

室内実験と分光観測を用いた流星体中の有機物と揮発性物質の研究

Study of Organic and Volatile Species in Meteoroids using Laboratory Experiments and Spectroscopic Observations

阿部新助研究室

Abe Space Science Laboratory

宇田天音

Amane Uda

We performed (1) laboratory experiments to simulate meteor emissions in a chamber using projectiles made by carbon-rich polycarbonate spheres as an organic material, and (2) spectroscopic observations of the Geminids meteor shower, which indicate variation of sodium as a volatile substance. In order to investigate the physical processes of the meteoroids' fragmentation, the artificial meteors were generated by using a two-stage light gas gun, and measured by high-speed imaging and spectroscopic cameras. The laboratory experiments showed that the emission intensity enhanced with increasing the fragmentation of the projectile. On the other, the sodium variation in the Geminids meteor shower was investigated. Approximately 68% of Geminids showed their sodium were depleted than that of solar abundance.

1. 序論

1.1 研究背景

流星とは、彗星や小惑星起源のメテオロイド(meteoroids=流星体)と呼ばれる流星物質が、12-72km/sという超高速で地球大気に突入した際の加熱により、気化したメテオロイド物質と地球上層大気原子分子中で、衝突励起してプラズマ発光する現象のことである。また、メテオロイドが惑星大気に突入した際に、大気との衝突励起によって加熱され、構成している物質が溶融点に達することでガス化し、複数の粒子片に分裂する(フラグメンテーション)という一連の過程のことをアブレーションという。メテオロイドのアブレーションによる質量損失過程はモデル化されており、発光強度がフラグメンテーションに依存していることが分かっている^[1]。しかし、フラグメンテーションの詳細はまだ十分に理解されていない。そして、メテオロイドに含まれる有機物からの可視光での発光の直接検出や、残存有機物の評価は行われていない。

また、流星群の分光観測を行うことで間接的に母天体の調査をすることが可能である。かつて有機物や水を豊富に含む彗星であった活動小惑星ファエトン(3200 Phaethon)は、近日点距離が0.14AUと太陽に非常に接近する。近日点通過の際には表面温度が1000Kを超え、数百年から数千年の間に揮発性物質を急速に失ったと考えられている^[2]。しかし、ファエトンを母天体とするふたご座流星群ではナトリウムが枯渇していない流星も存在している。

1.2 目的

(1) 室内実験では、高速度カメラを用いたフラグメンテーションによる流星ヘッドの発光強度の変化を調査し、フラグメント(分裂片)の力学的特性を明らかにすること。また、有機物を豊富に含んだ物体を用いて流星発光を再現すること。

(2) 観測では、ふたご座流星群における揮発性物質であるナトリウムの枯渇度から太陽加熱の影響の調査を行うこと。

2. 実験装置及び実験方法

本実験では、宇宙科学研究所(ISAS)に設置されている縦型二

段式軽ガス銃を用いてメテオロイドの発光模擬実験を行った。チャンバー内を数百Paにし、そこへガス銃を用いて約6km/sでメテオロイドを模擬したポリカーボネート球(以下、プロジェクトイル)を射出することで流星発光を模擬している。

撮影はチャンバー正面窓の前方に設置した超高速カメラ HPV-Xの対物部に透過型回折格子を取り付けて行った。以下にカメラと透過型回折格子の仕様、各shotの実験条件を示す。

Table 1 Specifications of HPV-X and objective spectrograph.

Grating	300 grooves/mm
Lens	50 mm / F1.2
FOV	14.6° (H) × 9.15° (V)
Wavelength	400-800 nm
Frame rate	5000000 fps

Table 2 Specifications of high speed camera and objective spectrograph.

	Velocity [km/s]	Pressure [Pa]
shot1	6.150	584
shot2	5.814	557

3. 観測機器

本観測ではSONY α 7sに透過型回折格子を取り付けて観測を行った。また、2019年宮崎の観測では赤外線透過フィルタが取り付けられており、それ以外のデータでは取り付けられていない。以下に回折格子とレンズ、カメラの仕様を示す。

Table 3 Specifications of lens and objective spectrograph.

