

# Relation between Material Emission, Mass Loss Rate and their Thermophysical Properties to Support Artificial Meteor Design

○山下矩央, 木村菜摘, 平野航, 石川圭, 工藤福太, 佐原宏典, (首都大学東京),  
松山誉, 鴻巣雄貴, 大木紘介, 宮下巧覽, 阿部新助 (日本大学),  
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)

Norio Yamashita, Natsumi Kimura, Wataru Hirano, Kei Ishikawa, Fukuta Kudo, Hironori Sahara,  
(Tokyo Metropolitan University),  
Homare Matsuyama, Yuki Konosu, Kousuke Oki, Atsuki Miyashita, Takumi Ogawa, Shinsuke Abe,  
(Nihon University),  
Takayuki Shimoda, (Japan Space Exploration Agency),  
Junsei Nagai, Tetsuo Yoshida, (IHI AerospaceEngineering Co.,Ltd)

Key Words: Artificial Meteors, Arc Wind Tunnel, Emission, Mass Loss Rate

## Abstract

The plasma wind tunnel facility at JAXA-ISAS was operated at heating conditions close to those encountered by an artificial meteor during its entry into Earth's atmosphere. Various materials were tested, and their spectral and total calibrated brightness were measured in the visible range. It was observed that the brightness was dominated by black-body radiation. Subsequently, the material ablation was characterized by inferring the mass loss rate from camera images. This paper discusses the correlation between the measured emission and the thermophysical properties such as temperature at melting point, diffusivity. The present research suggests materials suitable for artificial shooting stars. The measured data will further used to strengthen the modeling of oxidation and ablation processes to support the design of the artificial shooting star.

## 1. 研究背景と目的

高度 50 km 以上の中間圏より上の大気層は高層大気と呼ばれている。高層大気を観測することで中長期的な気象現象や地球環境あるいは人工衛星の軌道予測に貢献することが出来る。しかしながら、高層大気を観測する手段は非常に限られている。気球では高度 30 km までの観測が限界であるし、人工衛星では高度 300 km 以上からしか観測できない。そのため観測ロケットによる高層大気観測が盛んにおこなわれてきたが、観測ロケットの打ち上げは 1-2 年に一度程度でかつ観測時間が数十分程度と極めて短く、継続的な高層大気観測は実現できていない。

現在、新たな高層大気観測の手法として人工流星源を用いた観測手法が提案されている。人工流星ミッションは人工衛星に人工流星の素となる流星源を搭載

し、人工衛星から放出し大気圏突入させることで、人工的に流星を発生させ、各種科学観測に役立てることを目指すミッションである。人工流星は組成、突入速度、突入角、形状、密度などのパラメータがすべて既知であるため、流星の観測で仮定されていた物理的パラメータを明確にすることができ、より高精度な科学観測が可能である。また人工衛星からの流星源の放出を高精度に行うことで、任意地点任意時間に人工流星を発生させることができ、場所を問わず観測できる。

当研究室では発光強度の観点から人工流星ミッションの検討を行ってきたが<sup>1)</sup>、材料の熱物性値と発光と相関があるのか明確になっていない。また当研究室で開発中の人工流星シミュレータ<sup>2)</sup>で人工流星の軌道を正確に予測するためには、流星源の質量減少率を明らかにする必要があるが、流星源の質量減少率に関するデータは十分に蓄積されていない。

本研究の目的を、人工流星ミッションに適した流星源の検討を行うことと定め、人工流星源の発光強度と熱物性値、質量減少率と熱物性および加熱率との相関関係を分析し、発光の観点から人工流星ミッションに適した流星源の提案を行う。

## 2. アーク加熱風洞を用いた大気圏突入模擬実験

人工流星ミッションに適した流星源を選定するために、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（JAXA-ISAS）に設置されているアーク加熱風洞を用いて大気圏突入模擬実験を行った<sup>3)</sup>。アーク加熱風洞は深宇宙探査機のサンプルリターンカプセルの耐熱材料の開発などに使われる大気圏再突入模擬装置であり、作動ガスがアーク電流によりジュール加熱されることでプラズマ化し、超音速のアーク気流を供試体に吹きつけることによって実験を行う装置である。

アーク加熱風洞の実験条件を表1に示す。この実験条件は、人工流星シミュレータで求めた人工流星加熱率をアーク加熱風洞で再現できるように、スラグ式カロリーメータでアーク加熱風洞の加熱率を計測して、決定した。また供試体のノズルから供試体までの距離を原則70mmとして、加熱率を変える実験をするときに適宜変更した。

