

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610184

研究課題名(和文) 流星再現実験：実験流星学の幕開け

研究課題名(英文) Laboratory Simulation of Shooting Stars

研究代表者

千秋 博紀 (SENSHU, Hiroki)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：30359202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：流星は一過性の現象の上、多くの場合は流星体は完全に蒸発してしまうため、観測から流星体の初期サイズや質量を見積もるのは困難である。そこで我々は、地上実験によって流星発光を模擬するためのシステムを構築した。このシステムでは、既存の2段式軽ガス銃を利用して射出された弾丸がコントロールされたガス環境下を通過する際に発光する様子を、高速ビデオカメラで撮像するとともに高波長分解能の分光器で分光観測することができる。今後、人工流星の観測データを積み重ねることで、天然の流星の観測から、その流星の組成や周辺環境を求めることができるようになるだろう。

研究成果の概要(英文)：When a mm-sized dust particle enters into Earth's atmosphere, it is observed as a bright streak, a shooting star. A shooting star is one-time event and, in most cases, the dust is completely vaporized. Thus the original size and composition is not easy to estimate only from ground-based observation. In this study we constructed a laboratory experimental system to simulate shooting stars by using a two-stage light gas gun. In this system the simulated shooting star is observed by high-speed camera with the frame rate of 1 mega frames/s, and simultaneously the light from the shooting star is analysed by a spectrograph with the wavelength resolution of 5.7 nm. Our laboratory experimental system will provide a fundamental data-set which relate the ground-based observational result to the original size and composition of the shooting star.

研究分野：比較惑星学

キーワード：流星 人工流星 2段式軽ガス銃 高速カメラ 分光

1. 研究開始当初の背景

流星は、ダストが重力圏外から大気に突入した際に発光することで観測される。流星発光現象は、大気を持つ天体ならば生じる。実際に火星においても着陸機によって流星が観測された例が報告されている。

地球上で観測される一般的な流星は、高度 100 km 付近で 0.2-1 秒程度発光する。突入した物質（以下「流星体」と呼ぶ）の大気突入前のサイズは典型的には 0.1-10 mm 程度で、大気中を移動する間に蒸発し、地上には固体成分は届かない。2013 年のチェリャビンスク隕石のように、突入前のサイズが 10 cm を超えるような大きなもの（チェリャビンスク隕石の場合は 17 m あったと見積もられている）は大気移動中に完全には蒸発せず、地表面に破片が到達する。地上で回収された流星体の破片が隕石である。

重力圏外から地球にもたらされる物質の質量は、毎年 4 万トン以上と見積もられており、上で述べた典型的なサイズの流星がその大部分を占める。しかしこの値は地上からの測光観測の結果から見積もられたものである。見積もりは光量や継続時間からサイズや組成、速度を求めるための経験則に依存していることに注意が必要である。

流星発光現象は、流星体と大気との摩擦で生じるのではない。音速よりもはるかに高い速度を持つ流星体が大気中を移動すると、前面の大気を急速に圧縮する。急速に圧縮された大気は一百度以上にまで昇温し、プラズマ化する。一方、高温高压のプラズマによって炙られた流星体表面も温度が上昇し、蒸発、プラズマ化する。大気起源のプラズマと流星体起源のプラズマからの発光が観測される光の正体である。大気成分からの発光強度と、流星体起源の物質からの発光強度の混合割合やそれぞれのプラズマからの発光輝線の強度は、流星体の組成だけでなく、流星体の前面に作られる圧縮大気の温度や圧力に依存する。しかし流星体の移動によって大気がどの温度、圧力にまで圧縮されるのか、その際に発光や輝線の混合比がどの程度であるのかは、これまで実験的に確認することができていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、流星体のサイズ、組成、速度、周囲大気の組成と圧力がコントロールされた条件のもと、実験室内で流星発光現象を再現する実験システムを構築することと、構築された実験システムを利用して、実際に人工流星の観測を行う事である。観測は、流星体近傍で生じている蒸発や発光の分布がわかるように、流星体を十分な空間分解能で撮影するとともに、地上からの流星観測との比較が可能のように、流星の発光箇所を上流（流星体とその近傍）から下流（テイル部分）までを撮像する。同時に、流星体の組成に依存した発光スペクトルの違いも計測する。天

然の流星でも、観測例はごく限られているが、スペクトルの違いから流星体の元の組成を推測する試みがなされている。

これらの目的が達成されると、様々な環境パラメタの関数として発光強度や発光領域の構造、発光スペクトルを得ることができる。実験できる回数には限りがあるが、このような観測結果を積み重ねることで、自由な環境パラメタの組み合わせから、得られる発光強度や構造、スペクトルを予測できるようになるだろう。また逆に、天然の流星の観測結果から流星体のサイズや組成、速度を求めることができるようになるかもしれない。本研究が目的としている実験システムは、流星発光現象の理解のために必要な基礎データを収集、蓄積するためのものである。