	Funabashi, Shigaraki	Miyazaki
Lens	SIGMA24 mm / F1.4	SIGMA35mm / F1.4
FOV	73.7° (H) × 53.1° (V)	54.4° (H) × 37.8° (V)
Grating	600 grooves/mm	

Table 4 Specifications of SONYα7S.

Product Name	ILCE-7S
Exposure Time	1/30 s
Frame rate	29.97 fps
Resolution	3840×2160

4. 解析手法

4.1 実験データ

カメラで得られるデータはピクセルカウント値であるため、まずピクセルを波長へと変換する必要がある。波長が既知である校正光源としてHG-1（水銀アルゴンランプ）を用いて、複数のピクセルにおける波長を同定し、3次近似を行う。この3次式を用いてピクセルから波長への変換を行った。

次に、カメラのセンサーは波長ごとに感度が異なるのでHL-3（ハロゲンランプ）を用いてカウント値から発光強度に変換を行う。HL-3の波長ごとの発光強度は5次式で表すことができるので、それをもとに発光強度へと変換を行った。

4.2 観測データ

実験と同様に校正光源HG-1を用いてピクセル-波長関係、HL-3を用いてカウント値-発光強度関係を求めた。ここで、透過型回折格子の波長ごとの回折角と透過率は入射角に依存し、広視野観測ではこの影響が無視できない。そのため、+1次光は-10~+50度、-1次光は+10~50度まで入射角5度おきに感度曲線を測定した。この感度曲線を入射角を変えながら視野内を高速移動する流星発光に適応して波長校正、感度補正を行った。また、取得したカラーデータにはガンマ特性がかけられているのでガンマ補正を行い、レンズによって生じる歪曲収差の補正も行った。

5. 結果

5.1 実験結果

本稿ではフラグメンテーションが生じたshot1とその比較対象として顕著なフラグメンテーションが起きていないshot2のデータを扱う。Figure 1がshot1で撮影された画像である。以下の図は流星の時間変化を表したものであり、左側3枚で確認できるものをフラグメント1、左から7枚目以降で確認できるものをフラグメント2としている。また流星先頭の最も明るい部分をヘッド(head)、流星後方の尾の部分ウェイク(wake)と呼ぶ。

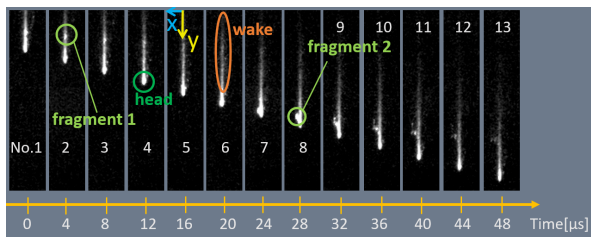


Figure 1 Fragmentation of Projectile (shot1).

流星ヘッドの明るさの時間変化を調べたところFigure 2のよ

うになった。ただし、本稿では校正光源の0次光が飽和してしまっていたため、1次光の400nm以降の発光強度を全て足し合わせた発光強度をヘッドの発光強度とした。

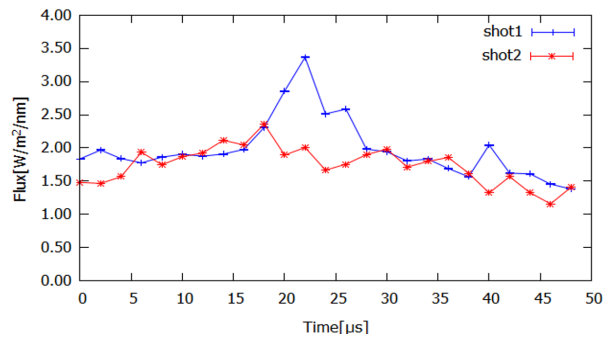


Figure 2 Luminous Intensity of meteor head.

