

アーク加熱風洞による流星アブレーションの分光計測

Spectroscopic Measurement of Meteor Ablation using Arc-Heated Wind Tunnel

宮下敦希, 大木紘介, 小川巧寛, 野口拓丸, 佐藤元, 細谷墨, 阿部新助 (日本大学)
平野航, 工藤福太, 内門真凜, 小黒凌, 石川圭, 佐原宏典 (首都大学東京)
Adrien Lemal (株式会社 ALE)
下田孝幸 (宇宙航空研究開発機構)
長井遵正, 吉田哲生 (株式会社 IHI エアロスペース・エンジニアリング)

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. It is difficult that we get high-quality data through observations because most meteoroids are too small to reach the ground and we can't know when and where meteor occurs. The method to assume that kinetic energy is proportional to luminous intensity to estimate mass of a meteoroid has been used. The proportional constant is luminous efficiency. In order to understand the ablation process of meteoroids, meteor ablation tests were carried out using JAXA/ISAS's arc heated wind tunnel. I calculated luminous efficiency using the results.

1. 研究背景

1.1 流星

流星とは、彗星や小惑星を起源とするメテオロイドと呼ばれる惑星間空間に存在する塵が地球上層大気に突入した際に生じる現象である^[1]。このメテオロイドが12-72[km/s]という超高速で地球大気に突入するため、メテオロイドと上層大気が衝突し、衝突励起してプラズマ発光する。この流星を撮像・分光観測することで、メテオロイドの軌道や組成等を知ることができるため、メテオロイドの母天体を間接的に探査することが可能となる。

しかし、流星は自然現象であり発生場所が不明であるため、流星観測では広範囲を監視しており、空間分解能が悪くなり、高精度なデータを取得することが困難である。

1.2 発光効率

メテオロイドのほとんどは、地球大気に突入した際に燃え尽きてしまうため、組成や形状、質量等の情報を得ることができない。そのため、観測された流星の光からメテオロイドの質量が推定されており、発光強度 I と運動エネルギー E_k の関係から以下の式が用いられている。

$$I = -\tau \frac{dE_k}{dt} = -\tau \left(\frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt} + mv \frac{dv}{dt} \right) \quad (1)$$

I : 発光強度[W], τ : 発光効率[-],

m : メテオロイドの質量, v : メテオロイドの対地速度

ここで、発光強度から質量を推定する際に必要な発光効率は未知の係数であり、1933年にOpikが提唱して以降、Fig. 1.1に示すように観測・室内実験・人工流星などの様々な方法で発光効率についての研究が行われてきた。しかし、特に低速領域において発光効率の値にばらつきがあり、いまだに確定されていない。

Subasinghe et al. (2018) は高精度な観測で得られたデータから発光効率を算出している。しかし、発光効率の算出に用いられるメテオロイドの質量は流星の大気による減速具合から算出された値を用いており、質量が推定値であるため、正確な発光効率の算出は困難である。

Becker and Slattery (1973) は直径0.05~1 μ mの粒子をバンデグラフ加速器で加速させ、約27Paの空気に打ちこみ、流星発光を起こし、発光効率を算出した。しかし、実際に観測されるメテオロイドのほとんどはmmサイズであるが、この実験では μ mサイズの粒子が用いられている。また、流星が発光する高度は100km付近であるが、実験時の圧力は高度60km付近の大気圧程度であった。これらのことから、この実験で算出された発光効率を直接的に実際の流星に適用するのは難しい。

Ayers et al. (1970) はロケットを使い、ロケットから球状の物体を発射し、人工的に流星を発生させるという実験を行った。この実験において、供試体の質量や組成等は既知であったため、写真で撮影することで発光強度を測定し、発光効率を算出した。しかし、1フレームの静止画としてのデータのみであるため、初期質量を発光時間で割ることで質量変化率を算出している。このため、正確な発光効率の導出は難しい。

