

Spallation による火星隕石放出過程の再評価

黒澤耕介¹, 岡本尚也¹, 玄田英典²

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター, ²東京工業大学 地球生命研究所

はじめに: 「火星隕石」は地球化学的な分析から、火星上に存在していた岩石が何らかの過程で放出され、地球軌道まで到達したものであることがわかっている。しかし、火星サイズの惑星の脱出速度(~5 km/s)を超え、物質を放出させることは力学的には困難である。過去には火山噴火の可能性なども検討されたが、噴火で爆発的に噴出するガスの膨張速度はせいぜい~1 km/s 程度であり、内因的理由による火星隕石の生成はほぼ不可能であると結論づけられている。

そこで注目されているのが天体衝突による物質放出過程である。火星への典型的な衝突速度は~10 km/s であるので、衝突速度の半分の速度まで物質を加速すればよいことになる。火星隕石の岩石学的分析によれば、火星隕石は30-50 GPaの衝撃圧力を経験した可能性が高いことがわかっており、火星隕石の成因として天体衝突はもっともらしい。ところが衝突物理の観点からみると>5 km/sの粒子速度と30-50 GPaの最大衝撃圧力を両立させるのは簡単ではない。衝撃波によって物質を加速する際の粒子

速度の理想的な上限は、衝撃波背面で獲得した粒子速度 u_{pH} の2倍である。このような理想的な状況を考えないと上記の火星隕石放出条件(5 km/s, 50 GPa)を満たすことはできない。

先行研究: 1980年代にMeloshがSpallationの解析モデルを提案している。このモデルは自由表面付近があたかも引き剥がされるように高速度で吹き飛び、相対的に低い衝撃圧力しか経験しない理由を明快に示したものである。しかし、現象を解析的に取り扱うために大胆な仮定がいくつか置かれており、その適用可能範囲には注意が必要である。実際に提唱者のMelosh自身が火星隕石放出過程には適用できない、と述べている。解析モデルで置かれた重要な仮定はいくつかあるが、中でも衝突直下点近辺、すなわち高速度で放出される領域、でその妥当性が失われる仮定は(1)圧縮波と引張波の重ね合わせができること、(2)熱圧力が無視できること、の2点である。前者は圧力と密度の線形関係であることを仮定していることに相当し、高圧条件では成立しない。後者は衝突点近傍では内部エネルギー

一の増加に起因する圧力が無視できないことから妥当ではない。これらは衝突直下点近傍の岩石物質を扱うために適当な状態方程式が選択されていないことに相当する。

この解析的な取扱いの困難からその後の研究の流れは2次元以上の数値計算に移り変わった。ところが数値計算で自由表面(物質境界面)付近からの物質放出速度と経験した衝撃圧力の信頼性について疑問が呈されている。この状況を受けて我々は2次元の数値衝突計算コード「iSALE-Dellen」を用いて、衝突点近傍の流れ場を高解像度で計算した。また計算手法による結果の違いも調べるために3次元SPH計算も実施した。

計算条件: 以下に計算条件を示す。2次元円柱座標を用い、衝突天体を2000 x 2000のメッシュで切った。これは先行研究に比べておよそ1桁高い空間解像度である。状態方程式には花崗岩のTillotson EOSを用い、衝突天体と標的は同一物質であるとした。Tillotson EOSを用いることで圧力に対する密度の非線形性と熱圧力を熱力学に無矛盾に流体計算に導入することができる。衝突速度は6-21 km/sの範囲で変化させた。今回は物質強度と重力を計算に入れておらず、計算結果はスケールに依存しない。各計算格子にトレーサ粒子を挿入し、各粒子の

軌跡と経験した圧力の時間履歴を求めた。

計算結果: 解像度を変化させた計算を実施したところ、表面から5グリッドほど深部では、興味ある衝撃圧力範囲での結果の収束が確認できた。また3-D SPH計算との比較では定量的な違いはいくつかみられるものの、火星隕石を放出可能な領域はiSALEの計算結果と調和的であった。以後はiSALEで表層5グリッドを除いた結果について述べていく。計算から明らかになったことは(1) 衝突速度の50%を超えるような高速成分は衝突天体の貫入特徴時間(=衝突天体半径/衝突速度)以内に放出される、(2) 自由表面付近では衝撃波の進行方向と希薄波の進行方向がほぼ直交する関係になり、衝撃圧縮からの解放過程で獲得する粒子速度は $\sqrt{2}u_{pH}$ になる、(3) 最終的に獲得する粒子速度が固体を加速する場合の理想的な上限である $2u_{pH}$ を超える成分が存在する、(4) 垂直衝突では火星隕石放出条件を満たす領域は衝突天体半径の2%程度の深さよりも浅いところに限られる、(5) 垂直衝突の場合、火星隕石放出条件を満たす質量は衝突天体質量の $10^{-4} - 10^{-3}$ 程度である、などである。最終的な放出速度が $2u_{pH}$ を超える成分について詳しい解析を行ったところ、自由表面を超えた後に「後期加速」が起

きていることがわかった。これは衝突点近傍かつ深部にあり、高い衝撃圧力を経験し、大きい u_{bH} を持った成分が、相対的に衝突点遠方かつ浅部にある物質を心太式に押し出すことで起こるようである。これは衝突直下点付近での掘削流は非圧縮の過程が成立せず、複雑な挙動をすることを示唆する結果である。

まとめ: 今回我々は垂直衝突について過去にない高解像度での数値計算を実施し、衝突直下点付近の Spallation による掘削挙動を詳細に解析した。その結果、「後期加速」によって衝撃波伝播時の加速の理想的な上限を超える速度まで加速される成分が存在することがわかった。このことから Spallation によって火星表層物質が火星重力圏を脱出し、地球軌道まで到達する可能性があることを示した。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。

※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。