

# 天体衝突による物質放出過程

黒澤 耕介

〈千葉工業大学 惑星探査研究センター 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1〉  
e-mail: kosuke.kurosawa@perc.it-chiba.ac.jp



本稿では天体衝突による物質放出過程について解説する。物質放出過程には(1)衝突噴射(Jetting)、(2)衝突剥離(Spallation)、(3)衝突掘削(Excavation)の三つの過程があり、それぞれに研究が行われてきた。衝撃波と希薄波の干渉の帰結として物質放出過程を整理すると、上記の3過程の特徴を定性的には説明できることをわれわれは提案している。それを定量的に裏づけるべく室内衝突実験と数値衝突実験を行っているところである。このような物質放出過程を理解することは小天体同士の衝突による新たな天体の生成過程を理解することにつながり、スペースガード研究の進展のために不可欠であろう。

## 1. はじめに

大気や液体といった流体を表面にもたない太陽系の固体惑星／衛星上の主要な地形は衝突クレータである。このことは天体同士の相互衝突が太陽系において普遍的な過程であり、天体はその歴史のうえで無数の衝突を経験してきたことを物語る。近年の広視野天文観測によって人間の時間スケールでも最近起こった衝突の痕跡が発見されている<sup>1)</sup>。相互衝突は現在の太陽系においても頻繁に起きることの証拠であろう。

本稿では衝突で発生する圧力が天体構成物質の物質強度を超えるような高速度衝突(おおむね秒速1 km以上)に焦点をあてる。破碎された物質は流動化し、クレータができる。その過程で必然的に天体の上空へ一部の物質が放出される。小天体同士の衝突の場合は容易に脱出速度を超え、宇宙空間へばらまかれ、新たな天体を生成することになる。スペースガードを検討する際にはこのような物質放出過程を検討することは重要であろうと思われる。

本稿の構成を以下に述べる。2章では物質の放

出過程について現在までにわかっていることを紹介する。特に放出過程が大きく分けて3段階あることを紹介し、それぞれの物理背景を述べる。3章ではそれらを統一的に理解するための筆者らの取り組みを紹介することにする。

## 2. これまでの理解

本章では天体衝突時に標的物質が上空へ向けて放出される理由を簡単に解説する。天体衝突で発生した圧縮波は標的内部へ伝播していく。発生した圧縮波の伝播速度が標的構成物質の音速を超えている場合には衝撃波が発生することになる。衝撃波強度が十分に強く標的構成物質の物質強度を超えている場合には物質が破碎されて強度を失い流動化することになる。平たく言えば、岩盤が砂に変わるということである。破碎された岩石は衝撃波面の進行方向と同じ向きに加速され、粒子速度を獲得する。秒速数kmで衝突した場合には衝撃波が通過した地点の圧力は10 GPaを超える。しかし、当然のことながら標的天体全体がこの高圧にさらされるわけではない。衝撃波が伝播した物質は高圧にさらされるが、標的天体の表面は圧

力0の自由表面である。したがって標的天体内部から自由表面に向かって物質が流れ、衝撃波は次第に減衰することになる。これは見かけ上、高压条件に置かれた物質の圧力を下げていく波に見えることから希薄波と呼ばれる。希薄波が到達すると圧力が下がると同時に粒子速度のベクトルが標的表面向きに曲げられる。このとき、鉛直上向きの速度成分をもった物質が標的天体上空へ放出される。衝撃波による物質の流動化と希薄波による速度ベクトルの変化が天体衝突による物質放出の原因である。図1に上記の説明に対応する数値衝突計算の出力を示す。科学利用目的には無償で公開されているiSALE shock physics code<sup>2)</sup>を用いて地球に直径10 kmの岩石天体が20 km/sで衝突すると想定した計算を行った。図1a, bは圧力のコンター図に質量0の追跡粒子のその時刻までの軌跡を重ねて書いたものである。図1c-eには図1a, bに青点で示した追跡粒子の(c) 粒子速度、(d) 速度ベクトルの向き、(e) 圧力の時間履歴を示している。ここで速度ベクトルの向きは地表面から測った角度として示している。衝撃波の到来に伴って-45度方向に~6 km/sまで加速され

