

2 段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析

-天体衝突による HCN 生成-

黒澤耕介^{1,2}, 長谷川直³, 三重野哲⁴, 大野宗祐⁵, 松井孝典⁵, 杉田精司^{1,3,5}

¹東大 新領域, ²日本学術振興会, ³ISAS/JAXA, ⁴静岡大 理, ⁵千葉工大 惑星探査研

要旨: シアン化水素(HCN)は化学進化による生命起源を考える上で最も重要な分子である。原始地球大気中における小規模天体の斜め衝突は、衝突方向下流側に飛び出した炭素を含む天体破片群が周辺大気によって空力加熱を受けて蒸発する。この過程では天体由来の炭素と周辺大気中の窒素が効率よく混ざり合うために一度に大量の HCN が合成される可能性があるが、最終生成物は定性的にも定量的にも明らかになっていない。そこで本研究では 2 段式軽ガス銃を用いてプラスチックの弾丸を同じくプラスチックの薄板に撃ち込み、天体が破砕され空力加熱を受けて蒸発する状況を実験的に模擬した。衝突後に自動ゲートバルブを用いて閉じ込めた生成気体を気体検知管を用いて分析し、~50 ppm の HCN を検出した。蒸発した炭素の~0.1%が HCN に変換されたことになる。今後はより現実的な組成の弾丸、標的、雰囲気を用いて、実際の天体衝突時のシアノ化合物生成量を推定していく予定である。今回確立した軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析の技術は、衝突誘起気相化学反応に関する研究全般に広く応用できるものである。

はじめに: 太陽系の天体は衝突を繰り返して成長してきたことがわかっている。最古の生命の痕跡は、隕石重爆撃期と呼ばれる衝突頻度が高かった時代の終焉と同時期に発見されており [e.g.,1], 天体衝突と生命起源の関連が指摘されている。6500 万年前の天体衝突による恐竜絶滅事件が示すように、直径僅か 10 km の天体が全球的な環境変動を起こす [e.g.,2]。天体衝突は原始地球における表層進化を支配していた可能性が高い。

シアノ化合物は小さな分子からの化学進化による生命起源を考える上で最も重要な化学種である [e.g., 3]。そのために天体衝突によるシアノ化合物合成過程はいくつか研究されてきたが [e.g.,4, 5]、現実的に想定される原始地球環境下で効率よくシアノ化合物を合成することは困難であることがわかってきた。これは酸化還元中性型気体からのシアノ化合物合成効率が低いこと [6, 7]、隕石中には

窒素がほとんど含まれていない [8] が原因である。

本研究では原始地球大気中での比較的小規模な斜め天体衝突(天体直径が 10^2 - 10^3 m)に注目している。衝突方向下流側に飛び出した天体の破片群は周辺大気から激しい空力加熱を受け蒸発する。この過程では天体物質と周辺大気が非常に効率よく混合し、天体由来の炭素と周辺大気由来の窒素が結びつき CN ラジカルを生成する [9]。生成された CN ラジカルは航跡流中で周辺大気とさらに混ざり合い化学反応が進行し、最終的に HCN が生成される可能性がある。ところが、個々の天体破片周辺に発生した衝撃波が干渉しあい、蒸発した天体破片(高温)と周辺大気(低温)が混ざり合う複雑な化学反応場を形成することから、理論予測は困難であり、化学反応最終生成物は定性的にも定量的にも明らかになっていない。実験室内で天体衝突

による空力加熱現象を再現する実証的な研究を行い、シアノ化合物の生成効率を支配する物理・化学過程を調べることが求められている。

そこで我々は2段式軽ガス銃を用いて模擬実験を行い、生成された気体を化学分析した。空力加熱を起こす空間と、生成された高温気体の自由膨張空間を確保するために2段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析技術の開発から行った。

衝突実験: ISAS に設置された新型2段式軽ガス銃で加速した弾丸で薄板標的を貫通させ、斜め衝突で発生する高速飛行する天体破片群を模擬した。薄板標的を用いた理由は空力加熱を受ける破片の組成を自由に制御可能なため、将来の発展を期待できるからである。

実験装置 実験系は2段式軽ガス銃、巨大ガス溜め、隔壁、自動ゲートバルブ、真空チェンバー、N₂ or Ar ガスボンベ、時間分解型高速分光計 (Hamamatsu C7700; Acton Research, Spectrapro 300)、高速カメラ (Shimadzu, HPV-1) からなっている (Figure 1 参照)。従来、衝突銃を用いた化学分析は加速ガスによる化学汚染の為に困難であった。我々は実験チェンバーの上流に加速ガス拡散用の巨大ガス溜め、生成ガス閉じ込め用自動ゲートバルブ、Shot 前に雰囲気を保つ Al 隔壁 (100 μm 厚) を配置し、実験チェンバーへの加速ガスの侵入を極力抑え、生成ガスを閉じ込めることで。

