

# 千葉工大惑星探査研の衝突銃システムと ISAS の QMS ガス分析システムの状況報告

黒澤耕介, 大野宗祐, 石橋高, 松井孝典

千葉工業大学 惑星探査研究センター

**要旨:** 宇宙科学研究所スペースプラズマ実験施設の共同利用の一環として, 千葉工業大学惑星探査研究センターの二段式水素ガス銃システムに開放系衝突生成気体分析システムの導入を開始した。

## 1. はじめに

形成末期の太陽系惑星/衛星への衝突速度は秒速数 km を超え, 衝撃加熱によって氷, 珪酸塩など天体の構成要素が蒸発する [e.g., Ahrens and O'keefe, 1972, Stewart and Ahrens al., 2005]. 天体衝突は時間的・空間的に局所的な過程ではあるが, エントロピー上昇によって惑星/衛星表層で化学反応を駆動し, 平均場では生じ得ない化学種の生成を引き起こす特異な過程である. 千葉工業大学惑星探査研究センターではこのような天体衝突で引き起こされる蒸発過程, それに続く気相化学反応が惑星表層環境進化に与えた影響を評価するための実験系を整備することを目指している。

## 2. 衝突脱ガス分析システム

我々は以前, 衝突蒸発/脱ガス過程を調べるために宇宙科学研究所の二段式水素ガス銃システムに取り付けて使用可能な開放系ガス分析システムを開発した [Kurosawa et al., 2012]. 二段式水素ガス銃は加速に耐える強度を持っていないと条件がつくものの任意の弾を標準状態の温度, 密度を保ったまま秒速 8 km 程度まで加速可能という利点がある. 氷, 堆積岩などの衝突蒸発過程を調べるには最適な加速装置であろう. 今年度は同様のシステムを千葉工業大学惑星探査研究センターの衝突銃システム [Kurosawa et al., 2015] に導入すべくスペースプラズマ実験施設の共同利用の一環として装置の借入と専用の実験チャンバの整備を実施した. 千葉工大の銃システムは宇宙科学研究所の銃よりも一回り小さく(銃身の内径が 4.8 mm), 大きな弾丸を射出することができないが, ガス分析時に問題となる銃由来の化学汚染ガスの量が劇的に少ないため衝突生成気体の分析にはより適している. 図 1 にガス分析システムの四重極質量分析計で空気を計測した例を示す. もちろん各ガス種のバックグラウンドの強度にもよるが, 条件がよければ ppm レベルの微量成分の計測も可能であることがわかる. 計測の時間分解能は~1 秒程度である. 従って生成気体を~1 秒程度保持でき

れば計測が可能である。

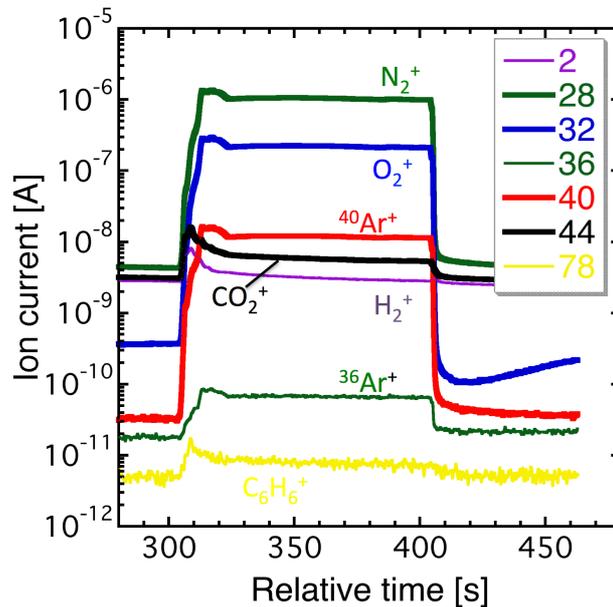


図 1. 四重極質量分析計で空気を計測した例. 各線の数字が質量数を電荷で割った値を示す.

