

水氷の開放系衝突蒸発実験

黒澤耕介¹, 岡本尚也¹, 藪田ひかる², 小松吾郎³, 松井孝典¹

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター, ²大阪大学 宇宙地球科学専攻

³ダヌンツィオ大学, 国際惑星科学研究大学院

1. はじめに

太陽系の固体表面を持つ惑星/衛星を支配する地形は衝突クレータであり、太陽系の歴史を通じて天体衝突にさらされてきたことを物語る。天体衝突は天体表面に莫大な運動エネルギーを供給し、物質の相変化、化学反応を経た物質が惑星表層に再分配される。場合によっては天体の重力圏を脱し、宇宙空間に散逸する可能性もある。惑星の表層進化を理解するために高速度天体衝突による相変化・化学反応を理解することは必須であろう。

2. 氷天体上の衝突化学

本研究では氷天体上の天体衝突によって引き起こされる化学反応に焦点をあてる。氷天体同士の高速度衝突が起きると水は超臨界状態(>0.028 GPa, >647 K)になる条件を容易に満たす。例えば氷同士の衝突では衝突速度が4 km/sを超えると超臨界水が生成される。超臨界水は通常の水とは異なる物理化学特性を示し、有機物や珪酸塩を溶かす[e.g., Furukawa et al. 2007]性質を持つことが知られている。ここで面白い点は有機物や珪酸塩が衝突で蒸発する条件を満たさなくても、超臨界水へ溶け込むことで実効的には蒸発し気相化学反応を起こすと期待できることである。氷天体同士の天体衝突で生成される超臨界水が介在することによって氷天体上の有機物や珪酸塩が気相反応に取り込まれ、様々な生成物を作り出すことが期待できる。近年では太陽系の最初期と数億年経過後に巨大ガス惑星の大移動が起きたとする軌道進化モデルが提案(Grand Tack model [Walsh et al. 2011], Nice model [Gomes et al. 2005])され、太陽系天体の多くの力学的、地球化学的な特徴を説明する試みが行われている。軌道大激変が起こると天体衝突速度が大きく変化する。先ほど述べた衝突化学過程は衝突速度に強く依存すると予想される。一酸化炭素(CO)のような揮発性の高い分子が生成されれば、宇宙空間に散逸し、天体からは炭素が取り除かれるであろう。このような化学反応の衝突速度依存性が明らかになると、氷天体の組成を調べることで初期太陽系の軌道進化に関する情報を引き出すことができる可能性がある。化学反応を通じて窒素を含むような複雑有機物が生成されるならば、氷天体に沈着し、特異な反射スペクトルを示すことだろう。これは2030年代のJUICE探査で発見できる可能性がある。

このような問題意識を持って我々は氷微惑星模擬物質の衝突誘起化学反応を詳細に調べる実験システムを構築している。本稿では第一歩として実施した水氷の衝突蒸発実験について報告する。

3. 衝突蒸発実験

千葉工業大学 惑星探査研究センターが保有している二段式水素ガス銃[e.g., Kurosawa et al., 2015]の下流側に開放系気相化学分析システムを取り付けた。基本的には我々が過去に構築した実験系[Kurosawa et al., 2012]と同様のものである。今回新たに液体窒素を用いて冷却可能なステージを擁する専用実験チャンバを製作した。今回は装置の試運転として、標的に純水氷を用いて、発生する水蒸気を計測する実験を実施した。

実験条件: 飛翔体に直径 2 mm の Al_2O_3 を用いた。弾丸加速のためにナイロンスリットサボ[Kawai et al., 2010]を使用した。衝突速度は 4.9 km/s であった。純水を沸騰させ脱気した後に直径 5 cm, 高さ 5 cm の容器に入れ、冷凍庫(~250 K)に放置することで氷標的試料を製作した。今回新たに設置した冷却ステージは液体窒素を用いて~200 K まで冷却して使用した。これはステージ上で標的を冷やすことが目的ではなく、衝突後に砕け散り、ステージに落下した試料が昇華してしまうのを防ぐためである。冷却ステージの上に試料を直接設置すると熱クラックが発生してしまうので、プラスチックで製作した試料台を製作し、その上に氷標的を設置した。その場気相化学分析のために四重極質量分析計(QMS)を用いた。これは ISAS の超高速衝突実験施設の共同利用の一環として借り受けている計測器である。図 1 に実験装置の概略図を示す。