次に、フラグメント1のみの発光スペクトル(赤線)、流星ヘッドの発光スペクトル(青線)を表したグラフをFigure 3に示す。フラグメントが存在している部分のカウント値から3ピクセル離れたスペクトル(背景光)を減算したものをフラグメントのスペクトルとした。また、減算を行った際にカウント値が負の値をとった場合は、0として扱った。

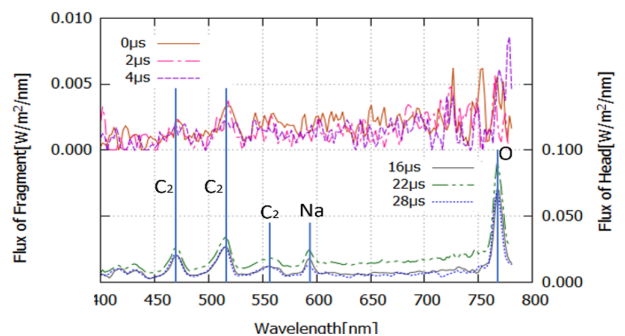


Figure 3 Spectroscopy of meteoroid.

Figure 3よりヘッド最大発光点である $t=22\mu\text{s}$ ではスペクトルの形状に変化はなく、全体的に発光強度が上昇している。

次に、ヘッドを原点に左向きにx軸、流星の進行方向にy軸をとり (Figure 1参照) フラグメントの位置から2次元投影速度を求めた。ただし、フラグメント1はy軸方向のみの移動であったためフラグメント1のx軸方向速度は図中には示していない。

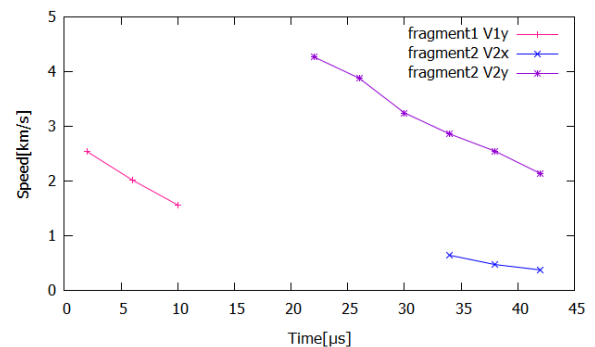


Figure 4 Speed of fragment.

5.2 観測結果

2019年12月14~15日に船橋キャンパス3号館屋上にて、2020年12月12~15日に京都大学生存圏研究所・信楽MUレーダー観測所にてふたご座流星群の観測を行った。また、2019年12月13~15日に観測されたデータは宮崎大学の前田幸治教授から提供されたものである。なお、観測された流星がふたご座流星群が散在流星であるかは、流星の飛跡と速度から放射点判定を行い判断した。以下に2020年信楽で撮影された流星を示す。

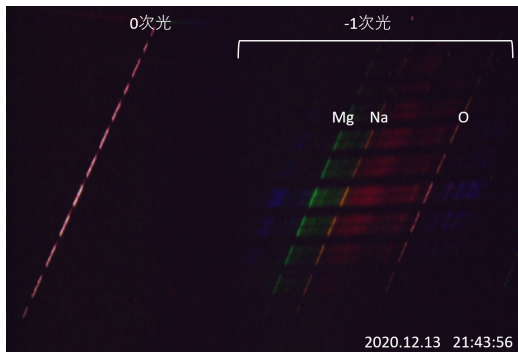


Figure 5 Meteor spectrum image.

観測から得られたデータからNa I (1)–Mg I (2)–Fe I (15)比を求めたところ以下のようになった。

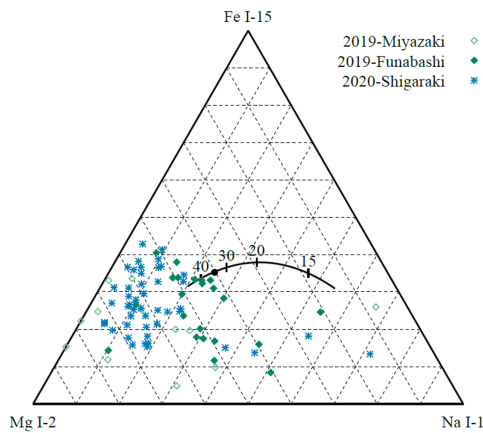


Figure 6 Na-Mg-Fe Diagram in Geminids meteor spectra.

