

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：平成23年度～平成24年度

課題番号：23840057

研究課題名（和文）2段階式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析技術の開発

研究課題名（英文）Gas-phase chemical analysis in an open system using a 2-stage light gas gun

研究代表者

黒澤 耕介（Kurosawa, Kosuke）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：80616433

研究成果の概要（和文）：天体衝突で発生する蒸気量を決定する物理量を決定するために2段階式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析手法を開発した。提案手法を炭酸塩岩に適用し、幅広い衝撃圧力で発生脱ガス量を計測した。実験結果と広く用いられる Entropy method による発生蒸気量の推定値を比較したところ、良い一致を示した。これは発生蒸気量が衝撃圧縮に伴うエントロピー増加量によって支配されるということを示す初めての実験的根拠である。

研究成果の概要（英文）：We construct an experimental technique of gas-phase chemical analysis in an open system for 2-stage light gas guns to investigate a key parameter, which controls the amount of impact-generated vapor. The amount of impact-generated CO₂ from natural calcite blocks was measured under a wide range of peak shock pressure using the proposed method. The obtained CO₂ amount as a function of shock pressure is in a good agreement with a theoretical prediction by the entropy method. This result provides the first experimental evidence of the validity of the widely-used entropy method to estimate the amount of impact-generated vapor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
23年度	1,300,000	390,000	1,690,000
24年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計			3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体惑星物理学

キーワード：原始地球表層進化，天体衝突，隕石重爆撃，衝突蒸発，2段階式軽ガス銃，発光分光，質量分析

1. 研究開始当初の背景

天体衝突は莫大な質量とエネルギーを供給し激しい気相反応を駆動し、地球表層へ多大な影響を与えると、その重要性は古くから指摘されてきた。ところが実際に天体衝突が起きた際に何が起こるのか、発生する蒸気量を定める物理量さえ明らかではなかった。

これは実験的困難のため衝突蒸発過程の実証的研究が進んでいなかったことが原因であった。

2. 研究の目的

2段階式軽ガス銃は、比較的安価に>10 mgの巨視的な弾丸を>7km/sまで加速することができる。地球への天体衝突速度(>11.2

km/s)を達成させることはできないものの、水氷、堆積岩など多くの地球惑星科学的に興味ある物体が、衝突によって蒸発を開始する衝撃圧力を達成することが可能である。従って衝突蒸発素過程を調べるには最適の装置であるといえる。しかし、ガンデブリ、加速に用いる水素ガス、火薬燃焼ガスが試料室に侵入してしまい、その化学汚染により気相分析を行うことは極めて困難であった。そこで試料を金属製のコンテナに封入した上で衝突実験を行い、発生気体を分析するという実験が広く行われてきた。しかしこの方法には大きく分けて2つの深刻な問題点が指摘されている。第一に天然衝突とは異なり、生成気体が狭いコンテナに充満することである。天体衝突時の自由膨張を再現するためには大雑把に蒸発体積の1000倍の空間が必要だが(気体の比体積は固体のそれの1000倍)、従来のコンテナを用いた実験では不可能である。第二に反射衝撃波の問題である。コンテナに試料を封入した場合にはコンテナ内壁で衝撃波が反射し、試料を再び圧縮する。このような多段圧縮と、天然衝突時のような一回での衝撃圧縮を比較すると、上昇する温度が大幅に異なることが知られている。この温度の違いは結果に大きく影響を与える、このような問題点からコンテナを用いた衝撃蒸発実験結果は天然の衝突に結びつけることは難しく、天体衝突によって発生する気体の量がどの物理量に支配されるかも明らかではなかった。本研究では開放系で実験を行う際の最大の問題点であった化学汚染ガスの影響を極力抑え、2段式軽ガス銃を用いた衝突蒸発素過程を調べるための技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

実験は宇宙科学研究所に設置された新型2段式軽ガス銃(以下 ISAS 銃)を用いて行った。本研究では(1)加速ガス拡散用巨大ガス溜め(~2000 L)、(2)気相化学分析専用小容量実験チャンバー(~40 L)、(3)極薄プラスチックフィルム(~12 μm 厚)、(4)自動ゲートバルブを用いて化学汚染ガスを極力抑える手法を開発した。ISAS 銃の装置構成では弾丸発射後に化学汚染ガスが装置全体に拡散すると~700 Paになる。衝突が起こる実験チャンバー(~40 L)をそれより高圧に保っておけば、化学汚染ガスはチャンバー内に侵入できず、生成ガスを分析可能であるはずである。

