

観測と実験による流星アブレーションの研究

Observational and Experimental Studies of Meteor Ablation

日本大学理工学部 航空宇宙工学科・阿部新助 研究室

Abe Space Science Laboratory, Nihon University

学部 4 年: 小川巧寛, 坂田良文, 宮下敦希

Takumi Ogawa, Yoshifumi Sakata, Atsuki Miyashita

Comet or asteroidal meteoroids can be observed as meteor during their collision with Earth's atmosphere. These meteoroids can provide us abundance of the chemical elements. In order to understand the ablation process of meteoroids, meteor ablation tests were carried out using JAXA/ISAS's arc heated wind tunnel during in 2018. We obtain data by the spectroscopic measurement during the artificial meteor experiment. And, we observed Perseids and Geminids by SONY $\alpha 7s$ through transmission gratings. The high heating rate produce more fragments from the specimen than the low heating rate in experiment. As a result, at high heating rates the specimen emits stronger blackbody radiation and becomes brighter than the low heating rate. Moreover, when the heating rate by meteor speed is high, the atmosphere is easily excited in observation results. And, composition of meteoroid using bright line intensity ratio shown poor in sodium from Geminids.

1. 背景

流星(meteor)とは、彗星や小惑星起源のメテオロイド(meteoroid)と呼ばれる惑星間塵が、12-72[km/s]という超高速で地球大気に突入した際、輻射加熱と空力加熱で溶融・気化したメテオロイドと大気原子・分子が衝突することで、励起されてプラズマ発光する現象のことである^[1]。流星を撮像・分光観測することで、流星の母天体の情報を間接的に調査することが可能となる。

しかし、出現時刻と位置が不明である流星は広い視野を監視する必要があるため高精度な観測が難しく、発光物理現象を正確に求めることが困難である。そこで、組成・形状等が既知のメテオロイドを突入速度・突入角等がわかるように大気に突入させることで高精度の科学観測が可能となる。

その基礎実験としてJAXA/ISASアーク加熱風洞(惑星大気突入環境模擬装置)を用いてアブレーション実験を行い、分光計測を実施した。また、流星群の天然流星の分光観測を行い、それらを比較した。

2. 目的

Fig.2.1 [J.Borovička] が示した三角ダイアグラムを示す。

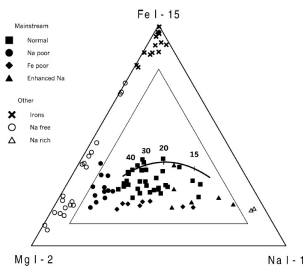


Fig. 2.1 Diagram showing the measured relative intensities in 96 meteor spectra ^[4]

Fig. 2.1 中央にある曲線は普通コンドライトが、ある速度で落ちてきた際の発光強度比がどのようになるかを示しており、

単位は[km/s]である^[4]。ここから、同様の組成であっても突入速度によって、原子の発光強度比が異なってくるのがわかる。

そこで、実験において加熱率と速度は同意であるため、隕石(以下供試体)において加熱率を高加熱率(14.1[MW/m²]), 低加熱率(10.8[MW/m²])と変化させて実験した場合と、大気突入速度が高速(ペルセウス座流星群 $v=59\text{km/s}^{[2]}$), 低速(ふたご座流星群 $v=35\text{km/s}^{[2]}$)の流星群のスペクトルと比較することで、加熱率や大気突入速度が流星発光の黒体温度、原子・分子の発光強度時間変化とどのように関連しているのかを明らかにすることを目的として調査を行った。

3. 実験装置及び計測・観測機器

3.1 アーク加熱風洞(惑星大気突入環境模擬装置)

本実験では、JAXA/ISASに設置されているアーク加熱風洞(惑星大気突入環境模擬装置)を用いてメテオロイドの地球大気突入を模擬した実験を行った。アーク加熱風洞は大気圏突入をする宇宙往還機の耐熱試験などを行う装置である。

