

2 段式軽ガス銃を用いた炭酸塩岩の開放系衝突脱ガス実験

○黒澤 耕介¹, 大野 宗祐², 杉田 精司³, 三重野 哲⁴, 松井孝典², 長谷川 直¹

1.ISAS/JAXA, 2. PERC/Chitech, 3. 東大 新領域, 4. 静岡大 理

要旨

衝突蒸発/脱ガス量を支配する物理量を決定するために、軽ガス銃の加速ガスによる化学汚染を防ぐ実験手法を開発し、炭酸塩岩を用いて開放系衝突脱ガス実験を行った。大規模な脱ガスは熱力学平衡理論から予測される圧力以上で開始し、脱ガス開始圧力以上の衝撃圧力での脱ガス量は“Entropy method”と呼ばれる理論の推定値とよく一致した。今回の結果は脱ガス量を決定づける物理量はエントロピーであり、実験室スケールであっても断熱的な圧力開放、熱力学平衡が成立していることを強く示唆する。本研究で開発された手法は衝突蒸気雲の組成分析にも適用可能である。

はじめに

惑星形成の最終期において高速度衝突はありふれた現象である。衝突速度が増加すると、衝突によって発生した衝撃波の伝播によって、天体内部に含まれている揮発性成分が放出されたり(脱ガス)、岩石そのものが蒸発したりする[1]。このような衝突蒸発/脱ガス過程は、(1)原始大気、海洋、生命の起源[e.g., 2-4], (2)表層環境大変動[e.g., 5, 6]などに重要な役割を果たして来たと考えられている。また氷衛星上のクレーター周辺に残された化学的痕跡は衝突蒸発で誘起された化学反応生成物由来かもしれないとする研究もある[e.g., 7]。この場合、惑星探査による化学分析情報から過去の天体衝突の条件、すなわち太陽系の力学進化に対しての情報を得ることができる可能性がある。

このような重要性にも関わらず、個々の天体衝突で生じる最終生成物の組成はおろか、どのくらいの蒸気が発生するのかさえ理解されていない。例えば本研究で扱う炭酸塩は多くの先行研究がなされてきたが、脱ガス開始圧力の推定値に大きなばらつきがある[e.g., 8, 9]。実験研究では実験手法に問題があり、理論研究では使用されている状態方程式に大きな不定性がある。実験手法の問題点として代表的なものとして、コンテナを用いた閉鎖系回収実験では脱ガスした気体が膨張するための自由空間が確保できず、逆反応が起きてしまうこと、反射衝撃波が発生し、天然衝突との対応関係が不明瞭であることが挙げられる[e.g., 10]。静電加速器やレーザー銃と四重極質量分析器(QMS)を組み合わせた開放系衝突脱ガス実験手法も存在するが[9, 11], 幅広く衝突速度を振ることができず、脱ガスを支配する物理量を決定するには不十分であった。これらの問題は2 段式軽ガス銃を用いて開放系脱ガス実験を行うことができれば解決でき

る。本研究では弾丸加速のための化学汚染ガスを極力抑える開放系気相化学手法を開発し、炭酸塩岩に適用した。

2 段式軽ガス銃による開放系衝突実験

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。これまで二段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析は弾丸加速ガスによる化学汚染のために報告されていない。本研究では(1)加速ガス拡散用巨大ガス溜め(~2000 L), (2)極薄プラスチックフィルム(~12 μm 厚), (3)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ェンバー(~40 L)をそれより高压に保っておけば、化学汚染ガスはチェ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。図 1 に実験装置の概略図を示す。

