

# 大気との相互作用による硫酸塩岩衝突放出物の蒸発に関する実験的研究

大野宗祐<sup>1</sup>、黒澤耕介<sup>2</sup>、石橋高<sup>1</sup>、長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉工大・惑星探査研究センター、<sup>2</sup>ISAS/JAXA

## 1、 研究の背景

今から 6550 万年前、白亜紀末の生物大量絶滅は、巨大天体衝突が原因であるということが広く受け入れられるようになった[Alvarez et al., 1980, Schulte et al., 2010 など]。天体衝突が引き起こす環境変動と具体的な絶滅機構は未だ不明であるが、衝突直下点には硫酸塩岩が豊富に存在していたことが地質学的証拠から示されており、それが衝突に伴い蒸発して大量の硫黄酸化物を放出し、それにより生成した硫酸エアロゾルや酸性雨による環境擾乱が有力な仮説である[Pope et al., 1994 など]。

衝突地点付近の硫酸塩岩は表層付近の堆積岩中に含まれている。そのため、衝突に伴い蒸発し硫黄酸化物を生成するのは、衝撃圧と衝突による加熱を非常に強く受ける衝突直下点付近に限られると考えられてきた。ところがその後、この衝突の衝突角度がかなり大きいのではないかという説が提案された[Schultz et al., 1996]。その場合、衝突直下点以外の場所でも衝突時の放出物速度が非常に大きく、周囲の大気との相互作用により空力加熱され分解/脱ガスし硫黄酸化物を放出した可能性がある。このメカニズムが本当に働けば、衝突により放出される硫黄酸化物の組成と量が劇的に変わり、引き起こす環境変動は全く質の異なる物となると考えられる。

天体衝突の際に硫酸塩岩が蒸発・分解し硫黄酸化物となるという現象は以前から知られており、申請者らは大阪大学の実験施設で衝突により放出される硫黄酸化物の化学組成を世界ではじめて測定することに成功した。しかし、これまで研究されてきたのは衝撃波による圧縮加熱に伴う化学反応のみであり、これまで衝突放出物の空力加熱による蒸発というプロセスは研究された例は全くない。本研究では、放出物の空力加熱による蒸発が起こるかどうかを実験的に検証するとともに、生成した硫黄酸化物ガスの化学組成を測定することを最終的な目的とする。二段式軽ガス銃を用いた硫黄酸化物の衝突生成ガスの気相化学組成分析実験はこれまで行われた例がなく、平成 23 年度は、まずは実験手法の確立を目指した。

## 2、 手法

二段式軽ガス銃を用いた硫黄酸化物の衝突生成ガスの気相化学組成分析実験はこれまで行われた例がなく、平成23年度の共同利用では実験手法の確立を目的とした実験を行った。衝突放出物の空力加熱による蒸発とその生成ガスの化学組成を観測する上で必要な、衝突により放出される三酸化硫黄と二酸化硫黄を定量分析する実験手法の確立を本研究初年度の目標とした。

最も困難なのは、非常に反応性が高く特に水分と極端に反応しやすい三酸化硫黄の分析である。三酸化硫黄は四重極質量分析計に対する感度も非常に悪い。大阪大学の実験施設での実験でも、硫酸塩岩からの衝突生成ガスの主要成分でありながら、最も分析手法確立が困難であった。また、もう一つの主成分であることが予想される二酸化硫黄についても、実験チャンバーや配管のステンレスの内壁への吸着を起こしやすく、定量分析には注意が必要である。