ている。この粒子が経験した衝撃圧力は~150 GPaである。間もなく希薄波が到達し僅か~2秒のうちに圧力が数GPaまで下がる。減圧に伴って速度ベクトルの向きは~90度変えられ、鉛直上向きの速度をもつ。

天体衝突時の物質放出過程は大きく分けて(1) 衝突噴射 (Jetting), (2) 衝突剥離 (Spallation), (3) 衝突掘削 (excavation) の3段階があり、順番に進行する。衝突速度  $v_{\text{impact}}$  と衝突天体半径  $R_p$  を使って貫入特徴時間  $t_s = R_p/v_{\text{impact}}$  を定義すると、整理しやすい。以下ではそれぞれの過程の特徴とこれまでの理解を紹介する。実際には三つの過程は連続的に遷移し、見た目には区別がつかないことを注意しておこう。

**衝突噴射過程 (Jetting):** 衝突天体と標的天体の接触から  $t_s$  までの時間、つまり衝突天体はその半径の深さまで貫入する接触段階で起こる過程である。衝突噴射過程についての研究の始まりは1940年代まで遡る。もともとは金属平板が斜めに衝突する際に衝突速度を大きく上回る速度で物質が噴出する現象として、主に軍事利用目的で研究された<sup>3)</sup>。噴出速度は衝突速度の2-3倍に達することもある。衝突噴射現象は平板同士のなす角度がある臨界角度を超えた場合にのみ起こる<sup>4)</sup>。臨界角は衝突時に発生する斜め衝撃波の波面前後の質量、運動量、エネルギーの保存則 (Rankine-Hugoniot方程式) を、波面に垂直な方向、平行の方向にそれぞれ解いた際に解が存在しなくなる角度として定義される。球が平面に貫入していく過程は角度を変えながら衝突する平板と近似でき、天体衝突時には衝突噴射が必ず起こることになる。衝突噴射現象の最大の特徴は局所的なエネルギーの集中によって、衝突現象全体で最大の衝撃圧力・温度が達成される点である。そのため比較的低速の衝突であっても熔融や蒸発といった相変化を引き起こす<sup>5)</sup>。2 km/s程度の岩石物質同士の衝突でも熔融物が発生するため、隕石中に多く存在するコンドリュール (直径0.1-1 mm程度の

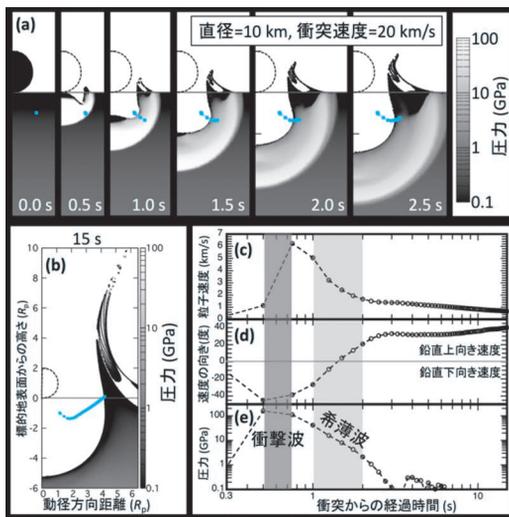


図1 衝突で物質が鉛直上向きに放出される仕組み。各パネルの説明は本文を参照。

球粒)の起源として有力視されている<sup>6)</sup>。放出速度は極めて大きいものの衝突天体と標的天体の接触面近傍の物質のみが放出されるので、放出される質量は衝突天体質量の1%程度と考えられている<sup>7)</sup>。