以下に具体的な実験手順を示す。まず実験チャンバー内に標的を、入口にプラスチックフィルムを設置し、真空中に引く。続いて不活性ガスの Ar を導入する。今回は衝突生成ガスが効率よく QMS に導入される様に Flow 系を採用した。Ar の流入と排気が釣り合うチャンバー内平衡圧力を 2700 Pa とした。この状態で QMS に気体を導入し(QMS 内圧力、2 x

10^{-3} Pa)計測を開始する。安全な場所に退避し、弾丸を発射する。弾丸加速ガスは実験チャンバー前面に配置された巨大ガス溜めで大部分拡散する。弾丸はプラスチックフィルムを貫通して、実験チャンバー内に侵入し、標的に衝突するが、弾丸加速ガスはチャンバー内の Ar ガスに遮られ、実験チャンバー内には侵入できない。そのままではプラスチックフィルムに開いた弾丸の貫通痕から衝突生成ガスも逃げてしまうが、弾丸発射時の電気信号で動作する自動ゲートバルブで再び気密性を回復させる。このようにすると化学汚染を防ぎつつ生成気体のみを分析することが可能である。またチャンバー内に一定量存在する Ar ガスとの量比を測ることで、生成気体の絶対量を測定することもできる。弾丸にはプラスチックフィルム貫通の際に壊れることのない Al_2O_3 を用いた。衝突速度は 1.9–6.7 km/s (衝撃圧力、20-110 GPa)の範囲で変化させた。図1に本研究で用いた実験装置の概要を示す。

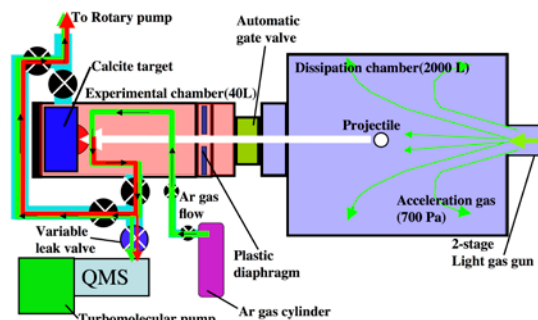


図1. 本研究で確立させた実験手法の概念図

4. 研究成果

Shot 前後で H_2 (弾丸加速ガスの主成分(>99%))に対応する M/Z (平均分子量/電荷)=2の電流値が変化するか調べたところ、1 shotを除いて、変動が見られなかった。これは狙い通り、実験チャンバーへの化学汚染ガス成分の侵入を抑えることができたことを意味する。電流値が増加した1 Shotも Back ground成分に対して~10%程度の増加であった。図2に Ar と CO_2 に対する電流値の時間変化を示す。チャンバー内気体の主成分である Ar に対応する $M/Z=36, 40$ は Shot 前後でほとんど変動しなかった。これは気体生成絶対量の高精度計測が可能であることを意味する。対称的に CO_2 に対応する $M/Z=44$ は衝突後、大幅に上昇し10秒ほどかかってピーク値に達し、~80秒でピーク値の~10%程度まで減少した。最初の立ち上がりは衝突で気体が発生してから QMS に導入されるまでの時間を、その後の減少はチャンバー内の気体が常に排気されていることに起因する。衝突速度が異なるデータに対する $M/Z=44$ の電流値の時間変化曲線をピーク値で規格化して重ねると、