実験条件 今回は簡単のために酸素を含まない系で実験を行った。弾丸、標的、雰囲気にはそれぞれポリカーボネイト球 ([C₁₃H₁₆O₃]_n; 直径 7mm)、ポリエチレン板 ([CH₂]_n; 厚さ 1 mm)、N₂ (1 気圧) を用いた。比較の為に Ar (1 気圧) を用いた実

験も行った。分光観測視野は標的から下流方向に 2 cm の直径 1 cm の領域である。衝突速度は 7 km/s である。

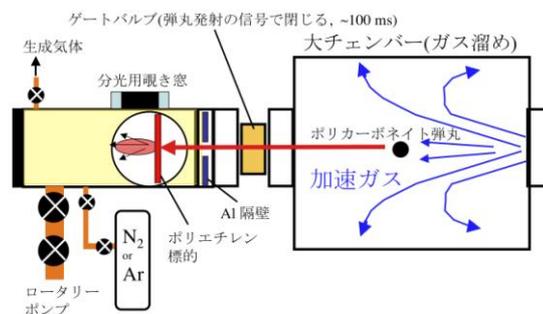


Figure 1. 実験装置模式図

化学分析手法: 加速された弾丸は Al 隔壁を貫通して実験チェンバー内に侵入し、薄板標的も貫通する。生じた破片は周辺大気から空力加熱を受けて蒸発し化学反応を起こす。今回は最も単純なシアノ化合物であるシアン化水素 (HCN) にのみ感度を持つ気体検知管 (光明理化学工業; 112 SA, 112SB, 112SC) を用いて、衝突によって生成した HCN の濃度を計測した。

実験結果: N₂ 雰囲気下と Ar 雰囲気下で高温条件下での発光スペクトルと最終的に生成された HCN の濃度を計測した。図 2 に Shot 前後のチェンバー全圧の変化を示す。Shot 前は $\sim 10^5$ Pa で一定であるが、Shot 後には 4×10^4 Pa まで激減し、その後は自動ゲートバルブによって再び気密性が確保され全圧がほぼ一定値になっていることがわかる。この結果は弾丸によって Al 隔壁が貫通された直後にチェンバー内の気体が勢いよく上流に流れたことを示しており、加速ガスが実験チェンバー内に侵入した可能性は非常に低いと言える。図 3 には高速カメラで得た撮像観測の結果を示す。弾丸が薄

板標的を貫通後、激しい空力加熱により加熱され、自発光していることがわかる。

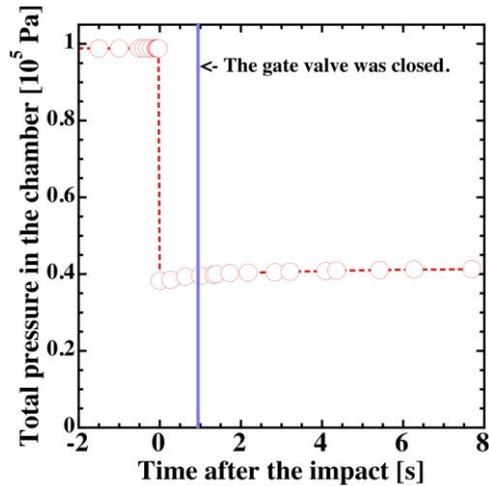


Figure 2. Shot 前後のチェンバー内全圧変化.

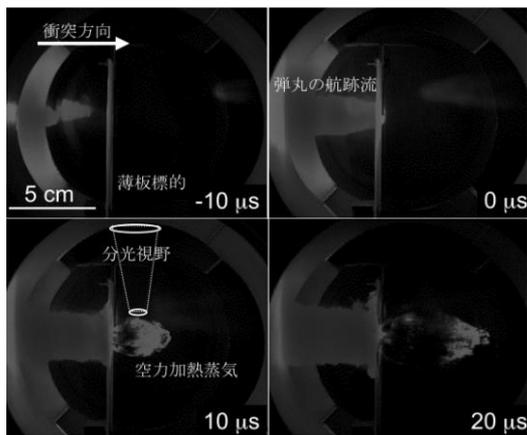


Figure 3. 高速カメラによる撮像結果.

図 4 に得られた発光スペクトルを示す。Ar 雰囲気中での Shot では強い黒体放射が卓越しているが、N₂ 雰囲気中での Shot は C₂, CN ラジカルの分子バンド発光が観測された。これは薄板衝突ではない通常の斜め衝突実験で観測された特徴と同様である[9]。より詳細な熱力学/化学的な比較が必要ではあるが、この結果は薄板衝突による高速破片生成