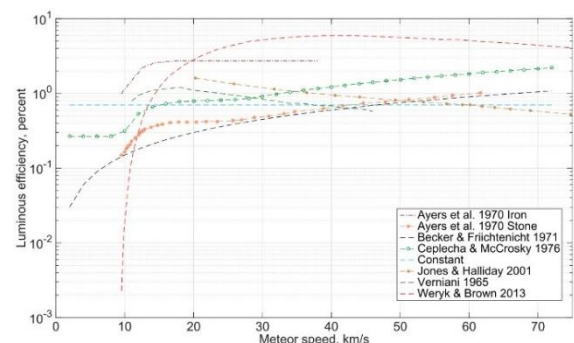


Fig. 1.1 Some of the past work done on luminous efficiency using various methods^[2]

1.3 室内実験

流星現象を模擬することができる実験施設を用い、実験を行うことで、天然流星とは異なり発光点との距離が近く、発光する位置があらかじめわかっているため、高精度のデータを取得することができる。また、実験に用いる供試体の組成や形状、質量等は事前にわかっているため、取得した光の情

報などと照らし合わせることで流星の発光メカニズムの解明につながる。

そこで、JAXA/ISAS所有の惑星大気突入環境模擬装置(アーク加熱風洞)を用いて流星アブレーション実験を行い、分光器による分光計測とハイスピードカメラによる撮像を行った。この実験は実際にメテオロイドに加わるエネルギーを模擬して実験を行っているため、実際の現象に近い状況で実験を行うことができる。

2. 研究目的

流星発光現象のメカニズムについての理解を深めるため、アーク加熱風洞を用いた流星アブレーション実験により、低速度流星における加熱率と発光効率の関係について調査する。

3. 実験装置及び計測装置

3.1 アーク加熱風洞

アーク加熱風洞を用いて流星アブレーション実験を行った。アーク加熱風洞はアーク放電により空気などの作動ガスを加熱し、ノズルによりチャンバー内に噴射することで耐熱材料の試験を行う実験装置であり、宇宙探査機「はやぶさ」の地球帰還カプセルや宇宙往還機の研究開発に用いられている。

ノズル出口から供試体先端までの距離(以下ノズル距離)を変化させることで加熱率を変化させ、実験を行った。また、加熱率の測定には無酸素銅スラグ式のカロリーメータを用いて計測した。

3.2 供試体

隕石を円柱形状(直径10cm, 高さ10cm)に加工したものを供試体として実験を行った。隕石は普通コンドライトであるNWA8612を用いた。

Table 3.1 Operating condition.

電流	450A	
電力	約660kW	
チャンバー内圧	約20Pa	
主流総エンタルピ	約14MJ/kg	
ノズル距離[mm]	70	50
加熱率[MW/m ²]	10.8	14.1

3.3 計測機器

Ocean Insight社製の分光器QEProを用いて分光計測を行い、Vision Research社製のハイスピードカメラPhantom v1612を用い高速度での撮像を行った。なお、分光器の光ファイバ先端にはコサインコレクタを装着し、正確な発光強度を計測した。

Table 3.2 Specification of spectrometer.

波長域	250-1050nm
波長分解能	0.75nm
露光時間	1/30sec
フレームレート	30fps

Table 3.3 Specification of high-speed camera

画素数	1280(H)×800(V)
露光時間(実験時)	1μs
フレームレート(実験時)	1000fps
ISO感度(実験時)	100000

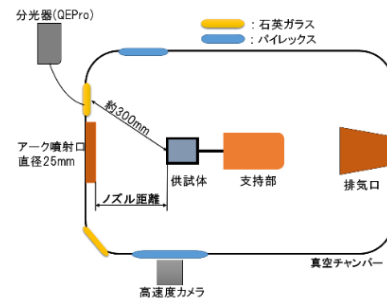


Fig. 3.2 Equipment layout

4. 発光効率の算出方法

今回の実験において、加熱率一定、つまり速度一定とするため、発光効率の算出に用いる式(1)の速度変換に関する項(速度の時間微分項)を無視し、変形すると次のように表せる。発光効率以外の変数は計測により得ることができるため、それらのデータを用いることで発光効率の算出を行った。

