

H26 年度 申請課題 研究計画
斜め天体衝突の衝撃蒸発過程の撮像・分光・生成ガス同時計測

黒澤耕介¹, 大野宗祐¹, 石橋高¹, 長谷川直², 松井孝典¹

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター,

²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

要旨

我々は二段式軽ガス銃を用いて天体衝突による衝撃蒸発過程を解明すべく実験的研究を進めている。平成 24 年度までに堆積岩の衝突蒸発を開放系で調べるシステムを構築することに成功した。平成 25 年度は水氷の衝撃応答を調べる実験を計画していたが、実験システムの問題から一時延期とし、来年度は斜め衝突時の堆積岩の衝撃蒸発実験を計画している。本稿ではこれまでの経緯と来年度の実験計画について述べる。

1. はじめに

惑星及び衛星は衝突を繰り返して成長する。成長するに従って衝突速度は高速になり、その衝突エネルギーは熱として埋め込まれることになる [Ahrens and O'keefe, 1972]。これまでにクレータ形成過程に関する研究は広く行われ、衝突速度、角度、衝突天体密度といった衝突条件とクレータの大きさを結びつけることは可能になりつつある[e.g., Melosh, 1989]。しかし、高速度衝突で引き起こされる相変化、化学反応の結果、最終的にどんな化合物がどの程度生成されるのかはわかっていない。クレータ形成過程は主に衝突点遠方の低エネルギー密度で駆動される実験室で検証可能な物理過程に支配されるのに対し、相変化や化学反応が起こる衝突点近傍の高エネルギー密度領域は、実験的困難のために実証的な研究が進まなかったことが原因である。太陽系形成の最終期においては天体同士の衝突速度は 1-10 km/s に達し、衝突で解放されるエネルギーによって蒸発、熔融といった相変化を引き起こす[e.g., Ahrens & O' Keefe, 1972; Stewart et al., 2008]。この過程は固体物質中を伝播する衝撃波による超臨界流体化、続く圧力解放過程における相変化（気液分離、気相からの凝縮）、気液混相流体中での化学反応といった特徴時間の異なる多くの非常に複雑な物理化学過程を含み[e.g., Zel'dovich & Raizer, 1967]、その理解は容易ではない。現代のコンピュータを持ってしても、これらすべての過程を第一原理的に全て計算することは不可能であり、実験が唯一の研究手段となる。ところが、衝突実験の主要な弾丸加速装置である二段式軽ガス銃を用いた化学分析は、火薬燃焼ガス及び弾丸加速に用いる水素による化学汚染のために困難であった。

2. 二段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析の成功と失敗

この状況を打破するため、我々はそのような化学汚染を防ぐ開放系気相化学分析手法を考案、実現し、堆積岩の衝突脱ガス過程を開放系で調べる実験を行った[Kurosawa et al., 2012]。標的には空隙無しの天然の炭酸塩岩(CaCO_3)を用い、衝突速度のみを変化させ、衝突生成 CO_2 量を衝突速度の関数として計測した。衝撃波伝播と熱力学・化学平衡 (Entropy method) をもとに簡単な理論モデルを組み立て、実験結果と比較したところ、非常によい一致を示すことがわかった。この結果は衝突で発生する気体量が衝突で生成する Entropy によって決定され、実験室スケールであっても熱化学平衡の議論が成立するというを示唆する。天然の隕石衝突のような大スケールではより平衡に達しやすい傾向にあると期待できるので、この結果は天然の衝突現象にも適用可能であることが期待できる。

水氷は氷衛星、彗星の主要構成要素であり、衝撃に対する熱力学的応答の理解は惑星科学だけでなくアストロバイオロジー研究の観点からも一線級の重要性を持つ。水氷を衝撃圧縮した場合には容易に超臨界流体状態に達する。超臨界水は物理的・化学的性質が通常の水とは大幅に異なるが、これまでに衝突生成超臨界水に着目した研究は非常に少ない。そこで我々は平成 25 年度の研究課題として炭酸塩岩で確立した手法で水氷の衝撃応答を調べることを試みた。高速ビデオカメラを用いた撮像の結果、水蒸気が発生するところを捉えることには成功した。しかし、ガス分析システムの応答時間が長すぎ、衝撃加熱によって発生した水蒸気と、雪状に砕け散り真空チャンバー内に散らばった氷が昇華して発生した水蒸気の違いが付かないということがわかった。このことは真空チャンバーの中に砕け散った氷が昇華しないような冷却ステージを設置しなければならないことを示唆している。現在千葉工業大学惑星探査研究センターの高速衝突実験室において、二段式軽ガス銃システムで使用可能な冷却ステージの開発を行なっている。本課題は一旦延期し、将来的に千葉工大の冷却システムを宇宙科学研究所のスペースプラズマ施設に持ち込み、再挑戦をさせて頂きたい。

3. 開放系気相分析技術の斜め衝突への適用

重力が大きい天体への天体衝突角度分布は 45 度を中心とする釣り鐘分布となる。天体衝突による相変化、化学反応を理解するには斜め衝突で何が起こるかを理解する必要がある。衝撃波の遠方場近似が十分に良く効くような場合は、衝突速度の地面に対する垂直速度成分を用いると現象を説明できる場合もある[e.g., Schmidt and Housen, 1987]が、衝突点近傍では著しい非軸対称性を持った流体運動が駆動される [Schultz and Gault,