衝突放出物の大気との相互作用を実験室内で模擬するためには、放出物が大気と相互作用するのに十分な広さの空間に大気を封入した条件で気相分析を行う必要がある。そこで本研究では、これまでに黒澤研究員らの研究で確立された、実験チャンバーの上流に大型ガスだめ・高速自動ゲートバルブ・プラスチック薄膜の隔壁を配置して加速ガスの混入を極力抑える手法を用いて実験を行うこととした。平成24年度以降は、気体を充填した実験チャンバー内に硫酸塩岩標的を斜めに設置し衝突実験を行うことで、大気中での衝突放出物の空力加熱を再現する予定であるが、平成23年度の共同利用実験ではまず同じ実験システムを用い確実にガス放出が起こる衝突条件で実験を行い、生成ガス検出・分析手法の確立を行うこととした。そのためには、標的物質に硫酸塩岩を用い、それに十分大きい衝撃圧力（数十ギガパスカル以上）が発生する速度で弾丸を衝突させればよい。使用する弾丸は、生成ガスの化学組成に与える影響が金属やプラスチックよりも小さい、酸化物の弾丸であることが望ましい。本研究では、プラスチック薄膜を拘束で貫通させても弾丸が破壊される等の問題が生じないアルミナ球を選択し、毎秒約7キロメートルの速度で衝突させた。標的の硫酸塩岩には天然の硬石膏（CaSO<sub>4</sub>、ペルー産）の塊を用いた。

衝突により硫酸塩岩から生成した硫黄酸化物ガスは実験チャンバー内に放出される。実験チャンバー内はアルゴンガスが20ミリバールの圧力になるよう満たしてあり、常に一定量がガスボンベから流入し、逆に一定量が常にロータリーポンプで吸引されるようにセットしてある。硫黄酸化物ガスも同様にロータリーポンプで吸引され実験チャンバー外に排出され、アルゴンガスの量と同じ割合で減少する。その際、その一部を四重極質量分析計に導入し、化学組成の分析を行った。四重極質量分析計の内部は差動排気を行うことにより高精度の分析に必要な超高真空の状態を保った。また、衝突蒸気雲の生成と膨張の様子は高速度カメラを用い撮影した。実験装置と実験手法の詳細は、同じ装置を用いた炭酸塩岩の衝突脱ガス実験の先行研究[Kurosawa et al., 2012]に記載されている。

### 3、 実験結果

図 1 に高速度カメラにより撮影された衝突蒸気雲の画像を示す。衝突により生成した蒸気雲が高温のため白く発光しながら膨張していく様子の撮影に成功し、実験の目的通り確かに衝突蒸気雲が生成したことが確認できた。

図 2 に四重極質量分析計による質量数 64 ( $\text{SO}_2^+$ )、質量数 48 ( $\text{SO}^+$ )、質量数 80 ( $\text{SO}_3^+$ ) に相当する出力の時系列データを示す。質量数 64 ( $\text{SO}_2^+$ ) と質量数 48 ( $\text{SO}^+$ ) は主に二酸化硫黄、質量数 80 ( $\text{SO}_3^+$ ) は三酸化硫黄由来の出力電流値である。それぞれの出力電流値は衝突後に衝突前と比較して有意に増加しており、衝突により硫酸塩岩から放出された硫黄酸化物ガスの検出に成功したことがわかる。その後、各成分の出力値は同じ速度で減少する。これは生成した硫黄酸化物ガスがロータリーポンプで吸引され実験チャンバー外に排出されたためである。質量数 64 ( $\text{SO}_2^+$ ) と質量数 48 ( $\text{SO}^+$ ) の出力電流値は質量数 80 ( $\text{SO}_3^+$ ) の出力電流値と比べ  $10^4$  倍程度大きかった。これは、四重極質量分析計の三酸化硫黄の感度が二酸化硫黄の感度よりも約 2 桁悪いことを考慮しても、二酸化硫黄が三酸化硫黄の 100 倍程度と二酸化硫黄が支配的であることを意味する。

### 4、 まとめと今後の展望

以上述べたように、平成 23 年度の共同利用実験では、実験チャンバーの上流に大型ガスだめ・高速自動ゲートバルブ・プラスチック薄膜の隔壁を配置して加速ガスの混入を極力抑える手法を用い、衝突により放出される三酸化硫黄と二酸化硫黄を定量分析することに成功した。平成 24 年度以降は、気体を充填した実験チャンバー内に硫酸塩岩標的を斜めに設置し衝突実験を行うことで、大気中での衝突放出物の空力加熱を再現する予定である。