**衝突剥離過程 (Spallation):** 衝突天体と標的天体の接触から1-2  $t_0$ 程度までの時間で起こる過程である。この過程は月・火星隕石を発生させる機構として提案された<sup>8)</sup>。これらは地球化学的な分析によってもともと月や火星にあった物質が宇宙空間に放り出され、その後隕石として地球に落下したものであることがわかっている<sup>9)</sup>。衝突剥離過程の最大の特徴は衝突速度の数十%という高速度で物質が放出されることに加えて経験した衝撃圧が相対的に低いことである。1980年代に解析的なモデルが提案されている<sup>8)</sup>が、衝突剥離過程は他の二つの過程に対して未解明な点が多い。解析モデルは3章で述べるわれわれの指針の基礎を固めるのにたいへん役立つ示唆に富むものであったが、問題を解析的に扱うための大胆な仮定が行われており、実際の天体衝突条件には適用できなかった。そのためその後は数値計算による研究が主流になっていった<sup>9)</sup>。しかし、自由表面(物質境界面)近辺の挙動を数値的に精確に解くのは難しく、衝撃圧力や放出速度の計算値の信頼性には疑問が呈されていた<sup>10)</sup>。

**衝突掘削過程 (Excavation):** 天体衝突による物質放出過程を象徴する過程である。クレータ形成過程についてのほぼすべての科学解説記事やCGなどで描画される放出物はこの過程で放出された物質である。クレータの形成が終わる $\sim 100 t_0$ まで物質放出が持続する<sup>11)</sup>。この過程の特徴は放出物質量全体の大部分(>90%)を占めることである。放出物が経験する衝撃圧力は、初期位置と衝突点の位置関係で決まり、ほとんど衝撃圧を受けないものから熔融するほどの高い衝撃圧を受けたものまで幅広く存在する。三つの過程の中で最もよく研究されている。特に1965年に

NASAのエイムス研究センターに導入された二段式水素ガス銃は基礎科学研究に開放されており、さまざまな条件で衝突実験が行われデータが蓄積されている<sup>12)</sup>。次元解析によって室内実験結果を天然の衝突現象に適用するためのスケージング則も確立している<sup>13)</sup>。

### 3. 統一的理解に向けて

本章では先行研究を受けて筆者らが行っている取り組みについて紹介する。われわれの目標は三つの過程を衝撃波と希薄波の干渉の帰結として整理し、物質放出過程の統一的理解を得ることである。このような取り組みができるようになってきた背景には高速度衝突現象の計測技術の向上によって実験によって放出物の詳細な観測が可能になってきたこと、計算機の性能向上によって高解像度の数値衝突計算が可能になってきたことがある。2013年に千葉工業大学惑星探査研究センターに新設された高速度衝突実験施設では世界最高速度で撮像可能なビデオカメラ(1,000万コマ毎秒)と着弾とカメラの撮像タイミングを同期させる自律計算トリガシステムを導入しており、 $0.1 \mu\text{s} \cdot 0.1 \mu\text{m}$ の時空間分解能で物質放出過程を観察可能である<sup>14)</sup>。実験室スケールでの弾丸貫入特徴時間は $\sim 1 \mu\text{s}$ であるため、弾丸が標的に貫入していく段階の物質放出過程を捉えることができる。また科学利用目的であれば無償で公開されている数値衝突計算コード「iSALE shock physics code」を導入し数値解析も行える体制づくりをしている。室内衝突実験と数値衝突実験を相補的に行って物質放出過程の解明を目指している。衝突実験で観察された放出物の画像例を図2に示す。以下ではこのような取り組みによって見えてきた物質放出過程の描像を述べる。

最初に希薄波の到達に伴う物質の加速について詳しい解説をしておこう。希薄波は圧力を下げる波であるので波面進行方向と反対向きに物質を加速する。この加速で得られる粒子速度は熱力学の