1990; Schultz, 1996; Sugita and Schultz, 2003; Elbeshausen et al., 2009; 2013]。垂直衝突の場合と比べて、斜め衝突は本質的に3次元の現象であるために複雑である。特に純粋な衝撃波による加熱だけでなく、斜め衝突特有の強い剪断加熱も気体発生量に大きく寄与するという報告もある[Schultz, 1996]。これが確かだとすると、発生した高温蒸気が辿る温度圧力経路が変化するため、最終的に生成される気体の化学組成がこれまでと大幅に異なる可能性がある。「斜め衝突時に発生気体量を決める物理過程は何か？」を決定する必要がある。

先述したとおり我々は炭酸塩への垂直衝突時の発生気体量において、実験結果と理論予測がよい一致を示すという結果を得ている。今年度はこの技術を斜め衝突実験に応用し、発生気体量をプローブとして用いることで、斜め衝突時の衝撃蒸発過程を調べる。図1に実験模式図を示す。標的を傾けて設置することで水平撃ちの銃を用いて斜め衝突実験を行う。標的には先行研究と同様の炭酸塩岩を用いる。計測は高速ビデオカメラ、高速分光計、四重極質量分析計を併用し、発生した気体の膨張速度、温度・圧力、気体量を同時に計測する。衝撃加熱と剪断加熱では気体が発生する過程が異なるので、発生する蒸気の膨張速度、温度・圧力に違いが現れることが期待できる。実験は衝突速度と衝突角度を変化させて行う。幾つかのあり得る理論モデルを組み立て、実験結果と最も整合するモデルを探することで、斜め衝突時の衝撃蒸発過程で支配的な物理過程を決定することを目指す。

まとめ

本稿ではスペースプラズマ実験施設に導入されている二段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析システムを斜め衝突蒸発過程の解明を行うための研究計画を提案した。天然の衝突現象の大部分が斜め衝突であるにも関わらず、現象の複雑さから理解が進んでいない。斜め衝突実験の撮像・分光・生成気体量同時分析を行うことで、この状況を打破することを目指す。

参考文献

- Ahrens, T. J. & O'Keefe, J. D. Shock melting and vaporization of lunar rocks and minerals. *The Moon* 4, 214–249 (1972).
- Elbeshausen, D., Wünnemann, K. & Collins, G. S. The transition from circular to elliptical impact craters. *J. Geophys. Res. Planets* 118, 2295–2309 (2013).
- Elbeshausen, D., Wünnemann, K. & Collins, G. S. Scaling of oblique impacts in frictional targets: Implications for crater size and formation mechanisms. *Icarus* 204, 716–731

(2009).

Kurosawa, K. et al. The nature of shock-induced calcite (CaCO_3) devolatilization in an open system investigated using a two-stage light gas gun. *Earth and Planetary Science Letters* 337-338, 68–76 (2012).

Melosh, H. J. *Impact cratering: A geologic process*. Research supported by NASA. New York, Oxford University Press (Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 11), 1989, 253 p. -1, (1989).

Schmidt, R. M. & Housen, K. R. Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering. *International Journal of Impact Engineering* 5, 543–560 (1987).

Schultz, P. H. Effect of impact angle on vaporization. *J. Geophys. Res.* 101, 21117 (1996).

Schultz, P. H. & Gault, D. E. in *Geological Society of America Special Papers* 247, 239–262 (Geological Society of America, 1990).

Stewart, S. T. and Ahrens, T. J., Shock properties of H_2O ice. *J. Geophys. Res.* 110, E03005 (2005).

Sugita, S. & Schultz, P. H. Interactions between impact-induced vapor clouds and the ambient atmosphere: 1. Spectroscopic observations using diatomic molecular emission. *J. Geophys. Res.* 108, 5051 (2003).

Zel'dovich, Y. B., and Raizer, Y. P., *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*, Academic, San Diego, Calif., (1967).

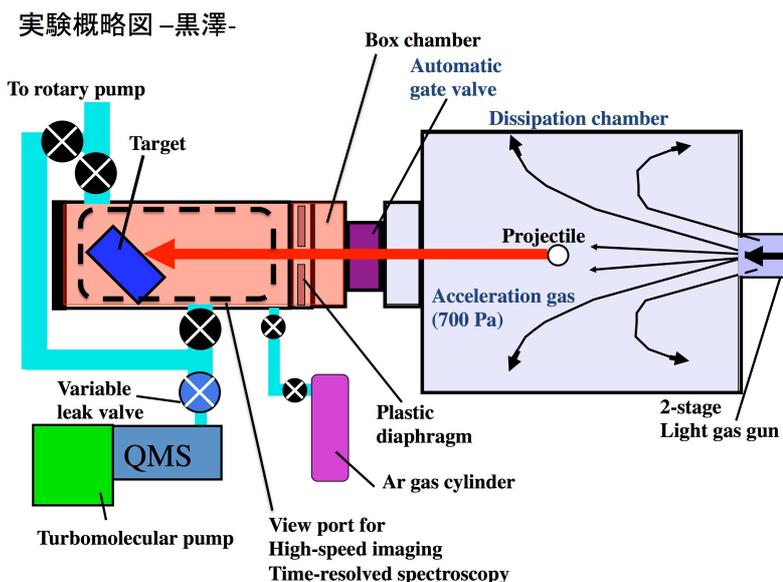


図 1 . 斜め衝突実験模式図