Table 3.1 Operating condition of Arc-Heated Wind Tunnel

電流	450A
電力	約600kW
チャンバー内圧	約20Pa
主流総エンタルピ ^o	約14MJ/kg
加熱率	14.1-9.5MJ/m ²

3.2 供試体

実験では以下の隕石を円柱形状(高さ10mm, 直径10mm)に削り出し使用した。

Table 3.2 List of sample

隕石名称	隕石種別	加熱率[MW/m ²]	質量[g]
NWA8612	L6 Chondrite	14.1	2.6989
	S4 W2	10.8	2.7713

3.3 分光器(実験)及びハイスピードカメラ

スペクトル計測用の分光器には、Ocean Opticsの分光器QEProとHR4000を用いた。また、HR4000には集光レンズを取り付け供試体からの分光を行った。Ocean Opticsの校正光源HG-1(水銀及びアルゴン輝線)を用い、3次近似で取得波長-真波長関係を導出した。また、QEProはOcean Opticsの校正光源HL-3を、HR4000はOcean Opticsの校正光源DH-3を用い、カウント値-発光強度の関係を導出した。

また、ハイスピードカメラはVision ResearchのPhantom V1612にレンズはTokinaのAT-X M100 D 100mm F2.8(実験時F5.6)を取り付け計測した。

Table 3.3 Specification of spectroscope

機器名	QEPro	HR4000
波長域[<i>nm</i>]	250-1050	200-1100
波長分解能[<i>nm</i>]	0.75	0.25
積分時間[<i>sec</i>]	1/30	1/30
フレームレート[<i>fps</i>]	30	30

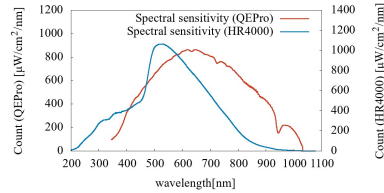


Fig. 3.1 QEPro and HR4000 spectral sensitivity

Table 3.4 Specification of high-speed camera

画素数	1280×800
露光時間	1μs
フレームレート	1000 fps

3.4 カメラ及び分光器(観測)

天然流星の観測では、デジタルカメラSONYα7s(赤外改造済)、写真用レンズ、透過型回折格子(600本/mm)を用いて観測を行った。透過型回折格子に光を通すとFig.3.2のような画像が得られる。

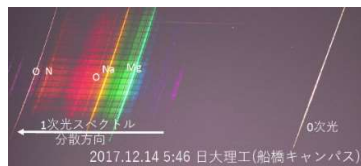


Fig. 3.2 meteors spectrum image

Fig. 3.3の0次光とは流星をそのまま画像として得たものである。今回の観測ではこの流星の光を波長ごとに分解したスペクトルのうち1次のスペクトルを扱う。

続いて、カメラ及びレンズの諸元を以下に示す。なお、本観測は2016年-2018年にかけて行われているが、2016,2017年はレンズ#1、2018年はレンズ#2を用いている。

Table 3.5 Specification of SONY α7s and lens

カメラ		レンズ#1	
製造元	SONY	製造元	SIGMA
製品名	ILCE-7S	製品名	35mm F1.4 DG HSM
露光時間	1/30 [s]	レンズ#2	
フレームレート	29.97 [fps]	製造元	SIGMA
動画撮影時解像度	3840 × 2160	製品名	24mm F1.4 DG HSM

分光器同様にカメラのセンサーは波長によって感度が異なる。そこで、Ocean Opticsの校正光源HL-3を用いて感度曲線を作成した。なお、取得した画像データにはガンマ曲線が掛けられていることが分かったため、 $\gamma=1$ とする補正をかけたうえで全てのデータ処理を行っている。解析において、スペクトル画像をカラーからグレースケールへ変換したうえで以前は処理を行っていたが、今回の解析ではカラー画像をそのまま処理している。そのため、RGBごとの感度曲線が必要である。これをFig.3.3に示す。また、カメラの設定が2016,2017年と2018年で異なるため、それぞれの感度曲線を示してある。