表1 アーク加熱風洞転条件

電流	[A]	450
電圧	[V]	1550
電力	[kW]	700

供試体は様々な純金属、合金、セラミックを用意した。また、供試体のサイズはφ10×10mmの円柱に統一した。ただし、一部材料はφ10mmの球である。

観測機器は発光強度を測定するために分光器を用意した。また、質量減少率を測定するために高速カメラと一眼レフカメラを用意した（図1）。

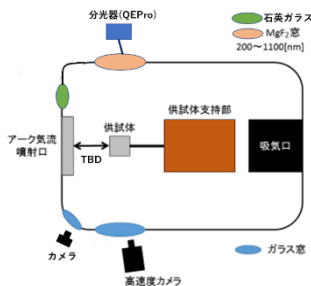


図1 観測機器配置図

以下に実験結果を示す。融点が2,000K以上の高融点金属の発光強度の時間変化を図2に示す。縦軸が発光強度、横軸が時間となっている。これより、Taの発光強度が一時的に急激に増大した後、急激に減少しているのに対して、MoやWは比較的緩やかに発光強度が増大していることがわかる。

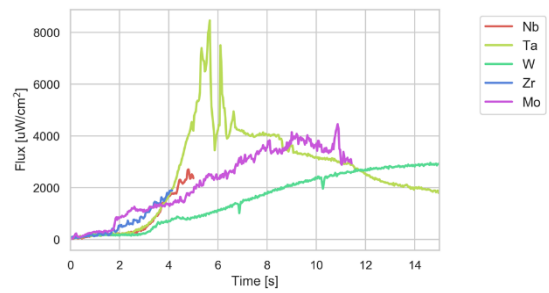


図2 高融点材料の発光強度の時系列変化

低融点金属の発光強度の時間変化を図3に示す。縦軸が発光強度、横軸が時間となっている。いずれの金属も融点が2,000K以下である。高融点の金属材料の発光強度よりも全体的に小さくなっていることがわかる。また、Zn、Agの2つの供試体の発光強度が急激に増大していることが確認できる。これは、加熱されている途中で供試体自体が連続的に散らばることで、アーク気流との衝突断面積が増加したためだと考えられる。その他の低融点金属の発光強度は、比較的早い時間で最大値まで上昇して、供試体が融けている間はわずかに増加をつづけることがわかる。

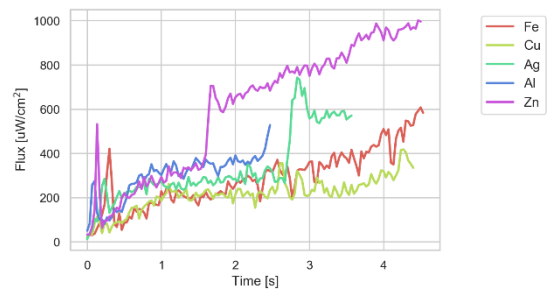


図3 低融点材料の発光強度の時間変化

合金の発光強度の時間変化を図4に示す。縦軸が発光強度、横軸が時間となっている。いずれの合金も融点が2,000K以下である。これより64Tiの発光強度が他の供試体よりも時間経過とともに増大しているが、発光時間が短いことがわかる。それに対して他の合金の発光強度は、低融点の金属材料と同じく、比較的早い時間でほぼ最大値まで上昇して、供試体が融けている間はわずかに増加をつづけることがわかる。

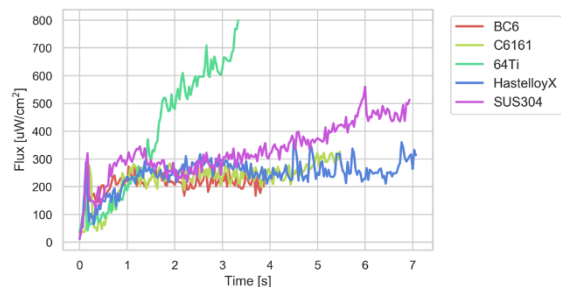


図4 合金の発光強度の時間変化

Fe、Zn、Al、Cu、Agの5種類の純金属の質量減少率の時間変化を図5に示す。縦軸が質量減少率、横軸が時間となっている。材料によって質量減少率やその増加率、融け始める時間が大きく異なっていることが

わかる。

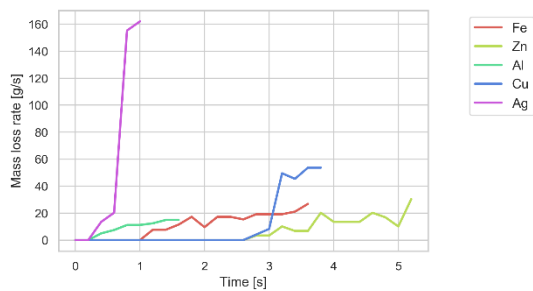


図5 Fe, Zn, Al, Cu, Agの質量減少率

### 3. 発光強度と質量減少率の分析と考察

実験結果から材料によって発光強度と質量減少率が大きく違うことがわかったので、その要因について分析する。

最大の発光強度と供試体の融点の関係を図6に示す。縦軸が最大の発光強度で横軸が供試体の融点である。これより、融点が高いほど最大の発光強度が増加していることがわかる。これは、融点が高い材料ほど供試体の温度の最大値が大きくなり、それによって黒体放射による発光が大きくなるためだと考えられる。しかしMoやTaよりも融点が高いWの最大の発光強度が小さいという結果もみられた。

