

アーク加熱風洞による流星アブレーションの分光計測および発光効率の研究

Meteor Ablation and Luminous Efficiency Characterization by Emission Spectroscopy using Arc-heated Wind Tunnel

大木 紘介, 松山 誉, 小川 巧 寛, 宮下 敦 希, 阿部 新 助, 日 大 理 工
木村 菜 摘, 山下 矩 央, 平野 航, 石川 圭, 工藤 福 太, 佐原 宏 典, 首 都 大
下 田 孝 幸, 長 井 遵 正, 吉 田 哲 生, JAXA/ISAS
ルマル・アドリアン, 蒲池 康, 岡島 礼 奈, 株 式 会 社 ALE

The present paper introduces the experimental campaigns carried out at JAXA ISAS arc-wind-tunnel facility under various heating conditions representative of meteor entry into Earth's atmosphere. Various materials were tested in support of Astro Live Experiences (ALE) mission and this paper focuses on iron. Emission spectroscopy measurement were undertaken to characterize the brightness of the material and infer the thermal response and subsequent light curve. High-speed camera images were analyzed to infer the structural response and mass loss rate. The combination of the values of brightness and mass loss rate yield the brightness luminous efficiency, which is the parameter of paramount importance in the community. Subsequently, the luminous efficiency of the sample was correlated to the impinging heat flux and compared to literature results. These experimental campaigns provided additional data to strengthen the models currently in use and therefore advanced the knowledge of meteor entry modeling and characterization.

1. 研究背景

1.1 天然流星

流星とは、小惑星や彗星を起源とするメテオロイドと呼ばれる流星物質が秒速 12-72km の超高速で地球大気に突入する際、大気との衝突励起によってメテオロイドの構成物質と大気に含まれる原子分子の双方がプラズマ発光する現象である^[1]。流星を多点撮像や分光観測することによって、惑星間軌道やスペクトルの組成情報から母天体の間接調査が可能となる。流星は自然現象であるため、分光データを得るために待ち受け観測が広く行われているが、広視野をモニターするため空間分解能が低く良質なデータを取得することが難しい。また、メテオロイドの大気突入前の組成・形状・質量・密度などは推定することになり、シミュレーションなどによりアブレーション発光を理解することは難しい。

1.2 人工流星

密度や物性が既知な流星体を突入速度・時刻・場所を制御しながら人工的に流星を発生させる試みが 1940 年頃から行われている。1960 年代に NASA ラングレー研究所が行った実験では、発光効率が予想に反し約 10 倍大きい値を示した、当時の観測機器の精度や実験回数が少なかったことに問題があると考えられている。

株式会社 ALE は、人工流星による科学とエンターテインメントの実現を試みている。人工流星を用いた最高精度の観測が成功すれば、流星科学・超高層大気科学・再突入物理などの学際領域に新たな展開をもたらすことが予想される。

1.3 人工流星実験

阿部研究室で、は 2014 年から流星体の発光特性と材料特性との関係の調査を目的とし、(株)ALE と共同研究を行っている。今日までに 40 種類以上の供試体を用いた実験を行い、分光計測と高速度カメラを用いた撮像計測を行ってきた。JAXA/ISAS の惑星大気突入環境模擬装置（アーク加熱風洞）を用いた流星アブレーション実験は、人工流星の理解にも役立つと考えられている。

1.4 発光効率

流星の運動エネルギーのうち特定波長の発光エネルギーに変換される割合が発光効率であり、1950 年代に Opik^[2]によって理論的に提唱された 0.2% という値が今日でも広く用いられている。発光効率は突入速度に依存すると考えられ、様々な理論モデルが提案されてきたが、実験的に検証された例は殆どなく、解明には至っていない。また、秒速 20km 以下の低速流星は、天然で観測されるケースが非常に少ないため、秒速 8km の低軌道からの人工流星実験の室内模擬実験が重要となる。また、天然の流星では、測光質量あるいは減加速度から流星の質量推定が行われているが、質量減少率を精密に推定する事が、正確な発光効率導出には欠かせない。