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

4.1 発光強度

発光強度 I は分光器から得た単位面積当たりの発光強度に $4\pi \times (\text{供試体からファイバ先端の距離})^2$ をかけることで、全方向における発光強度に変換した値を用いる。

4.2 質量変化率

質量変化率 dm/dt は高速度カメラで撮影した画像から算出する。供試体の先端形状を測定し、実際の供試体の形状に近くなるように残質量を算出した。

具体的な方法を以下に示す。ImageJを用いて、Fig. 4.1(a)のように供試体の上端から下端にかけて明るさを測定し、供試体の先端形状を算出する。その後、Fig. 4.1(b)のように4つに分割して体積を導出し、事前に計測済みの密度から各フレームの供試体の残質量を算出する。そして、この残質量の時間変化から単位時間当たりの質量変化量を導出する。

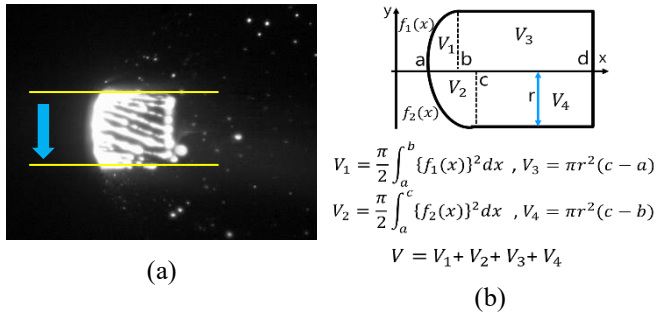


Fig. 4.1 Mass change rate determination method

4.3 速度

式(3)に示すDetra-Kemp-Riddellの式^[3]を用いて、計測した加熱率 q [MW/m²]から速度を算出した。今回は上空100kmで流星が発光したと仮定し、実験で計測した加熱率を上空100kmで受ける時の速度を計算するため、空気密度 ρ は上空100kmでの空気密度を用いた。ただし、今回は右边最終項であるエンタルピ項は1として計算し、計算結果をTable 4.1に示す。

$$q = \frac{110.35}{\sqrt{R}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s}} \left(\frac{v}{v_0}\right)^{3.15} \cdot \left(\frac{h_s - h_w}{h_s - h_{w0}}\right) \quad (3)$$

R : ノズル半径[m], ρ : 空気密度(5.604×10^{-7} [kg/m³]^[4]),
 ρ_s : 空気密度(海上)(1.22500 [kg/m³]^[4]), $v_0 = 7924.8$ [m/s]