以前に開発した開放系気相化学分析法[Kurosawa et al., 2012]では実験チャンバの前面に極薄のプラスチックフィルムを設置した上で、実験チャンバを Ar ガスで満たし、銃由来の化学汚染ガスを遮断するという方法をとっていた。この方法では生成したガスが Ar ガス中を拡散して QMS に導入されるまでに~10 秒ほどの時間がかかっていた。今回は計測したい気体が水蒸気であり、真空チャンバから QMS への真空ラインの壁面に吸着してしまう恐れがあった。そこで今回は装置の応答時間を最大にするために Ar ガスを用いず、真空条件(~10 Pa)でのショットを実施した。この場合は生成したガスがほぼ音速で膨張して QMS に直接届くはずである。このように今回は衝突生成水蒸気の検出を第一の目的とした実験を実施した。

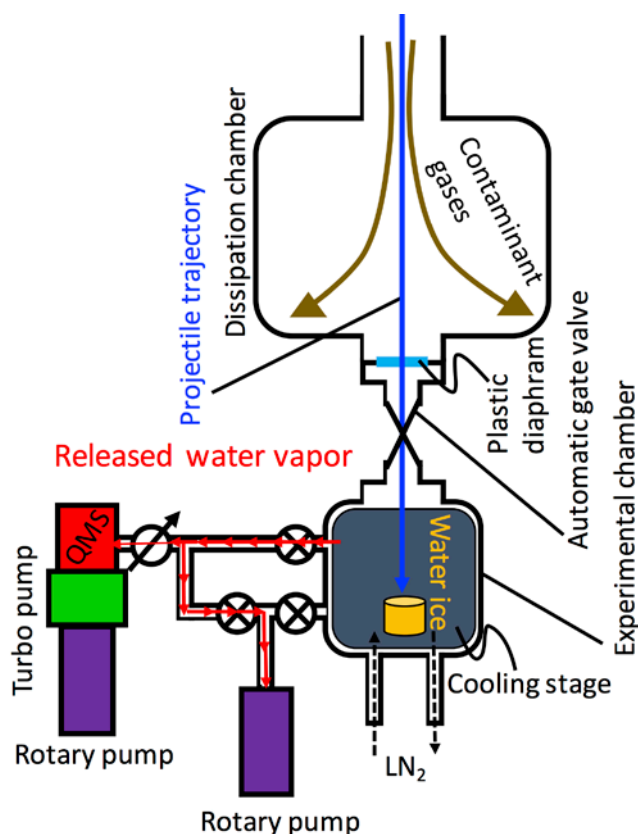


Figure 1. 千葉工業大学 惑星探査研究センターの実験装置の概略図.

実験手順: 標的とプラスチックフィルムを設置した後に実験チャンバを ~ 10 Pa まで排気した. その後に液体窒素を用いてステージを ~ 200 K まで冷却した. 準備ができたなら二段式水素ガス銃を発射可能な状態に組み立て, QMS の入り口の可変リークバルブをあけ, QMS を動作させた. 部屋から退避した後に前室にて銃を制御し, Al_2O_3 弾を発射した. この発射のシグナルで実験チャンバの前段に設置した自動ゲートバルブを動作させ, 生成気体が実験チャンバから逃げてしまうことを防いだ. 生成気体は図 1 の最下部にあるロータリーポンプによって強制的に QMS 方向へ導き, 分析した.

4. 実験結果

QMS で計測した各種気体の電流値の時間変化を図 2 に示す. 各化学種は質量数 (M/z) とクラッキングのパターンから推定した. Shot の直後に水に対応する $M/z = 18$ の電流値がバックグラウンドレベルの ~ 10 倍まで増加していることがわかる. $M/z=17$ に対応する電流値が同様の傾向で増減している. これは $M/z=17$ に対応する化学種が H_2O が QMS 内でイオン化される際に発生する OH であることを強く示唆しており, 今回確かに水蒸気を検出できていることを示す結果である. $M/z=2$ の電流値は上述の水蒸気とは