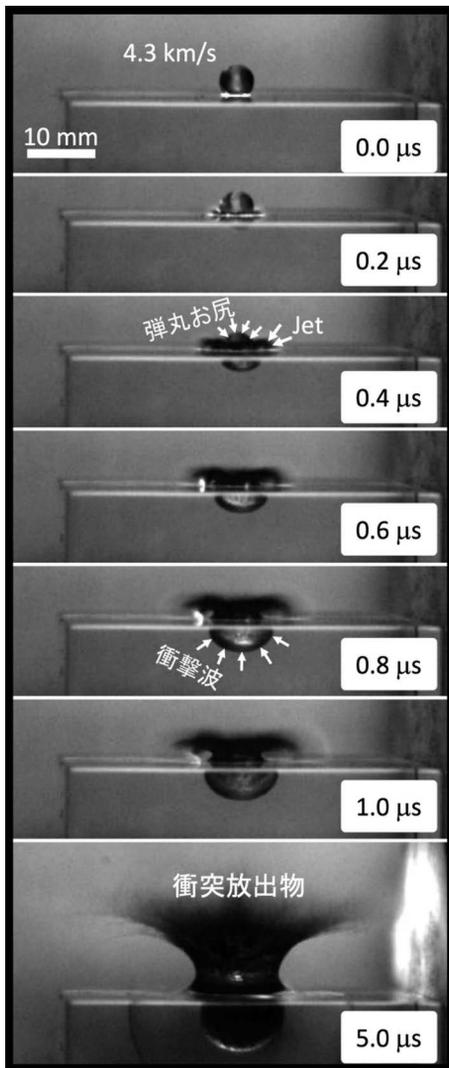


図2 高速度衝突実験で観察される放出物。弾丸と標的はともにポリカーボネイト。衝突速度は4.3 km/s。画像を90度回転させていることに注意。重力は画像の右向きにかかっている。

知識を用いて計算することができる。重要な点は希薄波による速度変化の大きさは、衝撃波伝播時に獲得した粒子速度の大きさとほぼ等しいということである。熱力学に馴染みのない読者はこの段落の以下を読み飛ばしても構わない。衝撃圧縮された物質の密度 $\rho$ は標準状態の密度 $\rho_0$ に比べて大きい。希薄波が到達すると $\rho$ が $\rho_0$ に戻るまで膨張

する。圧縮時の圧力は $>1$  GPaに達するので、周辺の物質に無関係に膨張し、標準密度に戻ると仮定して良い。これは断熱過程とみなせる。このとき粒子速度の変化量 $\Delta u_p$ はリーマン不変量と適当な状態方程式を用いて計算することができる<sup>15)</sup>。簡単のため $\rho$ が $\rho_0$ に戻るまで一次的に加速するとして、計算を実行すると $\Delta u_p$ は衝撃圧縮されたときに獲得した $u_{pH}$ よりもやや小さいがほぼ $u_{pH}$ そのものになる。少しだけ粒子速度が小さくなるのは衝撃圧縮時のエントロピー増加に起因する。衝撃波に希薄波が同じ方向から追いついた場合の粒子速度の大きさは $|u_{pH} - \Delta u_p|$ となる。これは残留速度と呼ばれる。物質の状態方程式に依存するが、残留速度は $u_{pH}$ の10%程度の大きさである。後ほど述べるがこの残留速度が衝突掘削過程を引き起こす<sup>15)</sup>。

以上のような考察によって希薄波通過によって獲得する速度ベクトルは、希薄波面の進行方向の逆向きで衝撃波通過時に獲得した粒子速度とほぼおなじ大きさであることがわかる。天体衝突時の物質の運動は衝撃波通過とその後の希薄波通過で獲得した二つの粒子速度ベクトルの和によって表すことができるだろう。このとき合成速度ベクトルの大きさを決めるのは(1) 衝撃圧縮時に得られる粒子速度の向きと大きさ、(2) 衝撃波と希薄波の波面進行方向の成す角度ということになるであろう。このように考えると2章で紹介した三つの過程の特徴を定性的には説明できる。概念図を図3に示す。