Table 4.1 Relationship between heating rate and velocity

ノズル距離[mm]	70	50
加熱率[MW/m ²]	10.8	14.1
速度[km/s]	16.6	18.0

5. 実験結果

5.1 ライトカーブ

Fig. 5.1にQEProにより計測された各供試体の積分発光強度の時間変化(ライトカーブ)を示す。なお、積分波長範囲は可視光域(380-780nm)とした。

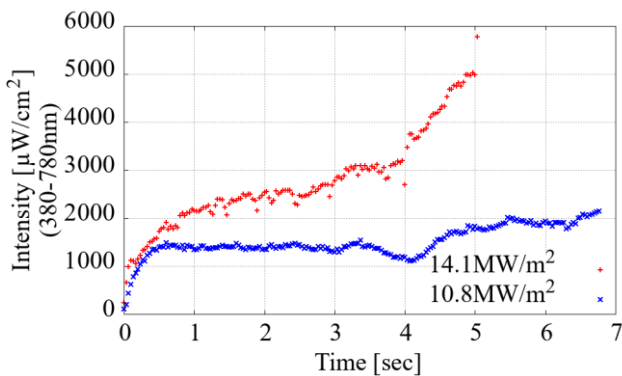


Fig. 5.1 Light curve

5.2 発光強度

4章にて示した方法でVバンド(450-650)の波長域における各供試体の全発光強度の時間変化をFig. 5.2に示す。

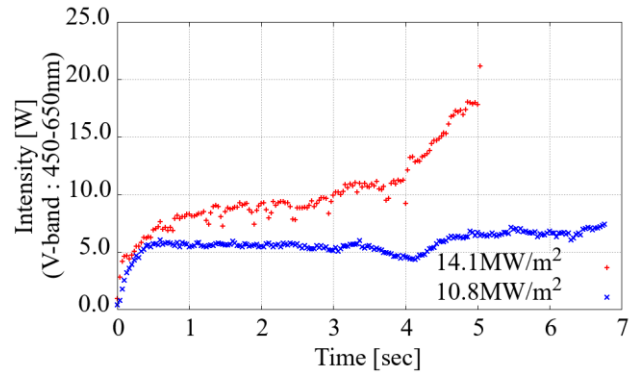


Fig. 5.2 Time variation of total emission intensity

5.3 質量変化率

4章にて示した方法にて算出した各供試体の残質量の時間変化をFig. 5.3に示す。また、今回は残質量の変化が発光開始から1秒以降でしか見られなかったため、1秒以降のデータを示し、発光効率についても発光開始から1秒以降で算出する。

また、高加熱率の供試体については形状を算出できた発光開始から4.45秒後まで、低加熱率の供試体についてはFig. 5.1, 5.2と同じ時間までの残質量の時間変化を示す。

この残質量の時間変化のグラフにおいて、各時間の前後0.05秒を近似範囲として最小二乗法を用いて一次関数にフィッティングを行い、その傾きを各時間における質量変化率とした。また、フィッティングにより求められた各時間における傾きをFig. 5.4に示す。

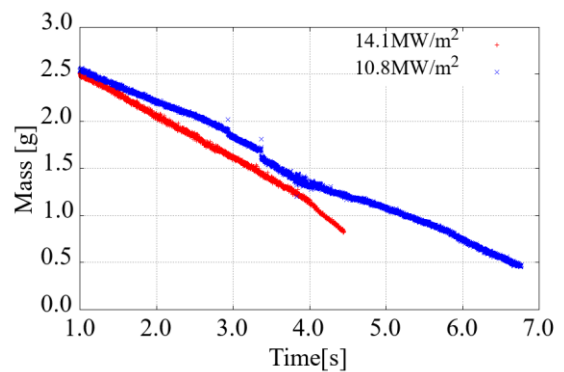


Fig. 5.3 Time variation of mass

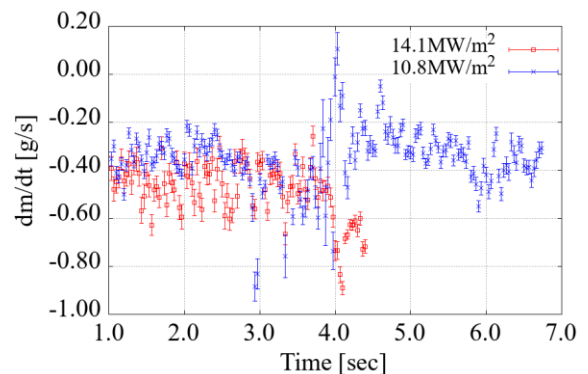


Fig. 5.4 Time variation of dm/dt

5.4 発光効率

Fig. 5.5にVバンドにおける各供試体の発光効率の時間変化を示す。

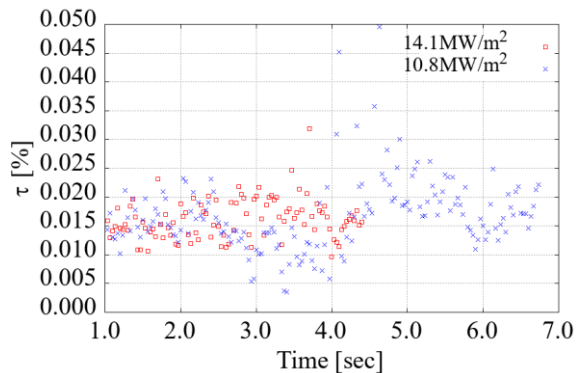


Fig. 5.5 Time variation of luminous efficiency (Vband:450-650nm)