1.5 研究目的

組成と密度を制御し独自に製作した流星模擬体を用いたアーク加熱風洞を用いたアブレーション実験を行い、突入速度変化を加熱率変化させることで模擬し、発光効率の変化を調べることが、本研究の目的である。

2. 実験概要及び解析概要

2.1 実験装置及び供試体

アーク加熱風洞は、作動ガスをアーク放電によって高温化し、試験室に噴出する装置であり、地球帰還カプセルの耐熱試験や宇宙往還機の熱防護材の研究開発などに用いられている。

本研究では、加熱率を 14.1, 12.2, 10.8, 9.5[MW/m²]に調節するためアーク噴射口から供試体先端までの距離(ノズル距離)を 50, 60, 70, 80[mm]に変化させ実験を行った^[3]。

2.2 観測装置

以下に観測に用いた分光器とレンズ、高速度カメラの諸元を載せる。

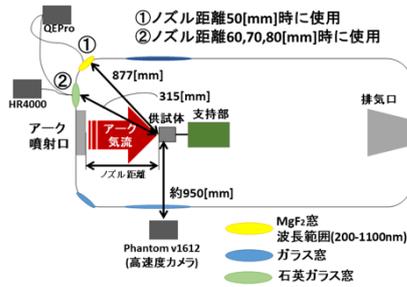


Fig.1 Configuration of Arc-heated Wind Tunnel

Table. 1 Operating conditions

電流[A]	450			
空気圧[MPa]	0.5			
ノズル距離[mm]	50	60	70	80
加熱率[MW/m ²]	14.1	12.2	10.8	9.5

※加熱率はスラグ式カロリーメータを使用し算出

Table. 2 Test sample

組成	質量[g]	空隙率 [%]	加熱率 [MW/m ²]	サンプル数 [個]
Fe	6.18-6.10	6.89-6.69	14.1	2
	6.20-6.18	7.87-6.85	12.2	3
	6.20-6.18	8.1-6.18	10.8	2
	6.19	6.4	9.5	1

※すべてΦ10[mm]、高さ10[mm]の円柱形状

Table. 3 Specifications of spectrometers and lens

製造元	Ocean Optics
製品名(分光器)	QEPro
波長域 [nm]	250-1100
波長分解能 [nm]	0.75
露光時間 [s]	1/30
フレームレート [fps]	30
製造元	HR4000
製品名(分光器)	HR4000
波長域 [nm]	200-1100
波長分解能 [nm]	0.26
露光時間 [s]	1/30
フレームレート [fps]	30
製造元	74-UV
製品名(レンズ)	74-UV
波長範囲 [nm]	200-2000
絞り [-]	2

Table. 4 High speed camera (Phantom v1612) specifications

製造元	Vision Research
画素数	1280(H)×800(V)
撮影速度(観測設定値) [fps]	1000
感度(ISO/ASA)	100000
露光時間(観測設定値) [μs]	1



Fig. 2 Focusing lens setup (HR4000 spectrometer)

2.3 解析概要

解析に用いた手法について述べる。

A) 発光時間変化 (ライトカーブ)

本研究ではライトカーブを分光器で得られたデータ内の380-780[nm]の発光強度の積分値の時間変化と定義する。積分発光強度の単位は補正を行っていないためカウント値である。

B) 黒体放射温度

強度補正を行ったスペクトルから原子・分子輝線を取り除いたスペクトルからプランクの法則((1)式)を用いてフィッティングを行い、黒体放射温度を算出した*4。

$$I(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1)$$

I:発光強度, h:プランク定数=6.62607004 × 10⁻³⁴[J.s]

c:光速=299792458[m/s], T:黒体放射温度[K]

k:ボルツマン定数=1.38064852 × 10⁻²³[J/K]

C) Vバンド(500-590nm)等級

本研究ではジョンソン測光システム((2)式)を用いて V 等級(絶対等級; 天頂高度 100km に補正)を算出した。

$$\text{mag}_\lambda = -2.5 \log(f_\lambda) - 21.100 - z_p(f_\lambda) \quad (2)$$

mag_λ:等級[-], f_λ:発光強度[10⁻¹¹ergs/cm²/s/Å]

