近似ができる場合には衝突速度の違いによる放出方向の分布の際が小さいので、衝突角度依存性を詳しく調べることが望ましい。

惑星間物質移動や、惑星表面物質の水平混合を扱う場合は球面調和関数の展開係数を入力パラメータにすることで、高速度放出物の初期条件を生成することが可能であろう。

※図や参考文献についてはスライドのPDFファイルをご参照下さい。