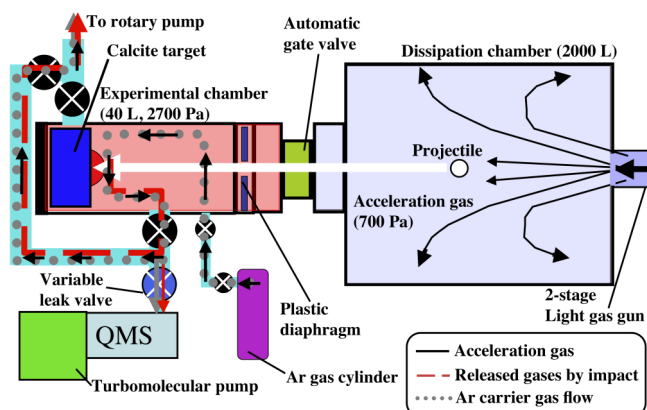


図 1. 実験装置概略図

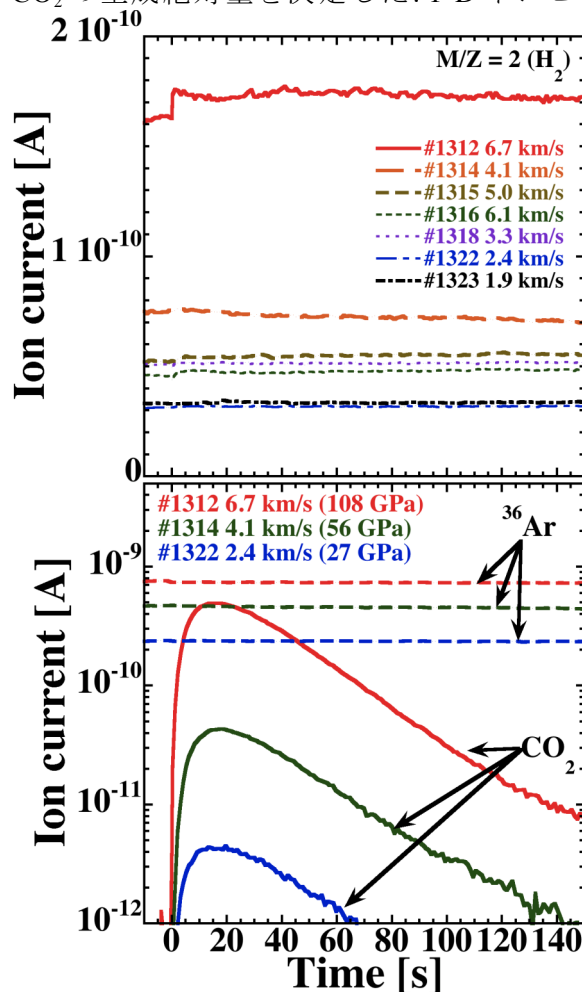
以下に具体的な実験手順を示す。まず実験チェンバー内に標的を、入口にプラスチックフィルムを設置し、真空中に引く。続いて不活性ガスの Ar を導入する。今回は衝突生成ガス

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ェ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, 2×10^{-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ェ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、実験チェンバー内に侵入し、標的に衝突するが、弾丸加速ガスはチェンバー内の Ar ガスに遮られ、実験チェ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。またチェ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。

実験結果、衝突速度 vs CO_2 生成量

図 2 に QMS による計測結果を示す。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、実験チェ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。チェ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。対照的に CO_2 に対応する $M/Z=44$ は衝突後、大幅に上昇し 10 秒ほどかけてピーク値に達し、~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 に導入されるまでに有限の時間がかかること、その後の減少はチェンバー内の気体が常に排気されていることに起因する。図 3 に示すように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、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、

CO_2 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、 CO_2 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

図 2. QMS 計測例. 各種気体の電流値の時間変化. (上)銃由来の化学汚染成分(H_2). (下) Ar と CO_2

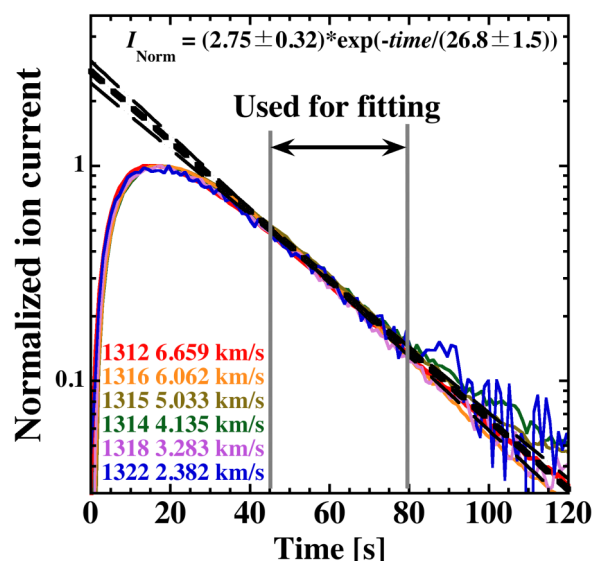


図 3. ピーク値で規格化した CO_2 の電流値変化.

法から求めた衝撃圧力と CO_2 生成量の関係 (図 4) をみたところ, 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 CO_2 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。