21.100:ゼロ点, z_p:等級原点

D) 発光効率

流星における発光効率は、流星の持つ運動エネルギーがどれだけ発光エネルギーに変換されるかを示す値である((3)式)。

$$I = -\tau \frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

τ:発光効率[-], dm/dt:質量減少率[kg/s], v:速度[km/s]

本研究では速度 v は CEA^[4]解析によって求められた風洞内噴射速度(3.64km/s)を使用した^[5]。

発光強度 I は高度 100km の V バンド等級を用いて(4)式と(5)式よりを算出した^[6]。

$$I_v = 10^{-0.4M_v} \quad (4)$$

$$\frac{I}{I_v} = \frac{2.30 \times 10^4 T^4}{\sqrt{V_\lambda B_\lambda(T)} d_\lambda} \quad (5)$$

I_v:V バンド発光強度[10⁻⁷W], M_v:V バンド平均等級(100km)[-],

V_λ:V バンド[nm], B_λ:黒体放射[W/nm]

質量減少率は高速度カメラ(1μs, 1000fps)の画像解析より算出した。

E) 加熱率と流星速度

本研究ではDetra-Kemp-Riddelの式(式6)を用いて加熱率を高度100kmにおける流星の速度に変換した^[7]。

$$q = \frac{110.35}{\sqrt{R_n}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s}} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{3.15} \quad (6)$$

q:加熱率[MW/m²], R_n:Nose Radius[m], ρ_s = 1.18[kg/m³]:Air Density at the Sea Level, ρ = 5.60 × 10⁻⁷[kg/m³]:Air Density at an altitude of 100km, V₀=7.93[km/s]

3. 実験結果

Fig.3に同じ供試体を2台の分光器で計測した際のライトカーブを示す。QEPro分光器にはコサインコレクターを、HR4000分光器には集光レンズを装着し、Fig. 2のように供試体だけの発光計測を試みた。

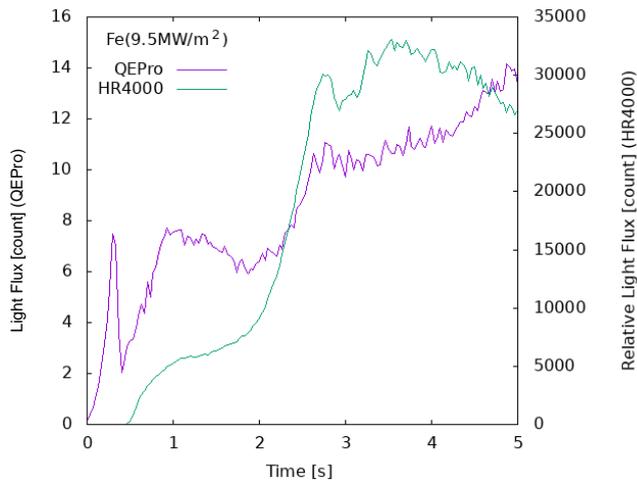


Fig.3 Time variation of luminosity measured by QEPro with cosine corrector and HR4000 with focused lens.

Fig.4に各加熱率におけるライトカーブとVバンド等級の時間変化の一部を示す。赤・青・緑に囲まれた範囲は解析範囲を示している。

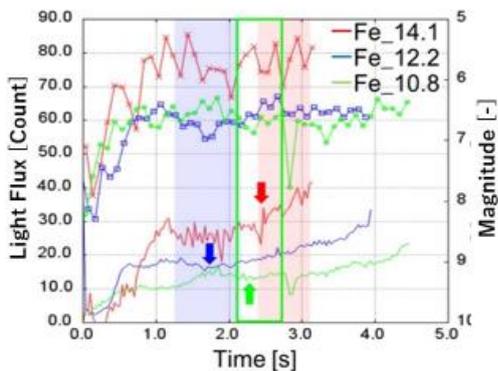


Fig.4 Time variation of luminosity (solid lines) and corresponding V-magnitude assuming 70km distance (lines with marked).