Figure 6の中央部分に描かれている曲線は大気突入速度(km/s)ごとの太陽組成の発光強度比を表している。ふたご座流星群はおよそ突入速度35km/sである。このときの太陽組成は

$$Na I : Mg I : Fe I = 24 : 40 : 36 \quad (2)$$

である^[2]ことから、ふたご座流星群ではナトリウムの含有率が低いものが多いことが分かる。

6. 考察

6.1 実験

まず、Figure 2よりshot1はshot2と比べてフラグメンテーションによって最大発光点が約1.5倍増光したことがわかる。shot1

の20-30 μ sで発光強度に大きな変化があり、Figure 1を確認するとその間の画像でフラグメントが確認できる。このことから、顕著なフラグメンテーションが生じて、発光断面積が増加したために増光が見られたと考えられる。また、画像からは判断することは出来ないが、発光強度が上昇し始める18 μ s付近でフラグメンテーションが起きたと考えられる。

次に、Figure 3の流星ヘッドのスペクトルを見ると470nm, 520nm, 550nm付近ではどの時間においてもピークの位置がそろっていることがわかる。これはポリカーボネート球を使用していることから、C₂バンドではないかと推測できる。そこで、JAXAの再突入体放射加熱予測コード「SPRADIAN」を用いてC₂バンドスペクトルのモデル計算を行った。実験計測値とモデルスペクトルを比較することで励起温度を求めた。ただし、電子温度、回転温度、振動温度は全て等しい熱平衡状態(LTE)を仮定し、FWHM=10nmのガウス関数で畳み込み積分を行いモデルスペクトルを作成した。

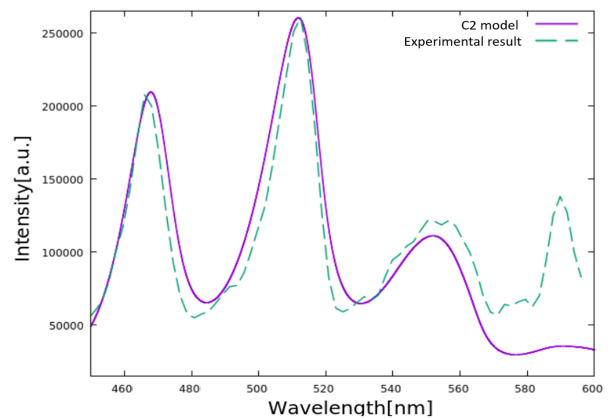


Figure 7 SPRADIAN fitting example.

Figure 7は、最適フィッティングしたモデルスペクトルと実験で計測されたスペクトルの比較で、470nm, 520nm, 550nm付近にバンドヘッドを持つ炭素分子のスワンバンドで説明されることが分かった。また、フィッティングによって得られたフラグメント1、ヘッドにおけるC₂発光温度の時間変化を以下に示す。

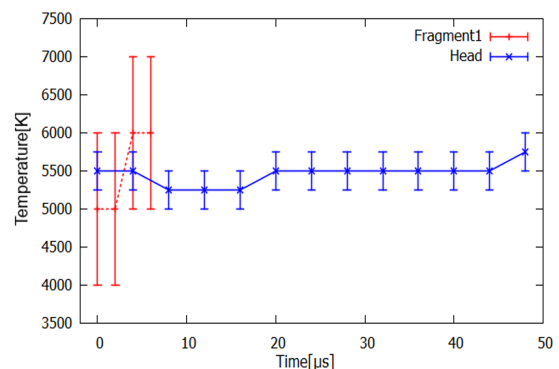


Figure 8 Time variation of C₂ temperature.

Figure 8より温度変化が見られるがエラーバー内で一致してい

るので温度上昇したとは言えない。つまり、温度は一定であると言える。このことから、発光断面積の増加が増光の原因であると推測される。

Figure 3の流星ヘッドのスペクトルを見ると600-750nmの範囲の背景成分を黒体放射スペクトルがと考へ、以下のプランクの式に変数Aをかけた式^[4]でフィッティングを行い、黒体放射温度を求めた。発光は完全な黒体ではなく灰色体であるので、放射率をAとしている。

$$E_{b\lambda} = A \times \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

λ [m]: 波長 T [K]: 絶対温度
 $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: プランク定数
 $k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$: ボルツマン定数
 $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$: 真空中における光速

Table 5 Blackbody temperature.