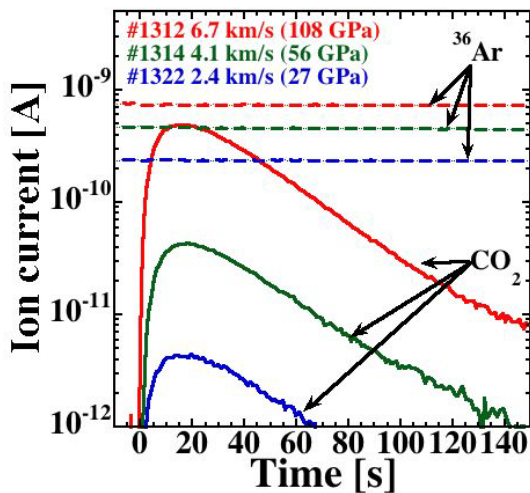


図2. Ar と CO₂ に対応する質量数の電流値の時間進化

大部分のデータはよく一致した。これは電流値の時間進化を決めているのは Ar の連続的供給&排気の気体の流れであって、CO₂ 量ではないことを意味する。減衰曲線を時間に関する指数関数で fitting して外挿し、衝突時刻の M/Z=44 と 36 の比を出すことで、CO₂ の生成絶対量を決定した。1-D インピーダンスマッチング法から求めた衝撃圧力と CO₂ 生成量の関係のみたところ、先行実験研究で言われている脱ガス開始圧力(20GPa, [e.g., 9])で CO₂ を検出することができていること、先行理論研究で言われている衝撃圧力(50 GPa, [e.g., 5])で脱ガス量の傾向が変化すること、衝撃圧力に対して脱ガス量は線形的に増加することがわかった。

議論-衝撃生成蒸気量 vs エントロピー-

今回世界的にも初めて幅広い衝撃圧力に対する CO₂ 生成量を開放系で計測することができた。その結果をもとに衝突蒸発/脱ガス量の推定のために頻りに用いられている Entropy method[e.g., 12-14]の妥当性の検証を行った。今回の衝突速度に対応する衝突後のエントロピーを計算し、チャンバー内雰囲気圧まで断熱解放したときの蒸発率を計算した。一つ複雑なのは、今回の実験では脱ガスは衝突点の近傍(いわゆる等圧コア領域)だけではなく、衝撃圧力が脱ガス開始圧力を超えた領域全体から起こっていると考えられることである。今回は自己相似的圧力伝播を仮定し、衝撃圧力の減衰を考慮して脱ガス量を計算した。図3に実験による計測値と理論推定値の比較を示す。モデル計算は熱平衡理論から予想される脱ガス開始圧力(~50 GPa)より高い衝撃圧力で、実験結果をよく再現した。それ以下の圧力では多くの先行実験研究と同様に脱ガスは検出されるもののその効率は非常に低かった。これは Shear band のよう

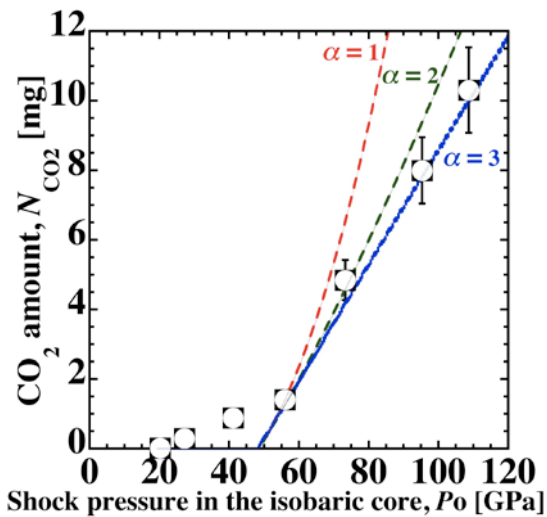


図3. 実験結果と理論モデルの比較

な局所加熱によって引き起こされていると考えられるが、脱ガス効率が低いので、全脱ガス量に対する寄与は小さい。今回の実験と理論の一致は脱ガス量を決定づける物理量は一部でよく用いられるような衝撃圧力ではなくエントロピーであることを意味し、広く使われている Entropy method の信頼性を世界で初めて実験的に実証したことになる。従って今後は Hugoniot 曲線上のエントロピーさえ求めれば、発生蒸気量を決定することが可能となるであろう。この結果は氷天体まで含めた太陽系全域で起こる天体衝突現象全般に適用できる。衝突による蒸発の有無、起こった場合の発生蒸気量の推定に根拠を与えるものであり、波及効果は極めて大きいと考えている。

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 10 件)

1. Okamoto, T., A. M. Nakamura, S. Hasegawa, K. Kurosawa, K. Ikezaki, A. Tsuchiyama, Impact experiments on capture of exotic grains by highly porous primitive bodies, *Icarus*, **224**, 209-217, doi.org/10.1016/j.icarus.2013.02.023, 2013.
2. Suzuki, A. S. Hakura, T. Hamura, M. Hattori, R. Hayama, T. Ikeda, H. Kusuno, H. Kuwahara, Y. Muto, K. Nagaki, R. Niimi, Y. Ogata, T. Okamoto, T. Sasamori, C. Sekigawa, T. Yoshihara, S. Hasegawa, K. Kurosawa, T. Kadono, A. M. Nakamura, S. Sugita, and M. Arakawa, Laboratory experiments on crater scaling-law for sedimentary rocks in the strength regime,

Journal of Geophysical Research Planets, **117**, E08012, doi:10.1029/2012JE004064, 2012.