次にFig.4の矢印におけるスペクトルと黒体放射(2083K)をFig.5に示す。今回の解析ではFe, Na, Kの輝線を同定した。昨年までのスペクトルに比べ今回の供試体の主成分であるFe Iの輝線が強く表れた。次に質量の時間変化と平均質量減少率をTable.5, Fig.6に示す。誤差は解析範囲における標準偏差である。各供試体は時間経過とともに摩耗するためノズル距離が次第に大きくなる。それに伴い加熱率が変化するため解析範囲における平均加熱率を再計算した。便宜上供試体名には元の加熱率を使用する。同様の解析を行った7サンプル各々の平均加熱率と平均発光効率をTable.6, Fig.7に示す。

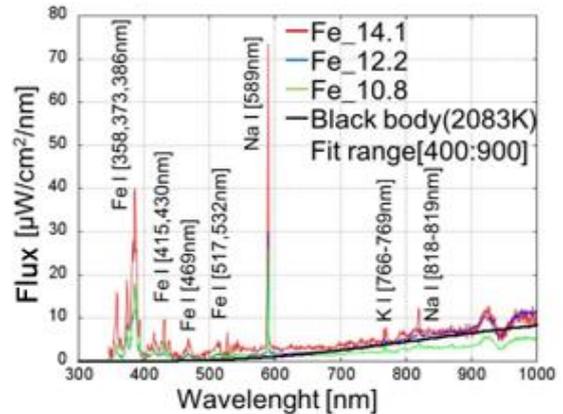


Fig.5 Spectrum (Atomic lines and fitted black body)

Table.5 Average heat flux and mass loss rate

加熱率 [MW/m ²]	平均加熱率 [MW/m ²]	平均質量減少率 [g/s]
14.1	13.21 ± 0.21	1.58 ± 0.34
12.2	11.84 ± 0.11	1.34 ± 0.61
10.8	10.46 ± 0.09	1.25 ± 0.76

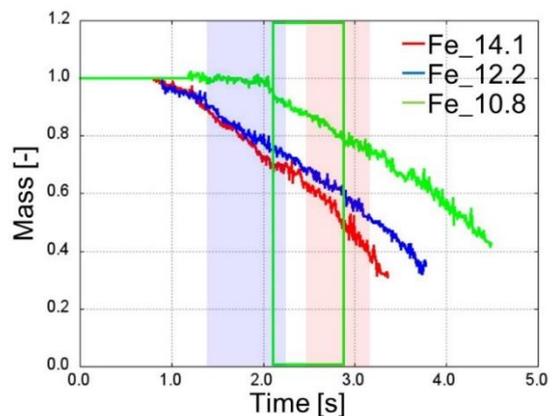


Fig.6 Mass loss rate of samples

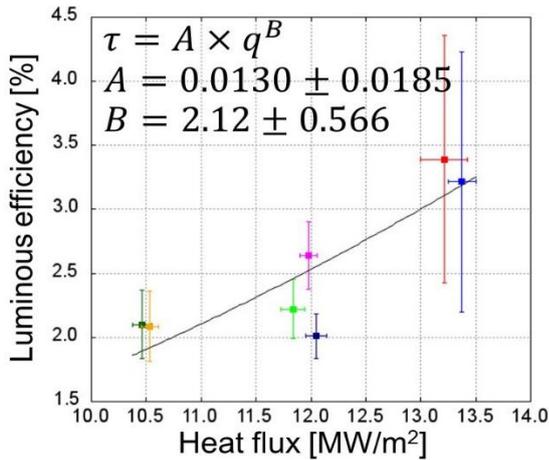


Fig.7 Luminous efficiency

次にノズル距離によって流速が変化する場合を考える。噴出方向の中心軸上の流速のみを考え、以下の式⁸⁾を用いて発光点の流速を求めた。

$$V_x = V_0 \times \left(1 + (C - 1) \times \frac{x}{x_0}\right) \quad (7)$$

V_x : x 地点流速[m/s], $V_0=3.64$ [km/s]:ノズル出口($x=0$)流速, $x_0=50$ [mm]:基準距離, C :定数[-], x :ノズル距離[mm]

定数 C は1より小さい値で、 $x=x_0$ における V_x/V_0 を表している。 C を0.66, 0.77, 0.88, 0.99と変化させた場合の各サンプルにおける流速 V_x と V_x を考慮した発光効率をTable.7, Fig.8に示す。また、Fig.7中の式でフィットした際の A , B をTable.8に示す。風洞内流速以外のパラメータはTable.6と同様である。