衝突噴射過程は衝突直下点で衝突体と標的の接触面で起こる。そのため衝撃圧力が高く、最初に獲得する粒子速度が大きい。それに加えて噴射点周りの物質の流れを考えると衝撃波面と希薄波面の進行方向のなす角度がほぼ180度の関係になるため加速効率が良い。二つの要因が合わさることで、衝突速度よりも速い放出速度を達成する。この新しいモデルの噴射速度の予測値は従来使われてきた経験的パラメータを含む従来の理論モデル

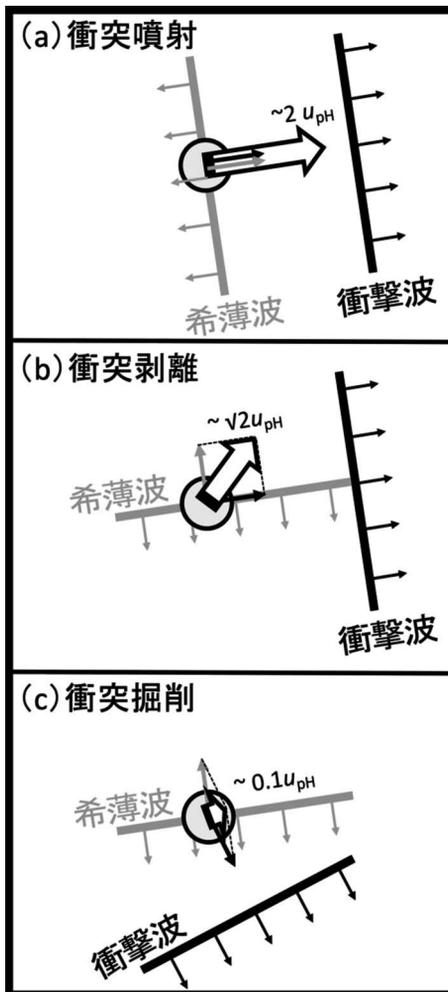


図3 衝撃波と希薄波の干渉で得られる合成速度ベクトルの概念図。

結果とほぼ一致する<sup>14)</sup>。

衝突剥離過程は標的の表面付近の浅部から起こる。そのため衝撃波の減衰が速く、衝撃圧力は上がりにくい。衝突点から発生した衝撃波面は自由表面と平行方向に伝播する。それに対して自由表面から発生する希薄波は自由表面に対して垂直方向に伝播する。したがって合成速度ベクトルは衝撃波面の進行方向に対して斜め45度方向に傾き、その大きさは $\sqrt{2}u_{ph}$ 程度になる。同種物質の衝突の場合、衝突点近傍の物質が衝撃波加速で得る粒子速度は衝突速度のおよそ半分と考えて良い。

したがって衝突剥離によって衝突速度の数%の速度で物質放出が起こることを説明できる。現在は高解像度の数値計算を行っており、より定量的に放出速度や質量を求めようとしているところである。

衝突掘削過程は標的の深部で起こる。衝撃波は衝突点からほぼ半球殻形状で伝播すると考えられる。衝突点の距離の関数として衝撃圧力が減衰するため、経験する衝撃圧力と得られる粒子速度は衝突点からの距離によってさまざまに異なる。希薄波面は自由表面から発生するホイヘンスの流体素元波の包絡線として表せる。衝撃波を追いかける希薄波の進行方向は衝撃波とほぼ同じになる。そのため最終的な粒子速度は残留速度程度になる。このようなモデルは1980年代に提案された<sup>15)</sup>が、定量的に放出質量や速度を求められるモデルではなく、その後は次元解析を用いた議論が主流になっていったようである。クレータ形成・物質放出過程に関係するパラメータとしては例えば衝突天体直径、衝突速度、標的天体の重力加速度、物質強度、衝突天体密度、標的天体密度などがある。次元解析を行うと、これらの量を組み合わせいくつかの無次元量を見いだすことができる。無次元量同士に関数形を仮定し、室内衝突実験・数値衝突実験によって係数を決定する。このようにすると流体力学の無次元数を用いた議論と同様に実験室スケールの実験結果を天然衝突のスケールに適用することができる。現在では $\pi$ スケリング則と呼ばれる定式化がなされ、放出質量や速度分布についても関数形や係数が決定されている<sup>13)</sup>。 $\pi$ スケリング則は衝突条件を与えると答えが出てくるので非常に便利である。しかし、適用限界が明確にされておらず利用には注意が必要である。われわれは相補的な手法として衝撃波と希薄波の干渉の帰結として衝突掘削質量や放出速度を求められる理論的な枠組みを構築しようとしているところである。