3. 研究の方法

本研究で構築する実験システムには、千葉工業大学惑星探査研究センターが所有する、2 段式軽ガス銃を利用する。この施設は、火薬を使って圧縮した軽ガス（水素ガス）で、直径 4.7 mm の弾丸を 5-7 km/s で打ち出すことができる。サボを利用することでより任意の組成の小さな弾丸を飛ばすこともできる。射出された弾丸が低圧ガス中を通過する際に発光する様子を観測する。

弾丸の射出にあたっては、2 段式軽ガス銃の銃身付近は真空状態にする必要がある。このため実験では、弾丸は真空状態から低圧ガスの中に突入させなければならない。

低圧ガス中に弾丸を打ち込む方法としては、ふたつ考えられる。ひとつは隔膜によって低圧ガス側（観測領域）と真空側（銃付近）を隔てておき、弾丸で隔膜を突き破るといったものである。この方法は、実験システムが単純かつそれぞれの領域の圧力をコントロールしやすいというメリットがある。しかし一方で、隔膜通過時に弾丸がダメージを受けるといったデメリットもある。このダメージを定量的に見積もるのは困難なため、例えば弾丸が崩壊して断面積が増えることで増光したように見える影響を評価することができない。もうひとつの方法は、観測領域と銃付近とをバルブで隔てておき、バルブを開けた直後、観測領域のガスが抜けきらないうちに弾丸を打ち込むというものである。この方法は観測領域の圧力が予想しにくいというデメリットがあるが、弾丸にダメージはない。我々は後者の方法を採用して実験システムの構築を行った。実験システムの全体図を図 1 に示す。実験チャンバの側面から高速撮像計測、上面から時間掃引分光計測を行う計測系を構築した。実験で利用したカメラ（Shimadzu, HPV-X）で、1000 万コマ/秒での撮像が可能である。実験システム上での視野はおよそ 100 mm/400 ピクセルなので、発光領域を十分に分解して撮像することができる。



図 1：実験システム全景

また、人工流星体が視野を通過する様を 128 コマ撮像することで、流星体の移動方向に流星体の 100 倍程度の領域が観測可能である。分光器 (Actron Spectra Pro, 300i) とストリークカメラ (Hamamatsu, C7700) を組み合わせることで時間掃引分光計測を実施した。360-730 nm の波長範囲を波長分解能 5.7 nm で計測する。分光器の視野は 7 mm x 18 mm で、高速ビデオカメラ同様、流星体近傍からテイルまで連続的な観測を行う。

観測領域 (観測チャンバ) は、本課題のために作製したものである。チャンバの長さは 1200 mm で、側面には 750 mm x 100 mm の幅広の観測窓を備えている。高速ビデオカメラによる撮像は、この観測窓から行う。チャンバの上面には観測用のポートがいくつか開いており、分光器による観測はこのポートを通して行う。観測チャンバの概形を図 2 に示す。

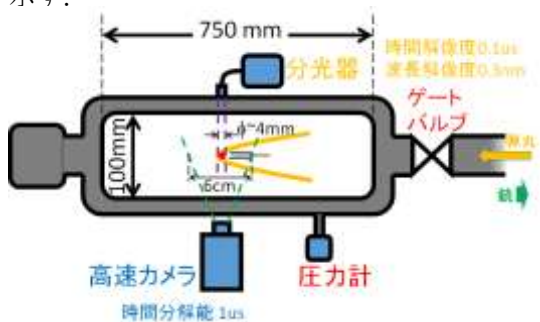


図 2：観測チャンバ付近の装置配置

観測領域を封圧するゲートバルブと 2 段階軽ガス銃が電子制御で連動する信号系を構築した。このためにシステム各部の動作時間をそのジッタまで含めて計測し、動作時間差を決定した

4. 研究成果

ゲートバルブの解放後の観測チャンバ内の気圧の変化を計測した。結果を図 3 に示す。弾丸が観測チャンバを通過する際の周囲の圧力は、観測チャンバの初期圧力に対して 94% であり、バルブ解放後の減圧はほぼ無視できる。