本研究により、大気中での衝突放出物の空力加熱が非常に効果的に起き硫黄酸化物ガスが大量に放出されることが示された場合、K/Pg 事件の環境変動と生物大量絶滅の描像は大きく変わると考えられる。理論計算の先行研究[Ohno et al., 2006]によると、天体衝突により三酸化硫黄が大気中に放出されると、それはほぼ全て短期間のうちに全地球的な酸性雨として降下する。大量の硫酸塩岩の衝突放出物の空力加熱の生成ガスが主に三酸化硫黄であった場合、海洋表層が全て強く酸性化され、それが大量絶滅の引き金となった可能性が示唆される。この海洋酸性化説では、提案されている他の絶滅メカニズムの仮説と比較して、K/Pg 事件の絶滅パターンを非常によく説明できると考えられている[Maruoka and Koeberl, 2003]。一方で、硫酸塩岩の衝突放出物の空力加熱の生成ガスが主に二酸化硫黄であった場合には、長期間にわたる日射遮蔽と寒冷化が起こった可能性が高い[Pierazzo et al., 2003]。

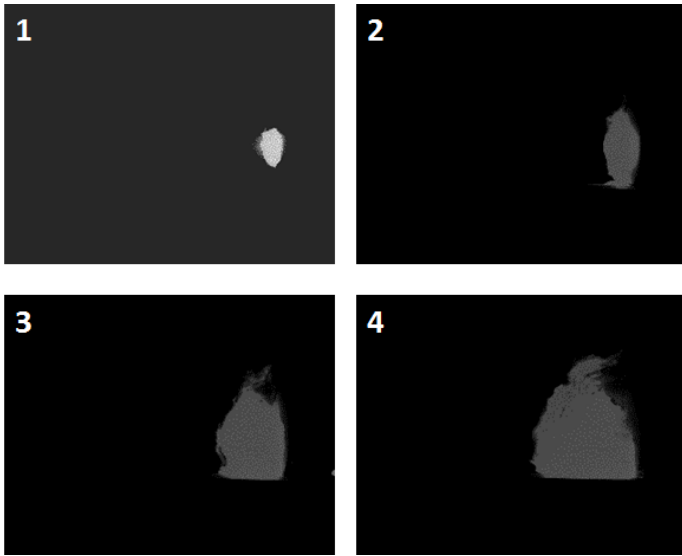


図 1：高速度カメラにより撮影された衝突蒸気雲。

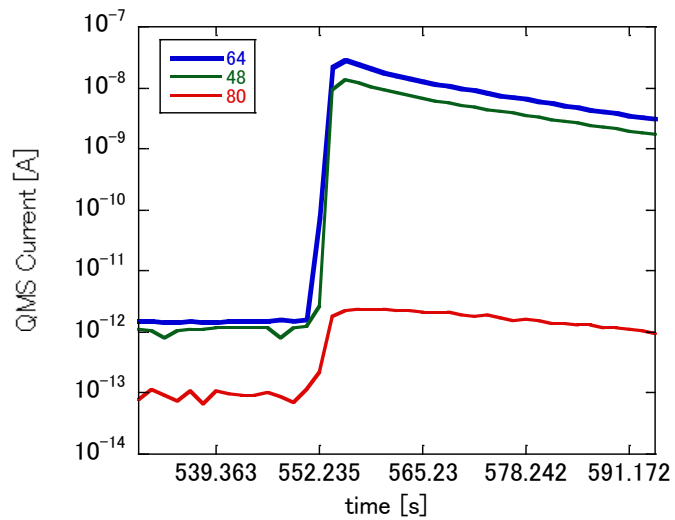


図 2：四重極質量分析計の出力電流値の時系列データ。質量数 64 ( $\text{SO}_2^+$ )、質量数 48 ( $\text{SO}^+$ )、質量数 80 ( $\text{SO}_3^+$ ) の 3 種類それぞれが衝突 (図の横軸で 550 秒前後) の直後から増加し、その後チャンバー内の硫黄酸化物濃度が減少するに従い出力電流値も減少する。