4. 考察

4.1 ライトカーブと質量減少率及び黒体温度

Fig.3よりレンズを装着せずに発光を計測したライトカーブには、発光開始直後一時的な増光が確認された。これはFig.4のライトカーブにも確認されている。しかし、Fig.3のレンズを装着し発光を計測したライトカーブの同時刻には、そのような増光は確認できなかった。

また、Fig.3においてレンズを装着せずに発光を計測した分光器のスペクトルを確認すると一時的に黒体放射特有の連続放射(Planck curve)が見られたが、レンズを装着した分光器のスペクトルにはそれは計測されなかった。このようにレンズの有無によって計測データに差異が生じることが明らかになった。

Fig.4より加熱率が高い供試体のほうがより強い発光をしていることがわかる。どの供試体においても発光開始1秒後以降に発光が安定している。これは発光開始直後の供試体温度、供試体周りの気流が安定していないためだと考えられる。また、加熱率が高いほど発光時間が短い。このことはFig.6の質量減少率を見ても明らかである。

Fig.6より加熱率が低くなるほど発光開始直後における質量の減少が緩やかであることがわかる。これは供試体が十分に

加熱されるまでの時間に差異があるからだと考えられる。加えて、加熱率が低いほど質量減少率が低くなっていることがわかる。これには以下の二つの理由が主に考えられる。

① 供試体温度に伴う粘度の影響

今回、供試体に用いた供試体は鉄である。融点は1811[K]であるため黒体温度を考慮すると溶融していると考えられる。溶融した金属は温度が高いほど粘度が低くなるため供試体から剥がれやすくなる。そのため質量減少率は高くなると考えられる。しかし、今回の解析範囲では加熱率12.2と14.4では加熱率14.4の方がわずかに黒体温度が高いが質量減少率は低い。そのため今回の実験では粘度による影響ではないと考えられる。

② 動圧の影響

これまでの解析は供試体前方の流速はノズル距離にかかわらず一定と仮定してきた。しかし、実際の流速はノズル距離が大きくなるほど小さくなる。そのため、ノズル距離が大きくなるほど供試体にかかる動圧は小さくなる。今回の実験における質量減少率の違いは動圧による影響とえるほうが自然である。

4.2 発光効率(定速仮定)

今回の実験において天然の流星では観測されることが少ない低速流星の発光効率を実験的に算出することができた。その値は、流星速度約17.6[km/s](加熱率約13[MW/m²])で3.3%程度になり、天然の火球(流星速度 ≤ 36 [km/s])の観測から求められた発光効率である4%⁹⁾と近い値になった。このことから、本研究で求めた風洞内速度、黒体温度、発光強度、質量減少率は正確な値が取得できたと考えられる。また、今回の7サンプルを用いた実験では加熱率と発光効率は正の相関を示し、発光効率は加熱率の約2乗に比例することが示された。

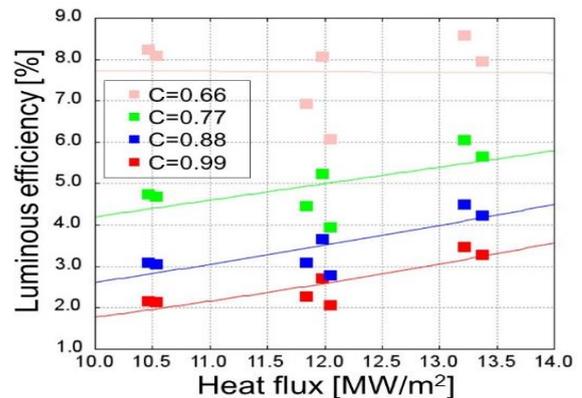


Fig.8 Luminous efficiency

Table.8 Constants A, B for different values of C

C	A	B
0.66	8.13 ± 10.63	-0.02 ± 0.53
0.77	0.47 ± 0.63	0.96 ± 0.54
0.88	0.06 ± 0.09	1.61 ± 0.55
0.99	0.01 ± 0.02	2.08 ± 0.57