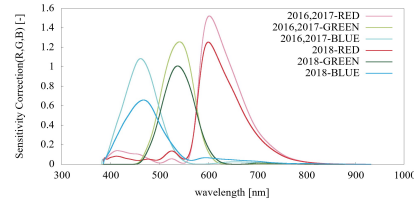


Fig. 3.3 SONY α7s spectral sensitivity

4. 実験

4.1 結果

Fig. 4.1の実線部分は、発光強度(波長範囲 345-1000nm)の時間変化(ライトカーブ)を示す。Fig. 4.2にFig. 4.1のシンボルプロット(最大発光点)でのスペクトルを示し、これらのスペクトルからTable 4.1の輝線とFig. 4.2の輝線を同定した。

Fig. 4.2のスペクトルには輝線とともに黒体放射がみられ、供試体の発光には原子・分子による発光だけでなく、黒体放射が強いことがわかる。そこで、発光中の供試体を黒体と仮定し、輝線成分を取り除いたスペクトルに式(4.1)のAとTを変数として、プランクの法則を近似(近似範囲: 440 - 1000nm)することで黒体放射温度を推定した(Fig. 4.1)。

$$I(\lambda, T) = A \cdot 8\pi hc / \lambda^5 / (\exp(hc / \lambda kT) - 1) \quad (4.1)$$

$I(\lambda, T)$ [μW/(cm²・nm)] : 発光強度,

A : 放射率, 形態係数, 発光面積を含む変数, λ [nm] : 波長,

T [K] : 黒体放射温度,

$h = 6.6260755 \times 10^{-34}$ [J・s] : プランク定数,

$c = 2.99792458 \times 10^8$ [m/s] : 光速,

$k = 1.3806503 \times 10^{-23}$ [J/K] : ボルツマン定数

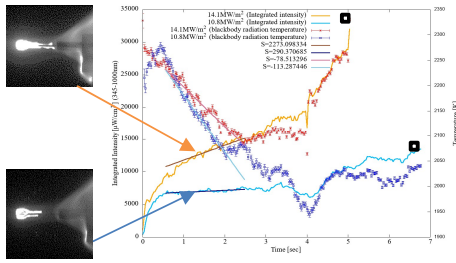


Fig. 4.1 Time variation of Integrated intensity and blackbody radiation temperature

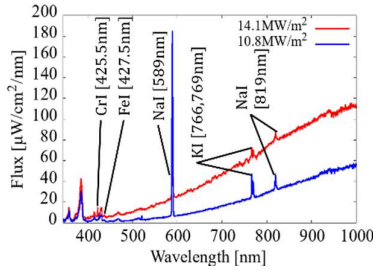


Fig. 4.2 Spectrum

Table 4.1 Experiment Spectrum Identification

加熱率	Wavelength [nm]
14.1MW/m ²	368, 372, 373, 5,375, 382, 393,
	404.5, 407, 427, 5,438, 520.5, 533, 541 (Fe)
14.1MW/m ²	425.5, 429 (CrI)
	427.5, 438, 520.5(FeI)
10.8MW/m ²	425.5, 429 (CrI)
	427.5, 438(FeI)
	425.5, 429 (CrI)

4.2 考察

Fig. 4.1より、急増光以降(0.6秒以降)のライトカーブと黒体放射温度変化の傾きに加熱率による差がみられたため、Fig. 4.1に対し線形近似(範囲:1-2秒)をし、求めた傾きSを凡例に示す。この結果より、ライトカーブは高加熱率のほうが傾きが急であり、黒体放射温度は高加熱率のほうが温度低下の傾きが緩いことがわかる。

そこで、式(4.1)の1-2秒におけるAの時間変化をFig. 4.3に示し、図中に傾きをSlopeとして示す。

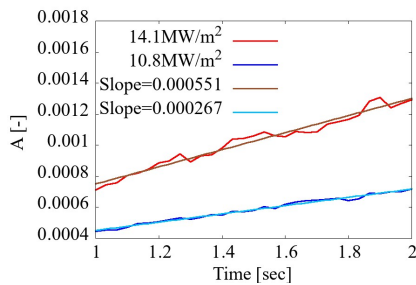


Fig. 4.3 Time variation of A

Fig. 4.3 から変数Aの傾きに差がみられた。そこで、1-2秒におけるハイスピードカメラの画像から発光している部分の面積をImageJを用いて求め、その時間変化を表すグラフをFig. 4.4に示し、傾きを図中にSlopeとして示す。