Time[μ s]	Blackbody temperature[K]
16	3024 \pm 99
22	2948 \pm 67
28	3077 \pm 163

表より温度変化は誤差範囲であり、温度変化は見られなかったと言える。つまり、発光強度の上昇は黒体温度上昇によるものでもないと言える。

Figure 4よりフラグメント2は流星の進行方向に垂直方向の速度 $v_{2x} = 0.496 \text{ km/s}$ が存在している。これはプロジェクトイルの速度6.150km/sの約8%の速度であった。流星の突入速度の約8%の速度に達するジェット（空間分解能が低いためフラグメントは確認されていない）がメテオロイドから放出される現象が対地速度72km/sの「しし座流星群」の可視光観測（Mg I 輝線）で報告されており^[5]、速度が大幅に異なる本実験で、同様の速度比の高速フラグメントが計測されたため、フラグメントの運動に統一した物理過程が存在することが示唆される。また、各フラグメントの速度に対して線形近似を行い加速度 a を求め、カウント値が600以上のピクセル数でサイズの評価を行った。以下の表にそれを示す。

Table 6 Acceleration of fragment.

	a_x [m/s^2]	a_y [m/s^2]	Size[pixel]
Fragment 1		-123 \pm 4.70	23
Fragment 2	33.3 \pm 5.22	-107 \pm 5.56	47

Table 6より、フラグメント2のほうが大きく（明るく）、y方向加速度の大きさはフラグメント1の方が大きな値をとっていることからy軸方向加速度は大きなフラグメントほど小さくなるのではないかと考えられる。

6.2 観測

またNa<10%をNa-free, 10%<Na<20%をNa-poorとすると観測された流星の割合は以下ようになった。

Table 7 Meteor Classification.

Na-free	30.9%
Na-poor	37.0%

本観測から得られたふたご座流星群のデータ中においてナトリウムが20%未満のものは67.9%であった。つまり、太陽加熱を受けた期間が短いものが存在している。このことから、母天体から放出された時期が異なるメテオロイドがふたご座流星群として観測されたのではないかと考えられる。

7. 結論

室内実験で流星のフラグメンテーションを再現することに成功し、天然流星では観測することが困難であるC₂バンドの発光を確認することができた。また、プロジェクトイルの発光強度の上昇は温度上昇には依存せず、フラグメンテーションに起因することが確認された。

また、観測されたふたご座流星群のうち67.9%でナトリウムが枯渇していた。

8. 謝辞

本研究は宇宙科学研究所の超高速実験施設での共同利用プログラムによる助成を受けたものである。

また、宮崎大学工学部電子物理工学科の前田幸治教授には多くの観測データを提供していただきました。

参考文献

- [1] M. D. Campbell-Brown et al. : "High-resolution modelling of meteoroid ablation", *At* <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2013/09/aa22005-13.pdf>, *Astronomy & Astrophysics*, A41, 2013, pp1-13
- [2] S. Abe et al. : "Sodium variation in Geminid meteoroids from (3200) Phaethon", *At* https://www.researchgate.net/publication/344481278_Sodium_variation_in_Geminid_meteoroids_from_3200_Phaethon, *Planetary and Space Science* 19 (2020) 105040, 2020, pp1-9
- [3] 一般社団法人日本機械学会: 「JSMETeXトシリーズ 伝熱工学」, 2018, pp102
- [4] 小川巧寛, 坂田良文, 宮下敦希: 「観測と実験による流星アブレーションの研究」, 学位論文, 日本大学, 2018, pp25
- [5] M.J. TAYLOR et al. : "JET-LIKE STRUCTURES AND WAKE IN Mg I (518 nm) IMAGES OF 1999 LEONID STORM METEORS", *At* <https://leonid.arc.nasa.gov/MS046.pdf>, *Earth Moon and Planets*, 82-83, 2000, pp379-389