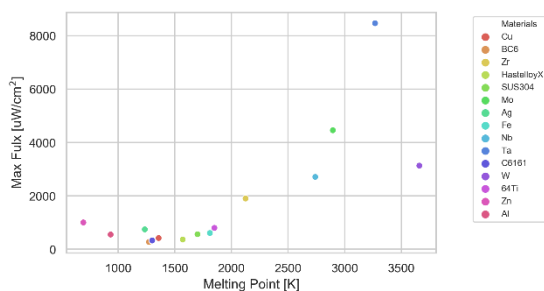


図6 最大発光強度と供試体の融点の関係

平均発光強度と供試体の融点の関係を図7に示す。縦軸が平均発光強度で、横軸が供試体の融点である。これより、融点が高いほど平均発光強度が増加していることがわかる。これは、最大発光強度と融点の関係で述べた通り、融点が高い材料ほど黒体放射による発光が大きくなるためだと考えられる。また、TaとWの最大発光強度は2倍近く違う結果が得られたが、平均発光強度をみると2つの供試体の差がかなり小さくなっていることがわかる。

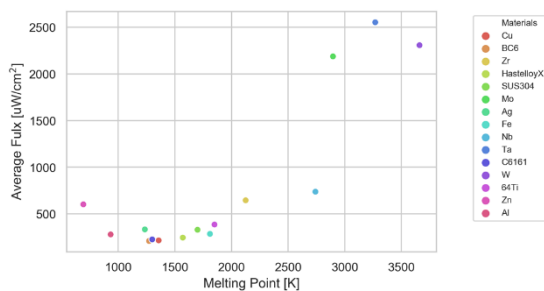


図7 平均発光強度と供試体の融点の関係

次にMo, Ta, Wの最大発光強度と平均発光強度について熱拡散率との相関をみている。図8にMo, Ta, Wの最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率との関係を示す。左の縦軸は最大発光強度、右の縦軸は平均発光強度、横軸が熱拡散率となっている。これより最大発光強度は熱拡散率が低いほど増加することがわかる。それに対して、平均発光強度は熱拡散率との相関がみられないことがわかる。これは熱拡散率が低いほど供試体後方に温度が伝わらず前面の温度が急激に上昇して、わずかな時間だけ黒体放射による発光が大きくなるため、最大の発光強度が大きくなると考えられる。それに対して平均の発光強度と熱拡散率の間に相関が無いのは、熱拡散率の値は供試体の発光強度の総和には影響を及ぼさないためだと考えられる。

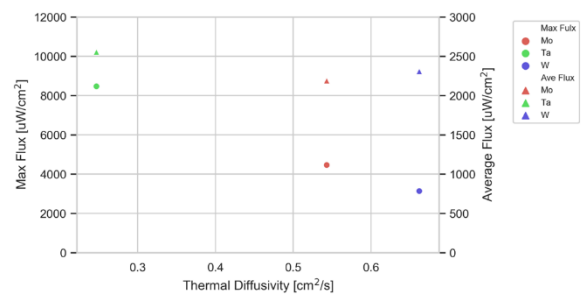


図8 最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率との関係

画像のデータの発光分析を行う。図9にNbとMoが発光している様子を示す。この図からNbは供試体の近傍のみで発光していることがわかるが、それに対してMoは供試体の周囲とその後ろ側でも尾を形成して発光していることがわかる。これは、Moがアーク気流で加熱されたことでアブレーションが起きて、それにより供試体後方でプラズマの尾を形成して発光したためだと考えられる。アブレーションが起きた原因は、Moの酸化物の沸点がMoの融点よりも低いためだと推察される。



図9 Nb(左)とMo(右)が発光している様子

これまでの実験結果から、流星源が高度70kmで発光した際に地上からどの程度の明るさで見えるのか図10に示す。明るさの基準は人間の肉眼で見た時の明るさの基準として使われる実視等級を用いる。これより、W, Ta, Moなどの材料は最大実視等級と平均実視等級ともに明るく、有望な材料であることがわかる。