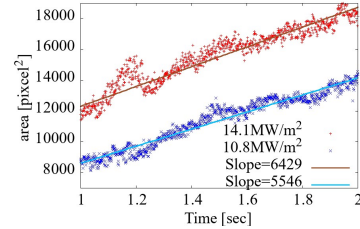


Fig. 4.4 Time variation of light-emitting area

ここから、高加熱率のほうが発光面積の増加量が多いことがわかる。

以上のことから、以下のことが考えられる。

・高加熱率

発光面積の増加具合が急で黒体放射温度の低下が緩やかであり、発光面積の増加が上回り、積分発光強度が急激に増光した。

・低加熱率

発光面積の増加具合が緩やかで黒体放射温度の低下が緩やかで黒体放射温度の低下が急であり、発光面積の増加と黒体放射温度の低下が相殺し、積分発光強度がほぼ横ばいになった。

また、本実験ではノズル出口からの距離を変化することで加熱率を変化させている。そのため、供試体がアブレーションするとノズル出口からの距離が遠くなり、黒体放射温度が低下している。

5. 観測結果

今回の観測では、2016年の8月11日~12日にかけてペルセウス座流星群を、2017年12月13日~14日、2018年12月13日~14日及び2018年12月15日~16日にかけてふたご座流星群を観測した。この二つの流星群は大気突入速度が異なり、ペルセウス座流星群は59km/s^[2]、ふたご座流星群は35km/s^[2]である。大気突入速度によって流星物質が受ける加熱率は異なり、速度の約3乗に比例して加熱率も上がる。そこで、速度による加熱率の差について比較するために、まずは大気由来の成分について論じるため、Fe-I5を基準としてOI-I[777nm] (10.7 eV)、OI-10[616nm] (12.8 eV)、NI-3[747nm] (12.0 eV)との強度比を取ったグラフを以下に示す。

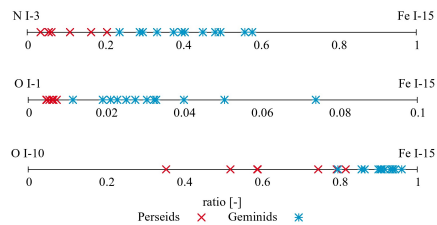


Fig. 5.1 Perseids and Geminids line intensity ratio^{[3][4]}

Fig. 5.1よりOI-I[777nm], OI-10[616nm], NI-3[747nm]の強度がふたご座流星群に比べて、ペルセウス座流星群の方が強いことがわかる。このことより、対地速度が大きくなると加熱率が高くなり、励起エネルギーの高い大気成分が励起されたと考えられる。

続いて、流星物質由来の輝線について比較するため、それぞれの流星群のMgI-2[518nm], FeI-15[527-545nm], NaI-1[589nm]の輝線の強度比を取った。これをFig. 5.2に示す。

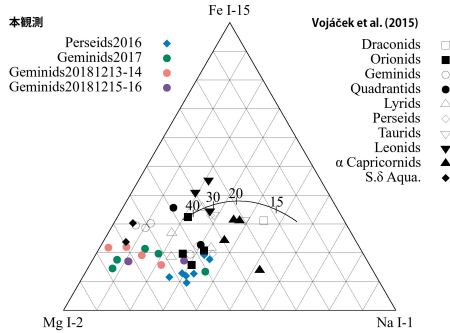


Fig. 5.2 Meteor Mg-Fe-Na Diagram [3], [4], [5]

この三角ダイアグラムにある曲線は先述にもある通り、曲線上の数字によって示される対地速度[km/s]毎の普通コンドライトのアブレーションによる組成比を示しており(40km/s以上はほぼ一定)、同じ組成を持つ流星物質でも速度の違い、すなわち加熱率の違いによる励起温度の変化で輝線強度の比率が変わることを示している[5]。流星物質がコンドライトで構成されていれば、この曲線の上または若干Feが少ない位置に点が来ることが知られている[5]。