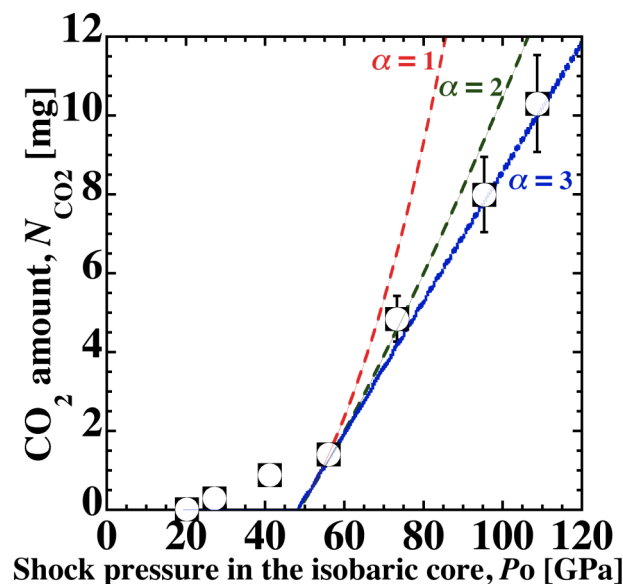
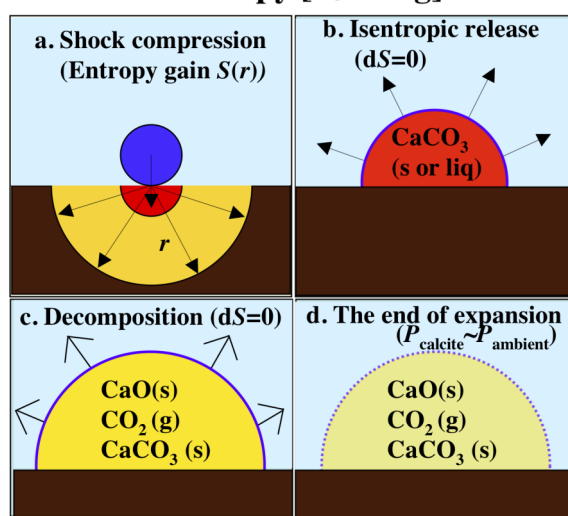
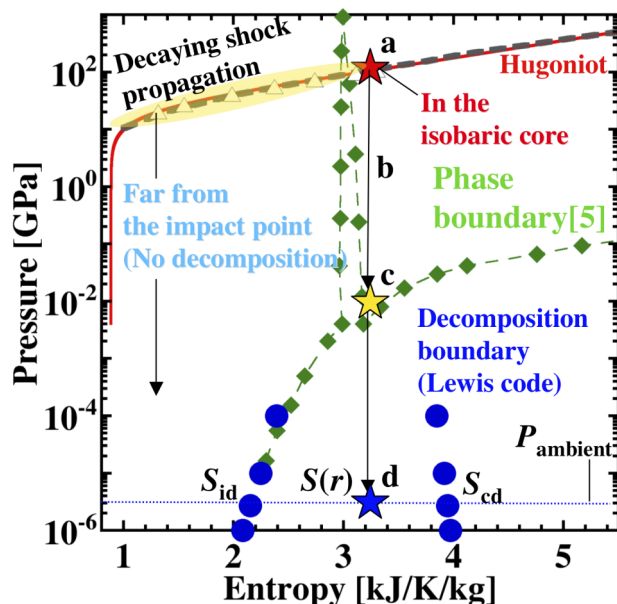


図 4. 衝撃圧力に対する CO_2 の生成量. 弾丸質量は 65 mg. Entropy method による理論推定値は 3 本の点線で示した. 色の違いは圧力減衰指数の違いを表している。

議論 -脱ガス量の衝撃圧力依存性-

以下では 50GPa 付近における脱ガス量の衝撃圧力依存性の変化について考察する. 先行研究による炭酸塩結晶の衝撃圧縮温度計測によれば, ~40 GPa の衝撃圧縮条件では熱力学平衡理論から予測される温度より ~2000 K も高温になることがわかっている[15]. 一方でさらに高い衝撃圧縮を加えると理論とよく一致する[16]. ~40 GPa における異常な高温は Shear band の発生による局所的なエネルギー集中が起こっていると解釈されている[15]. すなわち <50 GPa で検出された CO_2 は, エネルギーの局在化によって炭酸塩が分解されて生じたものと考えられる. 水氷を用いた低速条件での開放系脱ガス実験でも, エネルギー局在化によって衝突蒸発が起こることが報告されている[10]. ~50 GPa における脱ガス効率の大幅な上昇は ~50GPa を境にして標的全体にエネルギーが行き渡り, 大規模な衝突脱ガスが起こることを示唆している. すなわち, 炭酸塩岩の”実効的脱ガス開始圧力”は先行理論研究



で

図 5. (上) エントロピー - 圧力平面上での衝撃圧縮炭酸塩の熱力学挙動. (下) 衝撃圧縮から分解完了までの模式図

予測された値に近いと言える。

議論 -Entropy method の妥当性-

今回世界的にも初めて幅広い衝撃圧力に対する CO_2 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繁に用いられている Entropy method[e.g., 12-14]の妥当性の検証を行った. 図 5 にエントロピー - 圧力平面上に衝撃圧縮から断熱解放までの炭酸塩の熱力学挙動と対応する模式図を示す. 衝撃圧縮を受けた炭酸塩は周辺大気圧に比べて非常に高温高压であるため, 断熱的に膨張する. 断熱解放過程は図 5 の上ではエントロピー軸への垂線で表される. 断熱解放中の炭酸塩は相境界 (~100 気圧) に差し掛かったところで分解を開始する. 炭酸塩の分解率はその圧力における