で、斜め衝突で衝突方向下流側に飛び出す成分を模擬できることを示唆する。

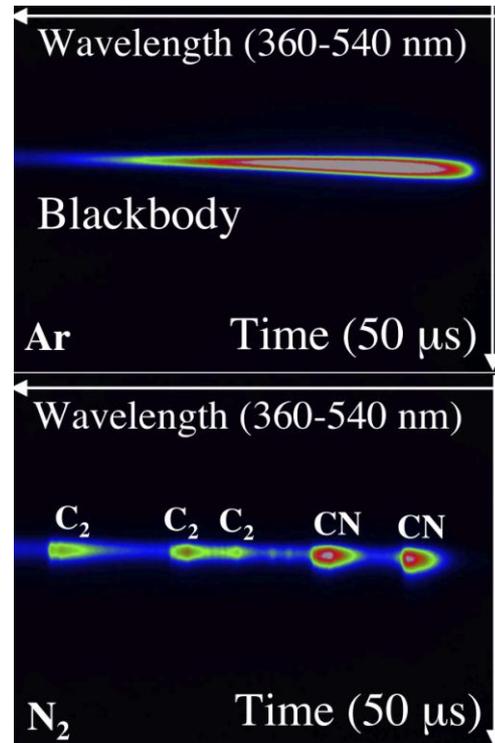


Figure 4. 時間分解発光スペクトル.

Shot 後に自動ゲートバルブを用いて閉じ込めた生成気体を気体検知管を用いて分析し、HCN の濃度を測定した。N₂ 雰囲気中の Shot では~50 ppm の HCN が検出された。弾丸及び貫通された標的の全てが蒸発したと仮定して、HCN への変換効率を求めると~0.1 %となる。実際は弾丸の全てが蒸発しているわけではないので、この見積りは大幅に過大評価していることを注意しておく。Ar 雰囲気中でも~20 ppm の HCN が検出された。これはコンタミ(漏れ込んだ空気)由来の窒素から生成したものであると考えている。今後はコンタミを減らして行くことが課題である。

議論: 今回は酸素がない非常に簡単な系で実験を

行ったが、世界で初めて衝突銃を用いた開放系気相化学分析技術を開発し、HCNを検出することに成功した。今後は弾丸を炭素を含まない金属 or 酸化物に変更し、雰囲気もより原始地球大気に近いものに変更し実験を行っていく予定である。また四重極質量分析計を導入し、生成物の分析精度の向上、加速ガス、空気によるコンタミのモニターを行いたいと考えている。

今回は斜め衝突後の空力加熱現象の実験的模擬を行ったが、今回開発した開放系気相化学分析技術は通常の衝突脱ガス実験にも適用可能である。衝撃加熱蒸発は元々固体であったものが気体になるために、蒸発体積に対して~1000 倍の自由空間を確保することが要請されるが、従来は加速ガスによる化学汚染によって困難であった。閉鎖系衝突による気体分析もいくつか行われているが[e.g., 10]、天然衝突との対応関係が不明であった。Arのような化学的不活性ガスを雰囲気に用いて加速ガスを遮蔽することで、精度よく脱ガス組成、量を計測することが可能になると考えている。近年レーザー銃を用いた開放系気相化学分析実験も開発されてきているが[e.g., 11]、2 段式軽ガス銃を用いれば、(1) レーザー銃に比べて $>10^5$ 倍の質量の弾丸を加速できる、(2)生成気体量も $>10^5$ 倍になるので分析精度の飛躍的な向上が期待できる、(3)弾丸の組成を選択できる(プラスチック、金属、酸化物; レーザー銃は金属のみ)、(4)高速カメラ、発光分光などによる計測が容易であること(※レーザー銃では飛翔体を標的近傍に設置する必要があるため、撮像/分光計測は困難だった。)などの利点がある。

まとめ: 小規模天体衝突による HCN 合成過程を調

べるために薄板衝突実験を行った。十分な反応空間を確保するために、世界で初めての 2 段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析技術を開発した。高速撮像/分光計測と簡易化学分析を実施し、窒素雰囲気下で CN ラジカルが生成することを確認し、最終生成気体から~50 ppm の HCN を検出した。蒸発した炭素から HCN への変換効率は~0.1%であった。今回開発した開放系気相化学分析技術は、衝突蒸発現象研究全般に应用可能である。

参考文献:

- [1] M. Schidlowski, *Nature*, **333**, 313, 1988. [2] P. Schulte et al., *Science*, **327**, 1214, 2010. [3] J. P. Ferris and W. J. Hagan, *Tetrahedron*, **40**, No. 7, 1093, 1984. [4] B. Fegley et al., *Nature*, **319**, 305, 1986. [5] L. M. Mukhin et al., *Nature*, **340**, 46, 1989. [6] W. L. Chameides & J. C. G. Walker, *Origins of Life*, **11**, 291, 1981. [7] S. L. Miller and G. Schlesinger, *ASR*, **3**, 47, 1983. [8] J. T. Wasson & W. K. Kallemeyn, *Phil. Trans. Royal Soc. Lond.*, **325**, 535, 1988. [9] S. Sugita & P. H. Schultz, *GRL*, **36**, L20204, 2009. [10] J. A. Tyburczy & T. J. Ahrens, *JGR*, **91**, 4730, 1986. [11] S. Ohno et al., *GRL*, **35**, L13202, 2008.