実際に、観測チャンバ中に弾丸を打ち込んだ結果のうち特徴的なものを紹介する。図 4 は初期圧力 10 kPa の Ar 雰囲気中に、直径 2

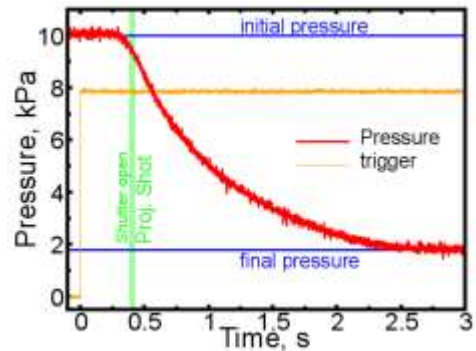


図 3：ゲートバルブ開放後の観測チャンバ内の圧力変化

mm の Al_2O_3 製の弾丸を 6.2 km/s で打ち込んだ場合の例である。高速ビデオカメラ映像のスナップショットから、流星には強く発光する部分 (ヘッド) と下流部分 (テイル) の間に、くびれて見える部分 (ネック) があることが見て取れる。これは、流星体 (弾丸) の表面に沿って高温ガスが流れてゆくために作られる構造である。テイル部分は緩やかに広がりながら下流まで続いている。テイルの広がり角は、マッハコーンの広がり角よりも狭い。マッハコーンの内部には明確な構造があることが確認された。

分光結果からは、ヘッド部分が強い黒体放射を放っているが、それよりも上流側のテイル部分にはあまり黒体放射成分があまりみられず、分子や元素からのスペクトルが卓越していることがわかる。スペクトルとして見られるのは、雰囲気ガスである Ar や弾丸起源の Al^+ 、水素 (コンタミ) の輝線も見てとれる。本研究では、簡易的だが、スペクトルデータから波長補正・強度補正を行い、スペクトルの位置を図示するためのツールも作成した。図 4 の下に示している図はツールによって作図したものである。本研究ではこのほかにも、複数の弾丸組成、サイズ、速度、雰囲気ガス圧力の下での実験を行っており、データベースを作成している。これらの結果については、順次発表してゆく予定である。

以上のように我々は任意の組成の弾丸をおよそ 1 気圧までの任意の圧力のガス中に射出し人工流星を生成し、それを 0.5 us, 100 um の時空間分解能で撮像/分光計測する実験システムを構築した。現在準備中であるが、予め元素組成を分析した隕石そのものを球形に加工し、射出する実験も計画している。得られるであろう発光スペクトルデータと比較するために理想的な条件 (熱・電離平衡) にある隕石組成プラズマからの発光スペクトルを計算するツールの開発を平行して行った。以下に作成した計算コードの特徴を記す。NIST Atomic Spectra Data Base から H から Ge までの 32 元素の 3 階電離状態までの発光輝線スペクトルデータを取得し、電離平衡組成を求める。この際、温度と電子数密度に依存する分配関数を用いる。現段階では最も単純

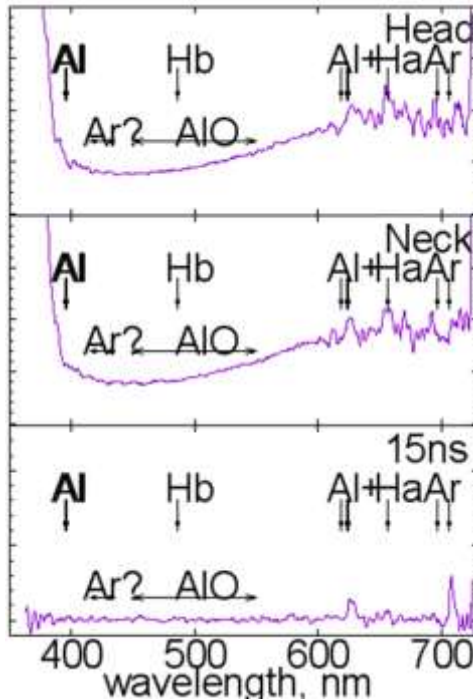
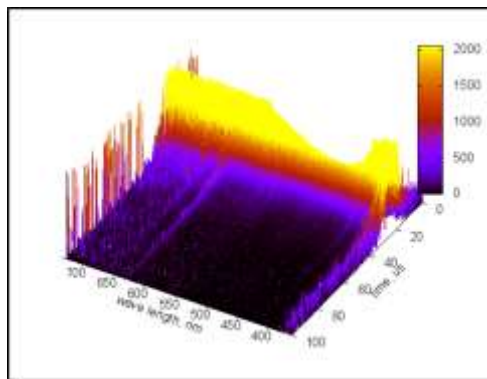


図 4: Al_2O_3 を Ar 雰囲気中に打ち込んだ結果. 高速ビデオカメラの映像 (上), 分光結果の時間進化 (中), 分光結果の、ヘッド、ネック、テイルそれぞれを切り出したもの (下)