分解開始/完全分解エントロピーがわかっているならば「レバールール」を使って計算することができる。図 6 に衝撃圧力に対する断熱解放後の炭酸塩の分解率を示す。

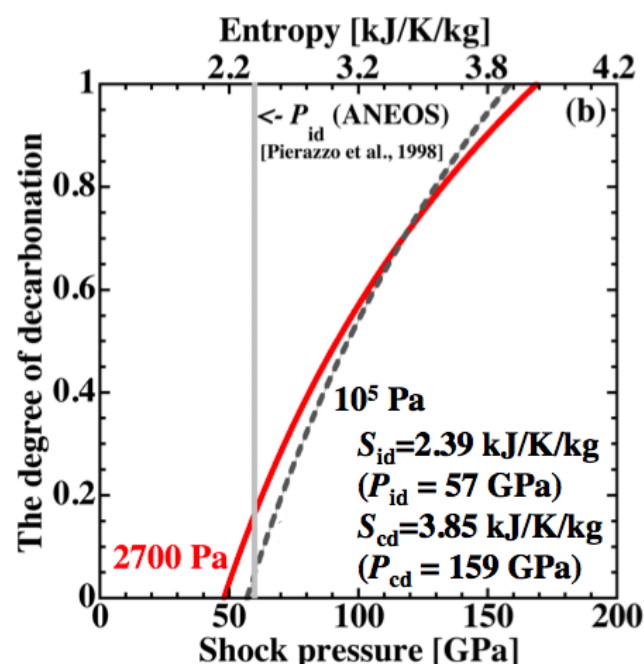


図 6. 断熱解放後の炭酸塩の分解率. 断熱解放後の圧力を図中に示した。

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越えた領域全体から起っていると考えられる。そこで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を計算した[e.g., 15]。モデルのフリーパラメータは等圧コアサイズと圧力減衰指数である。等圧コアサイズは弾丸半径と等しいと仮定し、圧力減衰指数を変化させた計算結果が図 4 中の点線である。圧力減衰指数を 2-3 においた場合の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。この圧力減衰指数の値は、高速度衝突時の 3 次元的衝撃波伝播過程において妥当な値である[14]。実験結果と理論予測値のよい一致は脱ガスを決定づける物理量は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、開放系脱ガス実験では等エントロピー過程 & 熱化学平衡が成立していることを強く示唆する。すなわち高速度衝突で生成する蒸気量は、幅広い密度-圧力-温度範囲にわたる詳細な状態方程式を知らなくても

推定できる可能性が高い。

本稿では議論していないが、我々が開発した実験手法は、原理的には生成気体の化学組成計測も可能である。今後は様々な固体標的を用いて実験を行い、「衝突化学研究」を進めていく予定である。

参考文献

- [1] Ahrens et al., *Origin and evolution of planetary and satellite atmosphere*, 328-385, Univ. of Arizona Press, 1989.
- [2] Matsui & Abe, *Nature*, **319**, 303-305, 1986.
- [3] Mukhin, L. M. et al., *Nature*, **340**, 46-49, (1989).
- [4] Hashimoto et al., *JGR*, **112**, E05010, doi:10.1029/2006JE002844, 2007.
- [5] Pierazzo et al., *JGR*, **103**, 28607-28625, 1998.
- [6] Ohno et al., *EPSL*, **218**, 347-361, 2004.
- [7] Ishimaru et al., *Icarus*, **210**, 411-423, 2010.
- [8] Ohno et al., *GRL*, **35**, L13202, doi:10.1029/2008GL033796, 2008.
- [9] Ivanov & Deutsch, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **129**, 131-143, 2002.
- [10] Sugi et al., *GRL*, **25**, 837-840, 1998.
- [11] Ahrens, T. J., & O'keefe, J. D., *The Moon*, **4**, 214-249, (1972).
- [12] Stewart et al., *GRL*, **35**, L23203, doi: 10.1029/2008GL035947, 2008.
- [13] Kurosawa, K. et al., *17th SCCM*, in press, 2011.
- [14] Melosh, *Impact cratering A geologic processes*, Oxford University Press, New York, 1989.
- [15] Kondo & Ahrens, *Physics and Chemistry of Minerals*, **9**, 173-181, 1983.
- [16] Gupta et al., *EPSL*, **201**, 1-12, 2002.