

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871212

研究課題名(和文)衝突生成超臨界水による初期太陽系有機物質の分解に関する実験的研究

研究課題名(英文)An experimental study on the decomposition of organic matters in the early solar system by impact-generated super critical water

研究代表者

黒澤 耕介(Kurosawa, Kosuke)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員

研究者番号：80616433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：開放系衝突実験で、水氷を含む標的の蒸発・化学過程を調べるための実験系を構築した。液体窒素で冷却可能なステージと、四重極質量分析計を接続可能な専用実験チャンバを新規製作し、千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された二段式水素ガス飛翔体加速装置の後段に設置した。研究の第一歩として水氷標的を用いた衝突実験を実施した。その結果、構築した実験系で十分なS/Nで生成した水蒸気を検出できることを確かめることができた。多少の実験手順の変更だけで、より複雑な標的(水氷-有機物-珪酸塩鉱物の混合物)を用いた衝突実験も可能になる見込みである。

研究成果の概要(英文)：We constructed a new experimental system to investigate the processes of shock vaporization and subsequent chemical reactions in an open system using targets including water ice. A new experimental chamber with a cooling stage down to 170 K and with a quadruple mass spectrometer was newly made. The chamber was set to the downrange of the two-stage light-gas gun placed at Planetary Exploration Research Center of Chiba Institute of Technology. As the first step of research development, we conducted hypervelocity impact experiments with pure-water-ice targets. We confirmed that impact-generated water vapor can be detected with a high signal-to-noise ratio. The developed experimental procedure is expected to be applied directly to a more complex target material, that is a mixture of water-organics-silicate minerals, with a minor modification.

研究分野：惑星科学

キーワード：高速度衝突 氷衛星 氷微惑星 二段式水素ガス銃 二段式軽ガス銃 衝突蒸発 化学反応 質量分析

1. 研究開始当初の背景

近年では Dawn, Rossetta, New Horizons, はやぶさ 2, OSIRIS-REx, JUICE など水や氷を含んでいる可能性のある天体の探査計画を世界各国が競って立案/実施している。氷天体であってもその表面には多数のクレータが存在していることが確かめられている。衝突条件に対してどのような大きさのクレータが形成されるか?といった衝突物理過程は比較的良好に理解されているが、化学過程についての情報は乏しかった。氷天体探査計画の理学成果を最大化するためには、氷天体表層における衝突誘起化学反応を理解しておくことが望ましいと思われた。

2. 研究の目的

水氷-有機物-珪酸塩鉱物の間で衝突誘起化学反応が起こった場合、特異な地質試料として天体表層に残ることが期待できる。はやぶさ 2 や OSIRIS-REx の回収試料からこのような衝突の痕跡を見出すことができれば、太陽系小天体が被った衝突史を紐解くことができると期待できる。また頻発した天体衝突で揮発性の高い CO や CH₄ と言った化学種が生成されると宇宙空間へ散逸してしまう可能性が高い。この場合、氷天体の元素組成が徐々に変化していくことが期待できる。このような過程は氷天体同士の衝突速度に強く依存することが予想される。今後の探査計画で氷衛星、彗星、外縁小惑星、トロヤ群天体の表面組成が計測されると、それぞれの天体への平均衝突速度が求まる可能性がある。これは太陽系天体の軌道進化への制約となる。水氷-有機物-珪酸塩鉱物の混合標的を用いて系統的な高速度衝突実験を実施し、生成物を計測し、氷天体衝突時に生成する化学種のテーブルを作ることが当初の目的であった。

3. 研究の方法

当初は宇宙科学研究所の二段式水素ガス飛翔体加速装置をメインに使用し、実験を推進していく予定であったが、代表研究者の異動に伴い 2013 年度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衝突実験室にて高速度衝突実験を実施した。高速度衝突に伴う蒸発とそれに続く化学反応を計測するためには、蒸発する固体標的に対して十分に大きい自由膨張空間の確保が必要である。加速装置の後段に氷標的を設置可能な冷却ステージを備えた専用実験チャンバを接続し、自由膨張空間を確保した。このチャンバに四重極質量分析計を接続し、衝突で生成した気体をその場で分析できる実験系を確立した。標的が経験する衝撃波加熱の程度を定量的に評価し、標的の蒸発量の理論推定を行うために、本実験系に合わせた数値衝突計算を実施した。