に電子衝突優勢条件を仮定し、局所熱平衡条件における発光輝線スペクトルを計算できるようになっている. 輝線プロファイルには Voigt 関数を用いる. 図 5 に本計算コードで計算した炭素質隕石の元素組成を仮定した場合の電離平衡組成を示す. 発光輝線強度は温度と発光種の数密度に依存する. 電離が進行すると数密度が桁で変化するため、その化学種の輝線は観測されなくなる. この計算結果は観測された流星発光スペクトルを解釈する際に電離の影響を考慮しないと、流星体とその化学種が欠乏していたという誤った推論を導いてしまうことを示唆する. 図 6 に計算の 1 例として炭素質隕石組成プラズマが 0.1 気圧, 8000 K で熱・電離平衡にある場合の可視光領域の理論合成発光スペクトルを示す. 波長分解能は 4 nm とした. 波長域全域のほとんどが鉄の中性輝線の寄与で占められるが, Mg, Na, H, O, Si の中性原子が放つ輝線が鉄輝線からの超過として観測できそうである, ということがわかる. 今後はこの理想的な発光輝線モデルがどこまで利用可能であるかを実験との比較を通じて明らかにしていく.

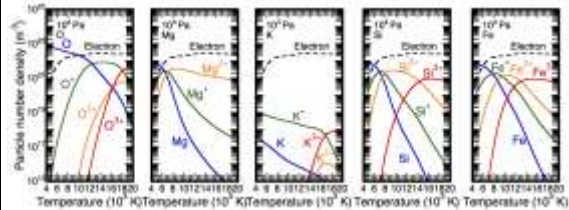


図 5: 炭素質隕石組成プラズマの 0.1 気圧における電離平衡組成. 主要 5 元素のみの結果を示す.

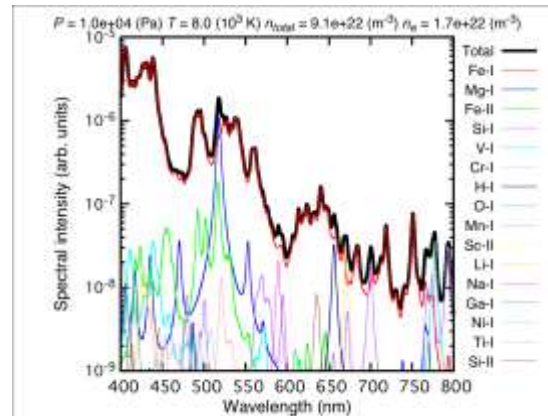


図 6: 炭素質隕石組成プラズマの理想的な発光スペクトルの計算例.

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 3 件)

- ① 黒澤耕介. 天体衝突による物質放出仮定. 天文月報 110, 105-110, 2017. (査読あり)

- ② 黒澤耕介. 衝突蒸発・脱ガス実験から探る初期太陽系天体表面環境. 日本惑星科学会誌『遊星人』25, 136-148, 2016. (査読あり)
- ③ Senshu, H., K. Kurosawa, T. Okamoto, and T. Matsui. Laboratory simulation of shooting stars by using a two-stage light gas gun. Abst. 47th Lunar Planet. Sci. Conf. #2142, 2016 (査読なし)

[学会発表] (計5件)

- ① 千秋博紀, 黒澤耕介, 岡本尚也. 人工流星生成実験. 日本地球惑星科学連合2016年大会. 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市). 2016年5月22-26日.
- ② Senshu, H., K. Kurosawa, T. Okamoto, and T. Matsui. Laboratory simulation of shooting stars by using a two-stage light gas gun. 47th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, TX, USA. 2016年3月21-25日.
- ③ 千秋博紀, 黒澤耕介, 岡本尚也. 人工流星生成実験 (速報). 衝突研究会 天体の衝突物理の解明(XI). 北海道大学低温科学研究所 (北海道札幌市). 2015年11月25-28日.
- ④ 黒澤耕介, 千秋博紀, 鈴木宏二郎, 春日敏測, 杉田精司, 松井孝典. 人工流星の空力加熱過程のその場観察. 日本地球惑星科学連合2015年大会. 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市). 2015年5月24-28日.
- ⑤ Kurosawa, K., H. Senshu, K. Kasuga, S. Sugita, and T. Matsui. In-situ imaging and spectroscopic observations of artificial shooting stars. 46th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, TX, USA. 2015年3月16-20日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

千秋 博紀 (SENSHU, Hiroki)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員
研究者番号: 30359202

(2)研究分担者

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