Fig. 5.2より、ペルセウス座流星群は流星物質がコンドライトで構成されていることが分かる。ただし、一部の点ではFeの輝線が弱い鉄の少ない流星物質である可能性がある。続いて、ふたご座流星群であるが、これらの点は曲線から離れており、Naの量が少ないことが分かる。スペクトルにおいてもNaが少ないことが見て取れるため、ふたご座流星群の流星物質からNaが枯渇していると考えられる。

これらのことより、流星物質由来の輝線の加熱率による違いは、輝線そのものの強度が流星物質の組成に左右されるため、今回の観測からは判断し難いといえる。

6. 励起温度

流星スペクトル中の真の相対強度をもとに、熱的な平衡状態を仮定すると、以下の式(6.1)[6]から励起温度 T_e を算出することが出来る。

$$T_e = \frac{E_i - E_j}{k \log\left(\frac{A_{ki}g_{ki}/I_{ki}}{A_{kj}g_{kj}/I_{kj}}\right)} \quad (6.1)$$

$k = 1.3806503 \times 10^{-23} [J/K]$: ボルツマン定数,

I_{ij} : 準位 i から j への遷移による発光強度, λ_{ij} : 波長 [nm],

E_i : 準位 i の基底状態からの励起エネルギー[eV],

g_i : 統計的重率[-], A_i : 遷移確率[1/s]

Fig. 6.1 に Fe I の輝線を用いて導出した実験の加熱率 $14.1 [MW/m^2]$ 時の励起温度, Fig.6.2 にペルセウス座流星群, Fig.6.3 にふたご座流星群の観測の励起温度を示す。

実験で得られた励起温度は、観測の励起温度に比べ小さくなった。実験は空力加熱が輻射加熱に対して優位の加熱環境であり、天然流星は輻射加熱が優位の加熱環境である。従って、実験の空力加熱率が天然流星の加熱率を下回ったと考えられる。観測で得られた励起温度を見ると、負の値が出ている流星や、全体的に誤差がとても大きくボルツマンプロットが散らばっている。これらの結果が得られた原因として二つ以上の輝線が重なりあったものを分離せず一つの輝線として強度を算出していることが考えられる。しかし、ペルセウス座流星群、ふたご座流星群ともに大半の流星は右肩下がりなボルツマンプロットを示し、励起温度の概算はできていると考える。しかし、ふたご座流星群はペルセウス座流星群よりも速度が遅く励起温度は小さく出ると予想できるが、今回の結果では同程度の励起温度となってしまった。

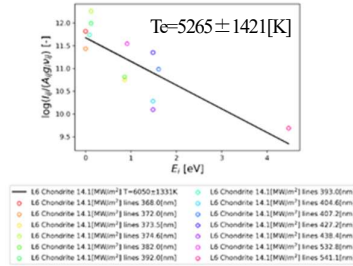


Fig. 6.1 Boltzman plot

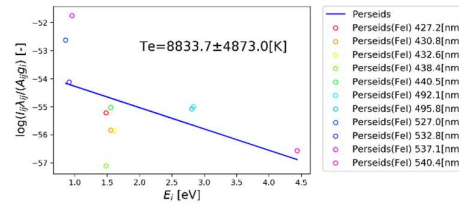


Fig. 6.2 Boltzman plot

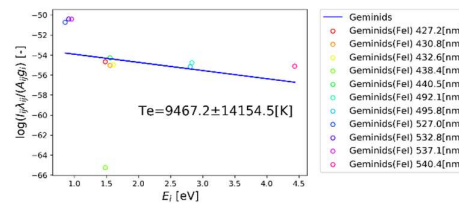


Fig. 6.3 Boltzman plot

参考文献

- [1] S.Abe : Meteoroids and Meteor-Observations and Connection to Parent Bodies, Lecture Notes in Physics, 758, 2009, pp129-166
- [2] Jürgen Rendtel : 2018 Meteor Shower Calendar, IMO, 2017, pp.11,12,21
- [3] Moore Ch.E. : A Multiplet Table of Astrophysical Interest, 1945
- [4] J. Borovička : A survey of meteor spectra and orbits : evidence for three populations of Na-free meteoroids, 2005, pp19
- [5] V. Vojáček : Catalogue of representative meteor spectra, 2015, pp5-6
- [6] 山田諒 : プラズマの発光からプラズマを知る, 1993, pp790