異なる傾向の変化

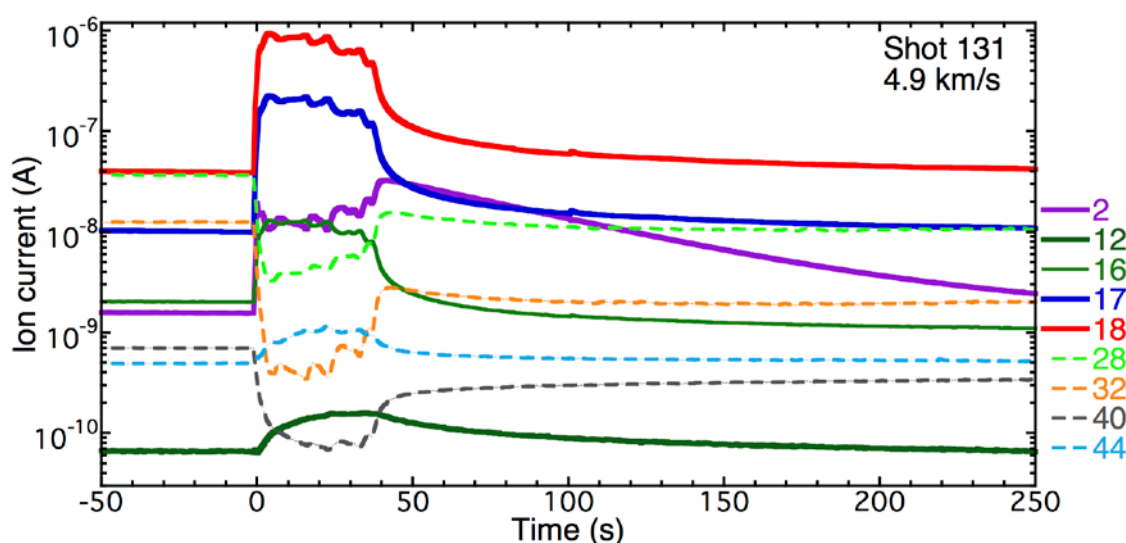


Figure 2. 四重極質量分析計で得たデータ. 衝突時刻が 0 (s)になるように横軸を平行移動している. 色の違いは質量数(M/z)に対応している.

を示している. これは二段式水素ガス銃由来の化学汚染成分の主要成分である水素の信号である. 実験手順の節で述べたように今回は Ar ガスを用いず, 真空条件で実験を行ったため, Shot 後に実験チャンバに水素が侵入してしまったようである. ただし M/z=18 と M/z=2 の電流値の比は 5-10 であり, 今回は銃由来の化学汚染の影響は小さいと考えられる.

空気由来と思われる M/z=28(N₂), M/z=32(O₂), M/z=40(Ar)に対応する電流値は衝突後に減少する挙動を示した. これはおそらく QMS 内で電離された後に各種イオン同士が干渉してしまった結果だと考えられる. このような条件では計測した電流値の定量性は信頼できない. そのため今回は発生した水蒸気量を定量的に計測することができなかった. この問題は以前と同様に Ar ガスの存在条件下で実験を行えば解決される見込みである.

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に氷の衝突蒸発をその場計測可能なシステムを構築した. 装置の試運転として純水氷標的を用いた実験を実施し, 衝突で発生した水蒸気を検出することに成功した. 今後は水蒸気発生量の定量化を可能にするための実験条件の最適化, 彗星模擬物質を標的に用いた化学分析実験などを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に感謝致します。

参考文献

- Gomes, R. et al. (2005), Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, **435**, 466-469, doi:10.1038/nature03676.
- Kawai, N. et al. (2010), Single microparticle launching method using two-stage light-gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris, *Rev. Sci. Instr.*, **81**, 115105.
- Kurosawa, K. et al. (2012), The nature of shock-induced calcite (CaCO₃) devolatilization in an open system investigated using a two-stage light gas gun, *Earth and Planet. Sci. Letters*, **337-338**, 68-76.
- Kurosawa, K. et al. (2015), Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *J. Geophys. Res.*, **120**, doi 10.1002/2014JE004730.
- Walsh, K. J. et al. (2011), A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration, *Nature*, **475**, 206-209, doi:10.1038/nature10201.