## 4. ま と め

高速度天体衝突が起こると衝撃波通過による物質の流動化、希薄波の通過による速度ベクトルの変化によって必然的に鉛直上向きをもちた成分が現れる。放出過程には衝突噴射、衝突剥離、衝突掘削の3過程があり、それぞれが独立に研究されてきた。われわれは衝撃波・希薄波通過に伴う物質加速に着目し、その合成速度ベクトルが放出速度を決定するという指針を立てている。このモデルは三つの過程の特徴を定性的には説明できる。現在は千葉工業大学惑星探査研究センターにおいて放出質量と速度を定量的に求めるため室内衝突実験と数値衝突実験を相補的に用いて研究を進めている。こういった知見がスペースガード研究に活かされることを期待したい。

## 謝 辞

本稿で紹介した研究は岡本尚也、玄田英典、長岡洋一、千秋博紀、和田浩二、長谷川直、杉田精司、松井孝典の各氏との共同研究で得られたものです。iSALE shock physics codeの開発者であるGareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausenの各氏に感謝いたします。執筆を勧めていただいた中村昭子氏、奥村真一郎氏に感謝いたします。筆者は科学研究費補助金15H01067, 26610184の助成を受けています。

## 参考文献

- 1) Ishiguro M., et al., 2011, ApJ 740, L11
- 2) Wünnemann K., et al., 2006, Icarus 180, 514
- 3) Birkhoff M. P., Taylor J., 1948, J. Appl. Phys. 19, 563
- 4) Walsh J. M., et al., 1953, J. Appl. Phys. 24, 349
- 5) Kieffer S. W., 1977, Impact and Explosion Cratering, 751, Pergamon Press, New York
- 6) Johnson B. C., et al., 2015, Nature 517, 339
- 7) Johnson B. C., et al., 2014, Icarus 238, 12
- 8) Melosh H. J., 1984, Icarus 59, 234
- 9) Head J. N., et al., 2002, Science 298, 1752
- 10) De Carli P. S., 2013, Proc. Eng. 58, 570
- 11) Melosh H. J., 1989, Impact Cratering: A Geologic Process, Oxford Univ. Press, New York
- 12) Hermalyn B., Schultz P. H., 2010, Icarus 209, 866
- 13) Housen K. R., Holsapple K. A., 2011, Icarus 211, 856
- 14) Kurosawa K., et al., 2015, J. Geophys. Res. Planets 120, 1237
- 15) Melosh H. J., 1985, Icarus 62, 339

### Material Ejection during Hypervelocity Impacts

**Kosuke KUROSAWA**

*Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan*

**Abstract:** We introduce the process of material ejection during hypervelocity impacts between two planetary bodies. The ejection processes are classified into three processes, (1) jetting, (2) spallation, and (3) excavation. These processes have been studied individually. We have proposed a new model to understand these processes by a unified manner, that is the outcomes of the interaction between a shock wave and a rarefaction wave. This model is able to explain the main feature of each process qualitatively. We are investigating the interaction between a shock wave and a rarefaction wave by using both experimental and numerical approach to assess the validity of our new model. Such basic understanding on the ejection behavior is necessary to investigate the production rate of Potentially Hazardous Asteroids due to mutual collisions between two planetary bodies.