3. **Kurosawa, K.**, S. Ohno, S. Sugita, T. Mieno, T. Matsui, and S. Hasegawa, The nature of shock-induced calcite (CaCO₃) devolatilization in an open system investigated using a two-stage light gas gun, *Earth and Planetary Science Letters*, **337-338**, 68-76, 2012.
 4. **Kurosawa, K.**, T. Kadono, S. Sugita, K. Shigemori, T. Sakaiya, Y. Hironaka, N. Ozaki, A. Shiroshita, Y. Cho, S. Tachibana, T. Vinci, S. Ohno, R. Kodama, and T. Matsui, Shock-induced silicate vaporization: The role of electrons, *Journal of Geophysical Research Planets*, **117**, E04007, doi:10.1029/2011JE004031, 2012.
 5. **Kurosawa, K.**, T. Kadono, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Sakaiya, N. Ozaki, A. Shiroshita, S. Ohno, Y. Cho, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Fujioka, S. Tachibana, T. Vinci, R. Kodama, and T. Matsui, Time-resolved spectroscopic observations of shock-induced silicate ionization, *Shock Compression of Condensed Matter – 2011*, AIP Conf. Proc. 1426, 855-858, doi: 10.1063/1.3686412, 2012.
 6. Sugita, S., **K. Kurosawa**, and T. Kadono, A semi-analytical on-Hugoniot EOS of condensed matter using a linear *Up-U_s* relation, *Shock Compression of Condensed Matter – 2011*, AIP Conf. Proc. 1426, 895-898, doi: 10.1063/1.3686412, 2012.
 7. Kadono, T., K. Shigemori, T. Sakaiya, Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, T. Watari, T. Fujiwara, T. Mochiyama, H. Nagatomo, S. Fujioka, A. M. Nakamura, M. Arakawa, S. Sugita, **K. Kurosawa**, S. Ohno, and T. Matsui, Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments at velocities higher than 10 km/s, *Shock Compression of Condensed Matter – 2011*, AIP Conf. Proc. 1426, 847-850, doi: 10.1063/1.3686412, 2012.
 8. Ohno, S., T. Kadono, **K. Kurosawa**, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Watari, K. Ohtani, and T. Matsui, Direct measurement of chemical composition of SO_x in impact vapor using a laser gun, *Shock Compression of Condensed Matter – 2011*, AIP Conf. Proc. 1426, 851-854, doi: 10.1063/1.3686412, 2012.
 9. Heldmann, J. L. et al., LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) Observation Campaign: Strategies, Implementation, and Lessons Learned, *Space Science Review*, doi:10.1007/s11214-011-9759-y, 2011.
 10. Hong, P. K., S. Sugita, N. Okamura, Y. Sekine, H. Terada, N. Takatoh, Y. Hayano, T. Fuse, T.-S. Pyo, H. Kawakita, D. H. Wooden, E. F. Young, P. G. Lucey, **K. Kurosawa**, H. Genda, J. Haruyama, R. Furusho, T. Kadono, R. Nakamura, Kamata, T. Hamura, T. Sekiguchi, M. Soma, H. Noda, J. Watanabe, A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope, *Icarus*, **214**, 21-29, 2011.
- [学会発表] (計 件)
1. **Kurosawa, K.**, T. Kadono, Y. Hironaka, K. Hamano, K. Shigemori, T. Sakaiya, T. Sano, S. Ohno, T. Sekine, N. Ozaki, R. Kodama, S. Tachibana, T. Matsui, and S. Sugita, Entropy gain for shock-heated forsterite: Implications for atmospheric blow-off on the early Earth and Venus, *44th Lunar and Planetary Science Conference XXXXI*, #2547, Lunar and Planetary Institute, 2013.
 2. **Kurosawa, K.**, S. Ohno, S. Sugita, T. Mieno, and S. Hasegawa, Shock-induced decarbonation in an open system using a 2-stage light gas gun, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #1730, Lunar and Planetary Institute, 2012.
 3. **K. Kurosawa**, Time-resolved spectroscopic observations of shock-induced silicate ionization and electron recombination, *12th Workshop on Fine Particle Plasmas*, National Institute for Fusion Science, Toki, Japan November 26-27, 2011.
 4. Ishimaru, R., Y. Sakamoto, M. Kobayashi, N. Namiki, H. Senshu, K. Wada, S. Ohno, K. Ishibashi, M. Yamada, T. Arai, T. Matsui, S. Hosokawa, Y. Tanabe, H. Yagisawa, S. Abe, K. Kurosawa, S. Nakasuka, H. Akiyama, K. Yoshida, M. Sato, Y. Takahashi, Shootingstar Sensing Satellite (S³: S-cube): Cubesat project for observation of meteors from low Earth orbit, *44th Lunar and Planetary Science Conference XXXXI*, #1944, Lunar and Planetary Institute, 2013.