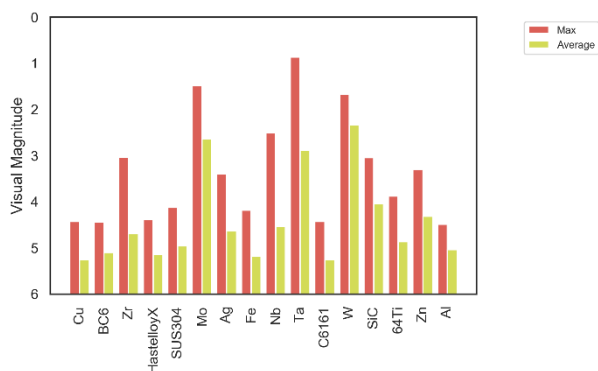


図 10 供試体の最大実視等級と平均実視等級

質量減少率について分析を行う。融け始めてからの質量減少率の平均値と供試体の熱拡散率との関係を図 11 に示す。縦軸が融け始めてからの質量減少率の平均値、横軸が熱拡散率となっている。この図から供試体の熱拡散率が  $0.2\text{--}1.0\text{ cm}^2/\text{s}$  まではほぼ一定だが、それよりも熱拡散率が高くなると、融け始めてからの質量減少率の平均値が大きくなる。これは、質量減少率が増加し始める熱拡散率の値は、加熱率と熱拡散率の兼ね合いで決まると考えられるので、加熱率を変えるとこの境界値が変化すると考えられる。

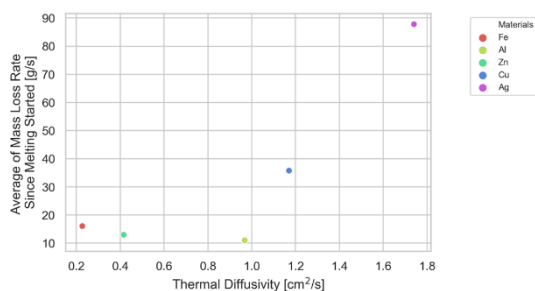


図 11 融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率の関係

質量減少率の増加率の平均値と供試体の熱拡散率との関係を図 12 に示す。質量減少率の増加率の平均値、横軸が熱拡散率となっている。この図から熱拡散率が  $0.2\text{--}1.0\text{ cm}^2/\text{s}$  の間はほぼ一定だが、それよりも熱拡散率が高くなると、質量減少率の増加率が大きくなる。この値は質量減少率の分析で示している通り、加熱率を変えることで変化すると考えられる。

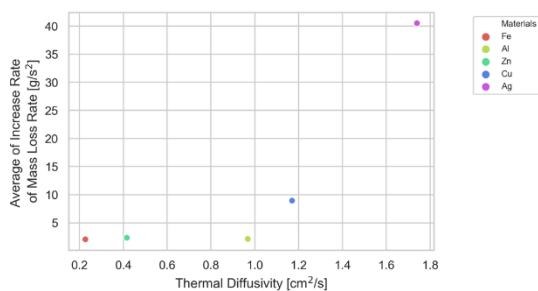


図 12 質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率の関係

供試体が Fe で加熱率を変えたときの質量減少率の時間変化を図 13 に示す。縦軸が質量減少率、横軸が時間となっている。この図から、加熱率が低くなるほど、供試体が融け始める時間が遅くなる。また、質量減少率の最大値も低下し、質量減少率の増加率も低下することがわかる。

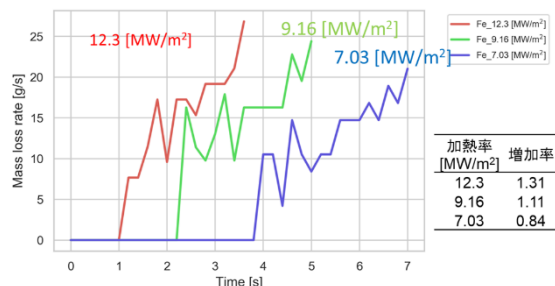


図 13 材料が Fe で加熱率を変えたときの質量減少率の時間変化

## 4. 結論

本研究では様々な熱物性をもった供試体を用意して人工流星を模擬した実験を行い、そこから以下の結論を得た。

1. 材料の融点が高いほど最大、平均の発光強度は大きくなる。熱拡散率が低くなると、最大の発光強度は大きくなる。
2. 熱拡散率を低くなると、質量減少率およびその増加率が小さくなる。また加熱率を低くしても同様である。
3. 明るさの観点から人工流星ミッションに適した人工流星源は、Mo、Ta、W などの高融点金属が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 渡辺正樹, 人工流星ミッションと人工流星源の検討, 平成27年度, 首都大学東京大学院修士論文, 2015.
- 2) 木村菜摘, 人工流星の軌道と発光強度のパラメータ感度解析, 平成30年度, 首都大学東京大学院修士論文, 2019.
- 3) T. Shimoda et al., “Characterization of JAXA/ISAS Arc Wind Tunnel Facility”, 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.