6. 考察

6.1 発光効率

Fig. 5.5より加熱率による発光効率の違いはほとんど見られず、ほぼ一定の値をとることがわかった。

また、低加熱率における発光効率について、3~4秒において発光効率に比較的大きな変化がみられる。そして、Fig. 5.3より同程度の時間において質量が急激に変化していることがわかる。これは比較的大きなフラグメントが発生し、急激な質量減少が発生したためであると考えられる。また、これにより先端形状が二次関数で近似しにくいような複雑な形状となり、質量変化が通常よりも正確に計測できず、Fig. 5.3の4秒付近のように他の時間と比較して質量にばらつきが生じてしまったと考えられる。これによりFig. 5.4からわかるように3~4秒における質量変化率にばらつきが生じ、発光効率の変化につながったと考えられる。

Fig. 5.4より発光効率が 10^{-2} のオーダーである。Table 4.1から今回の実験で再現できた速度は15-20km/sであり、Fig. 1.1の先行研究で求められた同程度の速度域の発光効率は $10^{-1} \sim 10^0$ であり、今回の実験で求められた発光効率のほうが1桁程度小さな値になっていることがわかる。これは、先行研究では黒体放射を仮定し、Vバンドの発光強度から全波長域の発光強度に換算している^[5]ためであると考えられる。

7. まとめ

2種類の加熱率においてVバンドにおける発光効率を求めることができ、加熱率による違いがみられなかった。

8. 今後の方針

8.1 発光効率

Vバンドにおける発光効率は算出することができたが、6章でも述べたように、先行研究では全波長域での発光強度へ換算して発光効率を算出しており、比較のためにも全波長域での発光強度へ換算して発光効率を算出していく。

また、今回は2種類の加熱率においての発光効率しか算出で

きていないため、加熱率と発光効率の関係を調査するためにはサンプル数が少ない。未解析の他の加熱率での隕石の実験データがあるので、このデータを解析することで加熱率と発光効率の関係を調査していく。

8.2 スペクトルと発光の関係の調査

ここまでは、積分発光強度を用いての議論しかできておらず、スペクトルに関する議論ができていないため、スペクトルに関する調査も進めていく。

謝辞

宇宙航空研究開発機構 下田孝幸氏、株式会社 IHI エアロスペース・エンジニアリング 長井遵正氏、吉田哲生氏には実験を行う上で技術的な支援をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] S.Abe: Meteoroids and Meteors-Observations and Connection to Parent Bodies. Lecture Note in Physics, 2009, pp129-166.
- [2] D.Subasinghe, M.Campbell-Brown and E.Stokan: Luminous efficiency estimates of meteors -I. Uncertainty analysis. Planetary and Space Science, Vol. 143, 2017, pp71-77.
- [3] R.W.Detra, N.H.Kemp and F.R.Riddell: Addendum to 'Heat Transfer to Sattellite Vehicles Re-entering the Atmosphere'. JET PROPULSION, Dec. 1957, pp1256.
- [4] 日本航空宇宙学会: 航空宇宙工学便覧. 丸善出版, 第3版, 2005, pp8-13
- [5] Z.Ceplecha, J.Borovicka, et al.: METEOR PHENOMENA AND BODIES. Space Science Reviews, Vol. 84, 1998, pp361-364.
- [6] D.Subasinghe, M.Campbell-Brown: Luminous Efficiency Estimates of Meteors. II. Application to Canadian Automated Meteor Observatory Meteor Events. The Astronomical Journal, Vol. 155, 2018.
- [7] D.G.Becker and J.C.Slattry: Luminous Efficiency Measurements for Silicon and Aluminum Simulated Micrometeors. The Astrophysical Journal, Vol. 186, 1973, pp1127-1140.
- [8] W.G.Ayers, R.E.McCrosky and C.-Y.Shao: Photographic Observations of 10 Artificial Meteors. SAO Special Report 317.