### 3. 金属標的を用いた試し実験結果

実験手順と衝突銃システムとガス分析システムの同期確認のため、手始めに衝突によってガスを生じないはずのアルミ板標的を用いた試射を行った。ここで金属標的を用いた理由は、銃由来の化学汚染ガスを遮断できているかの確認を容易にするためである。弾丸は直径 2 mm のアルミナ球を用いた。アルミナ球の加速のために宇宙研で開発された Nylon slit sabot [Kawai et al., 2010]を用いた。この条件での主な化学汚染ガスとしては弾丸の加速に用いる水素ガスと、サボストップパに衝突して蒸発するサボの炭素系蒸気であると予想される。実験チャンバの内圧を 2 kPa になるように Ar のフローと排気量を調整し、弾丸を射出した(詳しい実験手順は Kurosawa et al. 2012, EPSL を参考にして頂きたい)。射出速度は 2.8 km/s である。衝突の様子は高速ビデオカメラ (Shimadzu, HPV-X) で撮影した。撮像速度は 2  $\mu$ s/frame とし、現象の一部始終を捉えた。

撮像の結果、アルミ標的から吹き出す放出物の軌跡が後追いガスによる影響を受けていないことを確かめることができた。これは実験チャンバに化学汚染気体が侵入していないことを示唆している。図2に Shot 後のサボストップパと標的の表面の写真を示す。サボストップパ表面は炭素系蒸気の影響で煤けているが、標的の表面は金属光沢を保持していることがわかる。このことも実験チャンバ内に化学汚染ガスが侵入でき

なかったことの傍証となるであろう。四重極質量分析計ではなんの信号変化も確認できず、衝突時刻を特定することができないほどであった。宇宙科学研究所のシステムでは若干の水素の侵入を防ぐことは困難であった[Kurosawa et al. 2012]が、千葉工大の一回り小さいシステムが功を奏したのかもしれない。速度を上げていっても同様に化学汚染ガスを防ぐことができるかは今後調べる予定である。