4. 研究成果

研究期間中に研究代表者が異動したことにより実験室の基本的な立ち上げから行う必要

があったため、現時点では研究目的で述べたような実験の実施には至っていないが、装置の製作と実験手順を確立することができた。

水氷を用いた予備実験の結果、高速度衝突で粉碎され雪状になった標的が真空チャンバ底面に落ちると、雪が昇華して衝突で発生した水蒸気と区別が付かないほどのノイズとなってしまうことが明らかとなった。これは生成ガスが四重極質量分析計に到達する時間に比べて、標的の粉碎、落下、昇華が起こる方が早いためだと考えられる。真空チャンバの底面を冷却し、真空条件でも水氷の昇華を防ぐ必要があることがわかった。そこで液体窒素によって冷却可能なステージを備えた専用の実験チャンバを新規設計・製作した。液体窒素の供給によって 170 K 程度までの冷却が可能であることを確かめた。

研究の第一歩として水氷の衝突蒸発挙動を詳細に調べるための実験を行った。これは将来的に化学分析を行っていくための実験手順を確立するのが目的である。水氷試料中に気泡などが含まれていると局所的に衝突エネルギーが集中してしまうことが知られている。気泡が入らないようにするため、冷凍庫内に熱源を設置して一軸方向の冷却を促すことで気泡を抜きながら氷を製作する手順を確立した。この作り方では製作した氷の力学特性は軸依存性を持ってしまいが、衝突点近傍では水氷の Hugoniot Elastic Limit(およそ 0.3 GPa)を上回る衝撃圧を経験するので、軸の違いによる影響は無視できると予測される。また成長軸方向の面だけでなく、試料を加工し成長軸に垂直な軸の面への対照実験を行うことで軸の違いが蒸発した水蒸気量に与える影響を評価することができると思われる。図 1 に本研究で用いる氷試料の写真を示す。

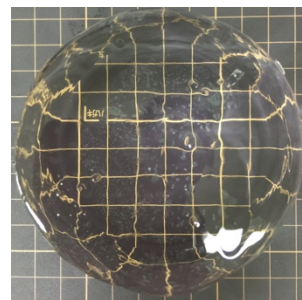


図 1. 水氷標的。

以下に実験手順を示す。飛翔体には直径 2 mm の酸化アルミニウム(Al₂O₃)球を用い、加速のためにナイロンスリットサボを用いた。衝突速度は 2.4-4.9 km/s である。水氷標的は煮沸して脱気した蒸留水を直径 5 cm、高さ 5 cm の円筒容器に移し、250 K に設定した冷凍庫内で凍らせることで製作した。標的の温度は庫内から取り出し、真空チャンバに設置する間におよそ 270 K 程度まで上昇することを確かめた。この状態で 170 K の冷却ステージに直置きすると、接触面の熱収縮によって標的内にクラックが生じてしまう。そこで冷却ステー

ジ上にプラスチックブロックを設置し、その上に標的を設置することでShot前に標的が割れてしまうことを防いだ。このブロックもShot前には250 Kまで冷却しておく。生成した水蒸気の検出のため四重極質量分析計(Pfeiffer vacuum製, Prisma plus QMG220)を用いた。構築した実験装置の概略図を図2に示す。

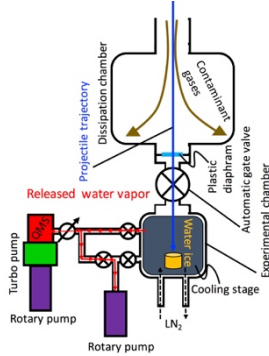


図2. 実験装置概略図. 生成気体の流れは赤矢印で示した。

二段式水素ガス飛翔体加速装置は熱力学的に標準状態にある任意の固体を1-9 km/sまで加速できる理想的な加速装置である。今回のように衝突蒸発成分を測る場合の唯一の弱点は弾丸加速に用いる火薬の燃焼ガス、水素ガスが化学汚染を引き起こしてしまうことであった。以前我々の研究グループでは化学汚染ガスの実験チャンバへの侵入を防ぎつつ、生成した気体を分析する技術を確認し、宇宙科学研究所の超高速実験施設に導入している[Kurosawa et al., 2012, *Earth and Planetary Science Letters*]. 千葉工業大学での実験でも同様の手法を用いて化学汚染ガスの実験チャンバへの侵入をなるべく防ぐようにした。宇宙科学研究所で実施した実験では定量精度と化学汚染ガスの侵入を極力抑えるため実験チャンバ内を不活性ガス(アルゴン)で陽圧にしていた。この場合、生成ガスが四重極質量分析計に到達するまでの装置の応答時間が長くなってしまい、衝突生成水蒸気が真空チャンバに吸着してしまう可能性があった。そこでアルゴンガスを使わずに実験を実施することにした。