4.3 発光効率

C=0.66では発光効率は加熱率によらず横ばいになっている。ただ、加熱率12.0では大きく外れている値があるため今回の実だけではC=0.66は適切でないと言える。

4.1-②で述べたように質量減少率が動圧(流速)に比例する場合を考えると質量減少率は速度の2乗に比例する。C=0.77での流速を用いて加熱率14.1の質量減少率(1.58[g/s])を基準に考えると加熱率12.2, 10.5でそれぞれ14.2, 1.25[g/s]となり高速度カメラから得られた質量減少率と近い値を取った。

5. 結論

- ・可視光(V等級)での発光効率は、加熱率12[MW/m²]前後で2~3%となった。
- ・加熱率13.2[MW/m²]における発光効率は約3.3%を示し、天然の火球より求められた値と近い値となった。
- ・ノズル距離による流速の減速モデルを考慮すると、発光効率は加熱率の約2乗に比例することが推測される。しかし、加熱率の変化を更に大きくしないと、その変化は明瞭でない。

参考文献

- [1] S. Abe, "Meteoroids and Meteors - Observations and Connection to Parent Bodies", Lecture Notes in Physics, 758, 129-166, 2009.
- [2] E. J. Opik, "Physics of Meteor Flight in the Atmosphere", Interscience tracts on physics and astronomy. No. 6. Ed. by R. E. Marshak. London, 1958.
- [3] 下田孝幸, 山田和彦, 高橋裕介, "JAXA 相模原アーク風洞の特性評価", 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集, 2015.
- [4] CEARUN Web Interface, <https://cearun.grc.nasa.gov/>
- [5] W. Hirano, Master thesis, 首都大学東京, 2019.
- [6] Z. Ceplecha, et al., "Meteor phenomena and bodies", Space Science Reviews, 84, 327-471, 1998.
- [7] R. W. Detra et al., "Heat Transfer to Satellite Vehicle Re-entering the Atmosphere", Jet Propulsion, 27(12), 1256-1257, 1957.
- [8] G. Lehnasch, "Contribution à l'étude numérique des jets supersoniques sous-détendus", Ph. D thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2005.
- [9] M. Gritsewich, "Constraining the luminous efficiency of meteors", Icarus, 212, 877-884, 2011

Table.6 Experimental results

加熱率[MW/m ²]	14.1		12.2			10.8	
平均加熱率[MW/m ²]	13.21±0.21	13.38±0.13	11.84±0.11	11.98±0.08	12.05±0.10	10.46±0.09	10.53±0.08
流星速度(100km)[km/s]	17.56	17.63	16.96	17.03	17.06	16.31	16.34
平均黒体温度[K]	2085	2091	1944	2000	1990	2020	2047
平均V等級[-]	5.59±0.32	5.62±0.35	6.70±0.12	6.63±0.11	6.69±0.09	6.62±0.13	6.56±0.14
平均発光強度[W]	353±100	340±107	230±24	189±19	185±16	175±22	165±22
仮定風洞内流速[km/s]	3.64						
平均発光効率[%]	3.39±0.97	3.22±1.01	2.22±0.11	2.64±0.26	2.01±0.17	2.10±0.27	2.09±0.28

Table.7 Luminous efficiency

平均加熱率[MW/m ²]		13.21±0.21	13.21±0.21	11.84±0.11	11.98±0.08	12.05±0.10	10.46±0.09	10.53±0.08
0.66	流速V _x [km/s]	2.29	2.31	2.06	2.08	2.10	1.84	1.85
	発光効率[%]	8.58	7.96	6.94	8.07	6.07	8.24	8.10
0.77	流速V _x [km/s]	2.73	2.74	2.57	2.59	2.60	2.42	2.43
	発光効率[%]	6.05	5.66	4.45	5.23	3.95	4.75	4.69
0.88	流速V _x [km/s]	3.16	3.17	3.08	3.09	3.10	3.01	3.01
	発光効率[%]	4.49	4.24	3.10	3.67	2.78	3.08	3.06
0.99	流速V _x [km/s]	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.59	3.59
	発光効率[%]	3.47	3.29	2.28	2.70	2.06	2.16	2.15