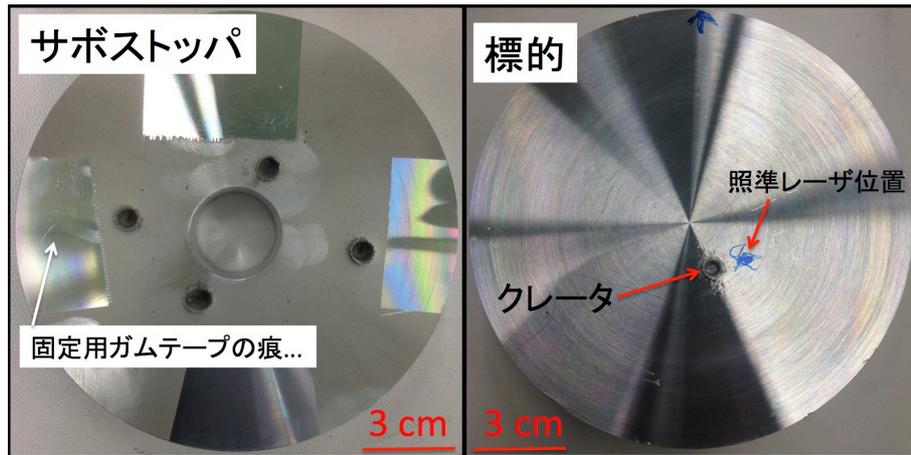


図 2. Shot 後のサボストップパと標的。サボストップパの光沢がある部分は固定用に貼付したガムテープの痕である。

#### 4. iSALE Shock physics code の活用

Kurosawa et al. (2012)では自己相似的な衝撃波伝播を仮定し、炭酸塩からの衝突脱ガス量を計算し、実験との比較を行った。しかし、衝撃圧力減衰率はフリーパラメタとなってしまっているという弱点があった。そこで我々は数値衝突計算コード iSALE[e.g., Wünnemann et al. 2006]を用いて、実験条件での衝撃波減衰率を数値的に求めることを試みている。数値衝突計算と適切な状態方程式を組み合わせることで弾丸の貫入、衝突点から発生する衝撃波及び自由表面から発生する希薄波の伝播、衝撃波と希薄波の干渉による衝撃圧の減衰を数値的に解くことが可能となる。不透明な標的内部の最大衝撃圧分布を知ることができれば、発生気体量の見積精度の向上が期待できる。実験結果と理論計算が不一致を示した際に見落としている物理過程を探るときに役に立つと期待される。図3に半径 1.6 mm のアルミナ球を炭酸塩岩に 10 km/s で衝突させた場合の最大衝撃圧力分布を示す。iSALE の計算結果を黒点、Kurosawa et al. (2012)で使用した自己相似的衝撃波伝播モデルの計算結果を3本の線で示している。定性的には以前の解析モデルでよく表現できているが、定量的には差異があることがわかる。今

後は数多くの計算を実施し、標的内の衝撃波伝播モデルを再構築していくよていである。

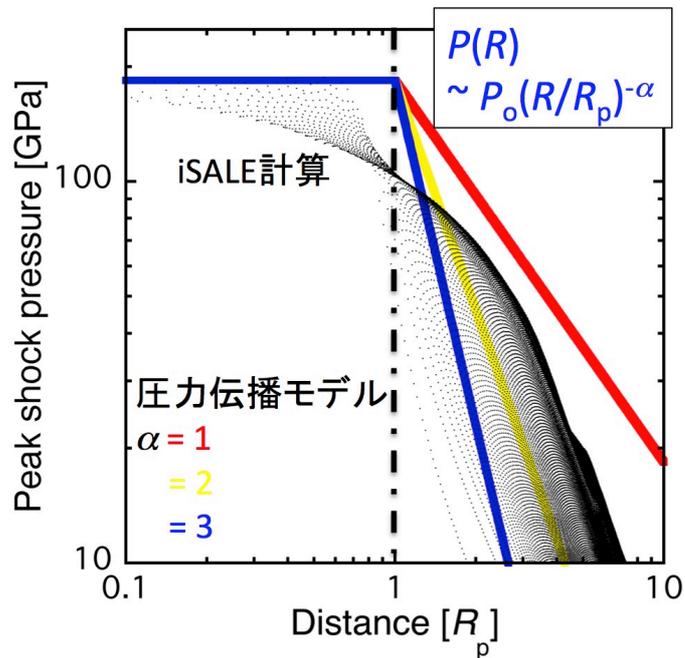


図 3. iSALE の計算例. 半径 1.6 mm のアルミナ球を炭酸塩岩に 10 km/s で衝突させた場合の最大衝撃圧力分布. 図右上の数式は先行研究で使用された自己相似的衝撃圧力減衰式である. 減衰指数 $\alpha$ がフリーパラメタとなる. 計算に用いた $\alpha$ は図左下に示した.

## 5. まとめ

千葉工業大学惑星探査研究センターの二段式水素ガス銃システムに開放系衝突生成気体分析システムの導入を開始した. 今のところ低速条件の一発のみの結果であるが, システム由来の化学汚染気体の実験チャンバへの侵入をほぼ完全に防ぐことができているようである. iSALE shock physics code を利用し不透明標的内部の衝撃圧分布推定も実験と同時平行で実施していく予定である.

**謝辞:**千葉工大のガス分析システムの構築に際して多大なご協力を頂いた長谷川直氏と iSALE の 開 発 者 である G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, Jay Melosh, D. Elbeshausen の各氏に感謝致します.

## 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).
- Kawai, N. et al., Single microparticle launching method using two-stage light-gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris, *Rev. Sci. Instr.*, **81**, 115105, (2010).
- Kurosawa, K. et al., The nature of shock-induced calcite (CaCO<sub>3</sub>) devolatilization in an open system investigated using a two-stage light gas gun, *Earth and Planet. Sci. Letters*, **337-338**, 68–76, (2012).
- Kurosawa, K. et al., Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *J. Geophys. Res.*, Accepted, (2015).
- Stewart, S. T. and Ahrens, T. J., Shock properties of H<sub>2</sub>O ice. *J. Geophys. Res.*, **110**, E03005, (2005).
- Wünnemann, K. et al., A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets, *Icarus*, **180**, 514-527, (2006)