図3に実験データの一例を示す。四重極質量分析計で得た、それぞれの質量数(M/Z)に対応するイオン電流値の時系列である。質量数とクラッキングパターンからそれぞれの化学種を同定した。水蒸気に対応するイオン電流は衝突後にノイズレベルのおよそ10倍まで上昇しており、我々の実験系で衝突発生した水蒸気を有意に検出できることが確かめられた。弾丸加速に用いた水素ガスも検出されたが、今回の実験条件において水蒸気のイオン電流と水素のその比はおおよそ5倍になっており、アルゴンガスで陽圧にしていなくても飛翔体加速ガスによる化学汚染の程度は計測を妨げるほどではないことがわかった。ただし、真空チャンバに残留している空気由来の

化学種($^{28}\text{N}_2$, $^{32}\text{O}_2$, ^{40}Ar)のイオン電流値は衝突直後に急減少するという挙動がみられた。これは衝突後の四重極質量分析計内の圧力が一定になっておらず、水蒸気の発生に伴って、装置内圧が急上昇し、装置内でイオン同士が干渉してしまっていることを示唆する結果である。この場合結果の定量可能性には疑問が残る。チャンバ内を不活性ガスである程度陽圧にし、分析計に流入する気体量を緩衝すれば解決する見込みである。

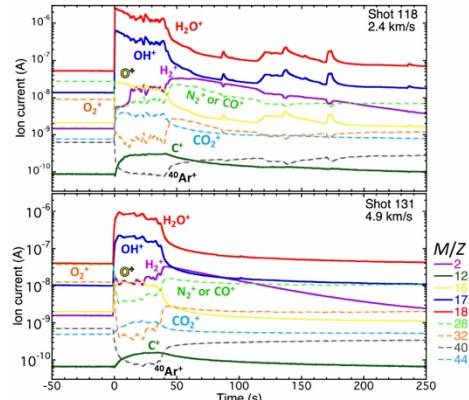


図3. 四重極質量分析計による計測例。

ここで確立した手法は質量分析計の計測質量数を変更することで、当初の目標であった無機ガス(H_2O , CO , CO_2 など)と軽い有機ガス(CH_4 , NH_3 , C_2H_2 など)などの定量分析にそのまま適用可能である。今後は標的に水氷-有機物-珪酸塩鉱物の混合物を用い、標的組成、衝突速度について系統的な実験を実施していく予定である。

高速衝突時に発生する蒸気量の実測値は氷物質に対する理論モデルの較正にも使用できる。この目的のため、実験系に合わせた理論モデルを構築した。標的内の衝撃圧分布をiSALE shock physics codeを用いて定量的に評価し、水氷の熱力学データをもとに、系が完全に熱平衡に達する場合の蒸発量を計算した。図4に衝突速度に対する水蒸気発生量の理論曲線を示す。今後実験で得られるデータと同じグラフにプロットすることで、従来の理論モデルの妥当性を検証できる。

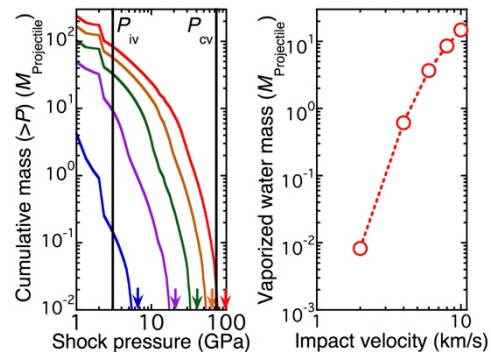


図4. 数値モデルによる水蒸気発生量の予測値。左図はある衝撃圧力を経験する累積質量。右図は衝突速度に対する水蒸気発生量。どちらも飛翔体質量で規格化してある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

1. Nagaki, K., T. Kadono, T. Sakaiya, T. Kondo, K. Kurosawa, Y. Hironaka, K. Shigemori, and M. Arakawa, Recovery of shocked samples from ~100 GPa to Hugoniot elastic limit, *Meteoritics and Planetary Science*, **51**, 1153-1162, 2016. (査読あり)
2. 杉田精司, 桑原秀治, 黒澤耕介, 超高速衝突実験が明らかにした衝突蒸発現象・化学反応過程, *日本惑星科学会誌遊星人*, **24**, No.3, 181-390, 2015. (査読あり)
3. Kurosawa, K., Impact-driven planetary desiccation: The origin of the dry Venus, *Earth and Planetary Science Letters*, **429**, 181-190, 2015. (査読あり)
4. Dauphas, N., F. Poitrasson, C. Burkhardt, H. Kobayashi, and K. Kurosawa, Planetary and meteoritic Mg/Si and $d^{30}\text{Si}$ variations inherited from nebula chemistry, *Earth and Planetary Science Letters*, **427**, 236-248, 2015. (査読あり)
5. Kurosawa, K., Y. Nagaoka, H. Senshu, K. Wada, S. Hasegawa, S. Sugita, and T. Matsui, Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *Journal of Geophysical Research: Planets*, **120**, doi 10.1002/2014JE004730, 2015. (査読あり)
6. Yanagisawa, M., K. Kurosawa, and S. Hasegawa, Ultra-high-speed photography and optical flash measurement of nylon sphere impact phenomena, *Procedia Engineering*, **103**, 657-662, 2015. (査読あり)
7. Okochi, K., T. Mieno, K. Kondo, S. Hasegawa, and K. Kurosawa, Possibility of Production of amino acids by impact reaction using a light gas gun as a simulation of asteroid impacts, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, DOI 10.10107/s11084-015-9419-4, 2015. (査読あり)
8. 黒澤耕介, 千秋博紀, 和田浩二, 三上峻, 平田成, 鎌田俊一, 石原吉明, 玄田英典, 中村昭子, 高田淑子, iSALE shock physics code による数値衝突計算, *日本惑星科学会誌遊星人*, **23**, 103-110, 2014. (査読あり)
9. Ohno, S., K. Ishibashi, T. Sekine, K. Kurosawa, T. Kobayashi, S. Sugita, and T. Matsui, Gas recovery experiments to determine the degree of shock-induced devolatilization of calcite, *Journal of Physics: Conference Series*, **500**, 062001, doi:10.1088/1742-6596/500/6/062001, 2014. (査読あり)

10. Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Watari, K. Otani, T. Matsui, and S. Sugita, Sudden ocean acidification by SO_3 -rich impact vapor at the end of Cretaceous, *Nature Geoscience*, **7**, 279-282, doi:10.1038/ngeo2095, 2014. (査読あり)

11. Kurosawa, K., S. Sugita, K. Ishibashi, S. Hasegawa, Y. Sekine, N. O. Ogawa, T. Kadono, S. Ohno, N. Ohkouchi, Y. Nagaoka, and T. Matsui, Hydrogen cyanide production due to mid-size impacts in a redox-neutral N_2 -rich atmosphere, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **43**, 221-245, DOI 10.1007/s11084-013-9339-0, 2013. (査読あり)

〔学会発表〕(計 18 件)

1. Kurosawa, K., Impact-driven water removal on steam-covered Venus-like planets, *47th Lunar and Planetary Science Conference XXXXVII*, #1839, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21~25日.
2. Kurosawa, K., T. Okamoto, H. Yabuta, G. Komatsu, and T. Matsui, Shock vaporization of water ice in an open system investigated using a two-stage light-gas gun, *47th Lunar and Planetary Science Conference XXXXVII*, #1838, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21~25日.
3. H. Senshu, K. Kurosawa, Okamoto, T., and T. Matsui, Laboratory simulation of shooting stars by using a two-stage light-gas gun, *47th Lunar and Planetary Science Conference XXXXVII*, #2142, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21~25日.
4. Okamoto, T., K. Kurosawa, H. Genda, and T. Matsui, Ultra-high-speed imaging of the impact ejecta: Comparison with a SPH simulations, *47th Lunar and Planetary Science Conference XXXXVII*, #2515, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21~25日.
5. Kurokawa, H., K. Kurosawa, and T. Usui, A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopes, *47th Lunar and Planetary Science Conference XXXXVII*, #1220, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2016年3月21~25日.
6. Kurosawa, K., An atmospheric response against from impact bombardments on Earth and Venus: The role of impact ejecta, The 4th ELSI International Symposium, 東京工業大学地球生命研究所(東京都目黒区), 2016

- 年 1 月 12~15 日。(招待講演)
7. **Kurosawa, K.**, H. Senshu, T. Kasuga, S. Sugita, and T. Matsui, In-situ imaging and spectroscopic observations of artificial shooting stars, *46th Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, #2766, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2015 年 3 月 16~20 日.
 8. **Kurosawa, K.**, H. Senshu, K. Wada, and TDSS team, Numerical simulations of impacts of a half spherical shell projectile on small asteroids, *46th Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, #1868, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2015 年 3 月 16~20 日.
 9. **Kurosawa, K.**, H. Senshu, T. Kasuga, S. Sugita, and T. Matsui, In-situ imaging and spectroscopic observations of artificial shooting stars, *46th Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, #2766, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2015 年 3 月 16~20 日.
 10. **Kurosawa, K.**, H. Senshu, K. Wada, and TDSS team, Numerical simulations of impacts of a half spherical shell projectile on small asteroids, *46th Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, #1868, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2015 年 3 月 16~20 日.
 11. **黒澤耕介**, 杉田精司, 衝突有機岩石プラズマの可視分光診断: 惑星初期進化への応用, 太陽圏シンポジウム, 名古屋大学太陽地球環境研究所(愛知県名古屋市), 2015年3月4日.(招待講演)
 12. **黒澤耕介**, 月探査から探る隕石重爆撃, 月科学研究会, 神戸大学惑星科学研究センター(兵庫県神戸市), 2014年10月27日.(招待講演)
 13. **Kurosawa, K.**, The thermodynamic response of silicate minerals after meteoritic impacts: Implications for the evolution of planetary atmospheres, The 10th international conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, Bordeaux, France, May 12-16, 2014.(招待講演)
 14. **Kurosawa, K.**, and H. Kuwahara, Abiotic O₂ production from CI-like impactors during the late heavy bombardment period, *45th Lunar and Planetary Science Conference XXXI*, #1920, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2014 年 3 月 17~21 日.
 15. **Kurosawa, K.**, Y. Nagaoka, S. Hasegawa, S. Sugita, and T. Matsui, Ultrafast imaging observations of the impact jetting during oblique impacts, *45th Lunar and Planetary Science Conference XXXI*, #1856, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2014 年 3 月 17~21 日.
 16. Ishibashi, K., S. Kameda, **K. Kurosawa**, M. Kobayashi, T. Arai, S. Ohno, K. Wada, H. Senshu, N. Namiki, and T. Matsui, Deuterium/Hydrogen ratio measurements with laser-induced breakdown spectroscopy(LIBS), *45th Lunar and Planetary Science Conference XXXV*, #2080, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2014 年 3 月 17~21 日.
 17. Ishimaru, R., Y. Sakamoto, M. Kobayashi, S. Fujita, T. Gonai, H. Senshu, K. Wada, M., Yamada, **K. Kurosawa**, S. Hosokawa, K. Yoshida, M. Sato, Y. Takahashi, and T. Matsui, Cubesat mission for UV-visible observations of meteors from space: S-CUBE (S3: Shootingstar Sensing Satellite), *45th Lunar and Planetary Science Conference XXXI*, #1846, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2014 年 3 月 17~21 日.
 18. Ohno, S., K. Ishibashi, T. Sekine, **K. Kurosawa**, T. Kobayashi, S. Sugita, and T. Matsui, An experimental study of shock-induced devolatilization of calcite: Dependence on the ambient pressure, *45th Lunar and Planetary Science Conference XXXI*, #2140, Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, USA, 2014 年 3 月 17~21 日.
- 〔図書〕(計 0 件)
〔産業財産権〕
○出願状況(計 0 件)
名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:
- 取得状況(計 0 件)
名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:
- 〔その他〕
該当なし
6. 研究組織
(1)研究代表者
黒澤 耕介 (KUROSAWA, Kosuke)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・
研究員
研究者番号: 80616433