5. Ohno, S., T. Sakaiya, T. Kadono, K. Kurosawa, H. Yabuta, K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Kuwahara, S. Sugita, T. Kondo, T. Yamanaka, and T. Matsui, Direct gas analysis experiment of impact-vaporized carbonaceous chondrite, *44th Lunar and Planetary Science Conference XXXXI*, #2547, Lunar and Planetary Institute, 2013.
6. Okamoto, T., A. M. Nakamura, S. Hasegawa, K. Kurosawa, K. Ikezaki, and A. Tsuchiyama, Penetration depth of dust grains into highly porous primitive bodies, *44th Lunar and Planetary Science Conference XXXXI*, #1824, Lunar and Planetary Institute, 2013.
7. Sugita, S., **K. Kurosawa**, T. Kadono, and T. Sano, A semi-analytical EOS for shock-compressed geologic materials, *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, #6309, Lunar and Planetary Institute, 2012.
8. Yanagisawa, M., **K. Kurosawa**, and S. Hasegawa, Characteristic impact flashes by icy meteoroids inferred from laboratory experiments, *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, #6289, Lunar and Planetary Institute, 2012.
9. Takagi, Y., S. Hasegawa, and **K. Kurosawa**, Cratering experiments on basalt targets, *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, #6269, Lunar and Planetary Institute, 2012.
10. Okamoto, T., A. M. Nakamura, S. Hasegawa, **K. Kurosawa**, K. Ikezaki, and A. Tsuchiyama, Laboratory penetration experiments on exotic origin of dusts in primitive bodies, *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, #6065, Lunar and Planetary Institute, 2012.
11. Takagi, Y., S. Hasegawa, and **K. Kurosawa**, Cratering experiments on basalt targets, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #2002, Lunar and Planetary Institute, 2012.
12. Ohno, S., T. Kadono, **K. Kurosawa**, T. Sakaiya, H. Yabuta, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Hamura, S. Sugita, T. Arai, and T. Matsui, Impact-induced sulfur release from a carbonaceous chondritic impactor: Implication to the K/Pg Event, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #1894, Lunar and Planetary Institute, 2012.
13. Sugita, S., **K. Kurosawa**, T. Kadono, and T. Sano, An high-precision semi-analytical on-Hugoniot EOS for geologic materials, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #2053, Lunar and Planetary Institute, 2012.
14. Okamoto, T., A. M. Nakamura, S. Hasegawa, **K. Kurosawa**, K. Ikezaki, and A. Tsuchiyama, Capture of hypervelocity dusts by highly porous small bodies, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #1782, Lunar and Planetary Institute, 2012.
15. Hamura, T., **K. Kurosawa**, S. Hasegawa, and S. Sugita, A ground-hugging downrange vapor cloud due to oblique impacts, *43rd Lunar and Planetary Science Conference XXXXII*, #1888, Lunar and Planetary Institute, 2012.

[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]

ホームページ等

6. 研究組織
 (1) 研究代表者

黒澤 耕介 (KUROSAWA, KOSUKE)
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号： 80616433

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし