

平成 30 年度（2018 年度）学位論文（修士）

人工流星源の発光強度と質量減少率 に関する研究

Research on Emission and Mass Loss Rate from Artificial Meteor Sources

首都大学東京大学院

システムデザイン学域 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

学修番号 17891530

氏名 山下 矩央

指導教員 佐原 宏典 教授

平成 31 年（2019 年）1 月 25 日

摘要

高度 50km 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できる。高層大気は観測ロケットや流星などを使って観測されているが、観測ロケットの打ち上げは 1-2 年に 1 度という頻度であるため継続的な観測はできず、流星観測は様々なパラメータを仮定しなければならないため、高精度なデータを取得するのが難しい。これらの課題から、人工的に流星を発生させるミッションが提案されている。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、人工的に流星を発生させるミッションである。人工流星は観測ロケットよりも低コストであり、かつ流星源のパラメータはすべて既知であるため、継続的かつ高精度な高層大気観測の実現が期待されている。また流星観測の際に、流星の諸パラメータを決定するために用いられる発光効率の実験値を取得することで、流星観測の高精度化も期待されている。

人工流星ミッションを成立させるためには、流星源の発光強度と質量減少率の予測をする必要がある。しかしながら、大気圏突入の際の発光現象についてはいまだ不明な点が多くあり、発光強度の予測は困難である。また、質量減少率は炭素系材料などの一部の材料などしかわかっていない。本研究では人工流星を模擬した実験を行い、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、人工流星ミッションに適した流星源の検討を行った。

本研究では、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) 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。様々な熱物性値の純金属と合金、セラミックを用意し、分光器と高速カメラを用いて供試体がアーク加熱風洞で加熱されているときの発光強度と質量減少率を計測した。

実験結果としてそれぞれの供試体の発光強度と質量減少率の時系列変化のグラフを示した。その結果、材料によって発光強度、質量減少率が共に大きく異なることがわかった。考察では最大発光強度および平均発光強度などの項目を列挙して、熱拡散率及び融点との関係を図示し、相関があることを示した。さらに人工流星源が加熱されているときの画像から流星源によってアブレーションが起きる場合と起きない場合があることを発見し、その原因は酸化物の気化と関係がある可能性を示した。また、流星源が地上からどの程度の明るさで観測することが出来るのか評価をするために、実験結果から実視等級を算出し、人工流星ミッションに適した流星源に関して検討をした。また質量減少率については、質量減少率および質量減少率の増加率と熱拡散率および加熱率との関係を図示し、相関があることを示した。

以上の結果より人工流星ミッションにおける様々な材料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材料を提案した。今後の課題としては、加熱率が一定ではなく、時間とともに変化をさせて大気圏再突入時に近い条件で実験をし、発光強度と質量減少率の測定をすることと、酸化反応とアブレーションの有無の分析をすることが挙げられる。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 高層大気観測	1
1.2 流星の発光原理と高層大気観測	2
1.3 人工流星ミッション	4
1.4 研究目的	7
第 2 章 アーク加熱風洞を用いた大気圏突入模擬実験	8
2.1 実験概要	8
2.1.1 アーク加熱風洞について	8
2.1.2 実験条件および供試体について	9
2.1.3 供試体設置方法	11
2.1.4 計測装置	12
2.2 解析手法	17
2.2.1 分光データの前処理	17
2.2.2 発光強度の算出方法	17
2.2.3 等級の算出方法	18
2.2.4 質量減少率の算出方法	19
2.3 実験結果	21
2.3.1 高融点金属の発光強度の時間変化	21
2.3.2 低融点金属の発光強度の時間変化	22
2.3.3 合金の発光強度の時間変化	23
2.3.4 セラミックの発光強度の時間変化	24
2.3.5 質量減少率の時間変化	25
2.3.6 体積減少率の時間変化	26
第 3 章 発光強度と質量減少率の分析と考察	27
3.1 発光強度の分析項目	27
3.1.1 最大発光強度と供試体の融点	27
3.1.2 平均発光強度と供試体の融点	28
3.1.3 最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率	29
3.1.4 最大発光強度までの時間と供試体の熱拡散率	30
3.2 画像を用いた分析	31
3.3 分光スペクトルの分析	33
3.4 実視等級の算出と流星源の検討	36
3.5 質量減少率の分析項目	38
3.5.1 融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率	38
3.5.2 融け始めてからの質量減少率の平均値と融点	39
3.5.3 質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率	40
3.5.4 質量減少率の増加率の平均値と融点との関係	41
3.5.5 加熱率を変えた時の質量減少率の変化	42
第 4 章 結論	43
4.1 結論	43

4.2 今後の課題.....	43
参考文献	44
謝辞	46
付録 A 発光強度の時間変化	1
付録 B 最大発光強度でのスペクトル	1
付録 C 質量減少率の時間変化	1

図目次

図 1	高層大気観測の手法	1
図 2	流星の発光原理 ²⁾	3
図 3	流星観測に使われているカメラと分光器 ³⁾	3
図 4	人工流星の発生方法	4
図 5	人工流星源を搭載した観測ロケット ⁷⁾	5
図 6	人工流星のイメージ ¹⁰⁾	6
図 7	ALE-1 衛星フライトモデル外観 ¹¹⁾	6
図 8	ISAS/JAXA 1MW 級アーク加熱風洞	8
図 9	供試体設置方法	12
図 10	供試体を設置した後	12
図 11	小型分光器 QEpro ²⁵⁾	13
図 12	校正光源（放射分析）DH-3 plus-CAL ²⁶⁾	13
図 13	校正光源（波長）HG-1 ²⁷⁾	13
図 14	Nikon D5300 ²⁸⁾	14
図 15	MEMRECAM Hx-7s ²⁹⁾	14
図 16	計測機器配置図	14
図 17	スラグ式カロリメータ	15
図 18	カロリメータの設置方法	16
図 19	データロガー（GL900） ³¹⁾	16
図 20	各種前処理前の分光データ	17
図 21	画像解析ソフト ImageJ を使って質量減少率を算出しているときの様子	20
図 22	高融点金属材料の発光強度の時間変化	21
図 23	低融点金属の発光強度の時間変化	22
図 24	合金の発光強度の時間変化	23
図 25	セラミックの発光強度の時間変化	24
図 26	Fe, Zn, Al, Cu, Ag の質量減少率	25
図 27	Fe, Zn, Al, Cu, Ag の体積減少率	26
図 28	最大の発光強度と供試体の融点の関係	27
図 29	平均発光強度と供試体の融点の関係	28
図 30	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	29
図 31	最大発光強度までの時間と供試体の熱拡散率との関係	30
図 32	Nb（左）と Mo（右）が発光しているときの様子	31
図 33	流星の発光モデル ³⁾ （直径 1cm, 突入速度 72km/s, 発光高度 95km での Mg の発光モデル）	32
図 34	酸化 Mo（VI）と Mo の融点と沸点 ^{33) - 35)}	32
図 35	Mo の発光強度の時間変化	33
図 36	Mo がアーク風洞に投入されてから 1 秒, 3 秒, 5 秒の時点の分光スペクトル	34
図 37	Nb を 5 秒加熱した時のスペクトルとプランクフィッティング	34
図 38	Mo を 5 秒加熱した時のスペクトルとプランクフィッティング	35
図 39	供試体の最大実視等級と平均実視等級	36
図 40	供試体の各等級における発光時間	37
図 41	融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率	38
図 42	融け始めてからの質量減少率の平均値と融点の関係	39

図 43	質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率の関係	40
図 44	質量減少率の増加率の平均値と融点との関係	41
図 45	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	42

表目次

表 1	観測ロケットによる高層大気観測 ¹⁾	2
表 2	ISAS/JAXA アーク加熱風洞の性能 ¹⁴⁾	9
表 3	アーク加熱風洞の運転条件	9
表 4	供試体および実験条件	10
表 5	供試体で用いた材料の熱物性値 ^{15) - 24)}	11

第 1 章 序論

1.1 高層大気観測

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（図 1）。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。表 1 にこれまで行われてきた観測ロケットの打ち上げについて示す¹⁾。観測ロケットを使い、様々な目的の高層大気観測が行われてきたことが読み取れる。

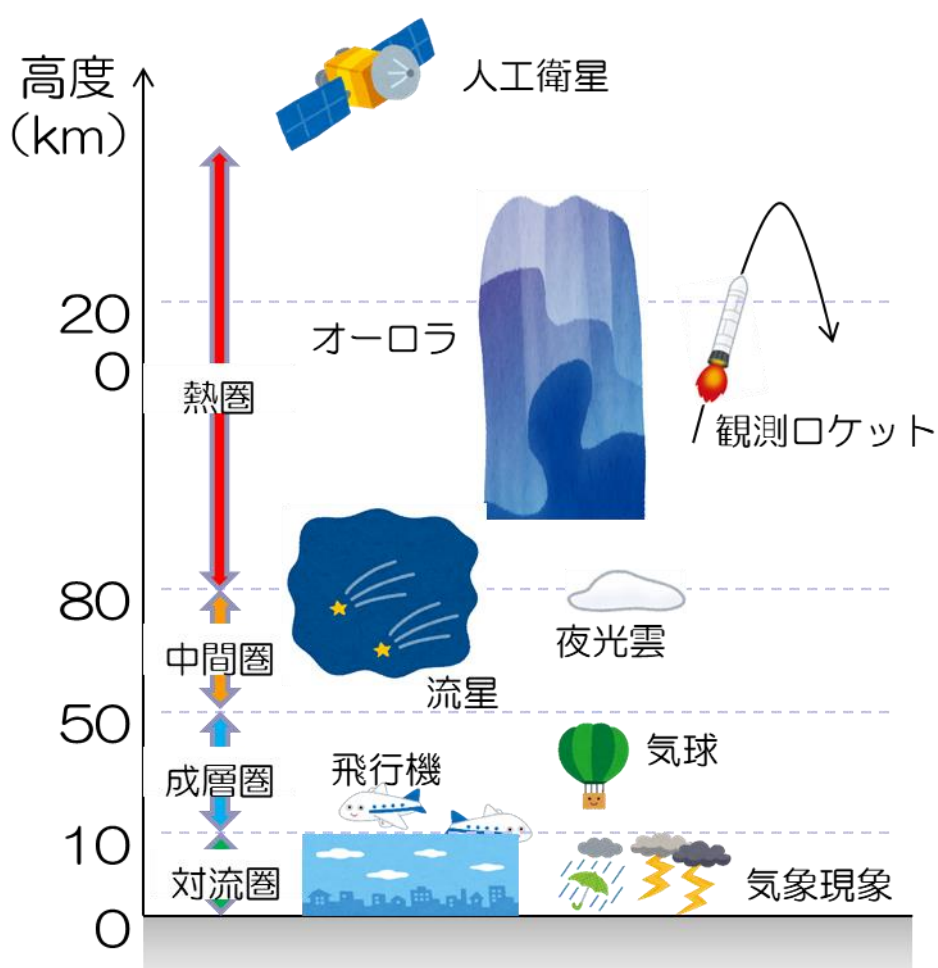


図 1 高層大気観測の手法

表 1 観測ロケットによる高層大気観測¹⁾

ロケット名	打ち上げ日	目的	打ち上げ場所
S-310-29	2000/01/10	大気光波状構造の解明	内之浦
SS-520-2	2000/12/04	イオン流出機構の観測	ニーオルスン
S-310-30	2002/02/06	下部熱圏の力学とエネルギー収支の解明	内之浦
S-310-31	2002/08/03	スボラディック E 層に伴うイレギュラリティの生成 機構解明	内之浦
S-310-32	2002/08/03	スボラディック E 層に伴うイレギュラリティの生成 機構解明	内之浦
S-310-33	2004/01/18	大気光波状構造の解明	内之浦
S-310-35	2004/12/13	極域下部熱圏の力学とエネルギー収支の研究	アンドーヤ
S-310-37	2007/01/16	下部電離圏の高温層生成メカニズムの解明	内之浦
S-520-23	2007/09/02	電離圏中の中性・電離大気現象と気象・海洋現象の 多波長撮影	内之浦
S-310-38	2008/02/06	電離圏中の3次元プラズマ分布の観測	内之浦
S-310-39	2009/01/26	極域下部熱圏の力学とエネルギー収支の研究	アンドーヤ
S-310-40	2011/12/19	夜間中緯度電離圏における電波伝搬解析	内之浦
S-520-26	2012/01/12	熱圏中性大気とプラズマの結合過程解明	内之浦
S-310-42	2013/07/20	電離圏E領域とF領域の相互作用に関する総合観測	内之浦
S-520-27	2016/01/15	電離圏プラズマ過熱現象の解明	内之浦

しかし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。このような問題からレーダー、ライダー、磁力計、光学観測装置、太陽望遠鏡等を用いた高層大気の地上観測ネットワークが構築されている。またカナダやアイスランドといった極地ではオーロラやそれに伴う現象の観測が行われている。

1.2 流星の発光原理と高層大気観測

流星は地球大気中に突入してきた流星物質が空力加熱することで周辺の大気がプラズマ化し、そのプラズマによる輻射加熱によって流星物質が昇華・蒸発する「アブレーション現象」を起こして、発光と損耗が起こる²⁾。流星の発光には2つあり、1つは流星周辺の酸素や窒素やアブレーションによって蒸発した流星由来の金属原子からの励起発光によるものである。周辺の気流よりエネルギーを受け取った原子や分子は励起状態になり、励起状態はすぐに収まり基底状態に戻るが、このときのエネルギー差に相当する特定の波長の輝線が放射される（図2）。そしてもう1つが、流星が空力加熱で高温になることで黒体輻射による発光である。

流星の発光は地上から100-150 kmで起こり始めて、50-70 kmで消滅する。このときの発光スペクトル観測が地上から行われているが、流星の観測にはいくつか問題がある。1つ目は流星の観測で良質なデータを取得することが難しいことである。流星は発生時刻も場所も予測できないため、常時カメラを空に向けて自動で観測が行われている（図3）。これらの観測器は広い視野を監視しているため空間分解能が悪く、さらに流星のスペクトルが夜光や市街地等の光に埋もれてしまい、良質な分光データを取得するのが困難である⁴⁾。良質な分光データを取ることが出来た数少ない事例としては、2002年にしし座流星群が地球に到達した時に行われた流星観測がある。このとき行われた分光観測では、流星源の金属のスペクトルと大気のスペクトルの両方を取得し、金属原子の励起温度や窒素分子の電子、振動、回転温度を精密に求めることができた⁵⁾。2つ目の問題は、流星は大気圏突入速度、突入角、形状、密度などの要素が不確定であり、また流星発光の物理環境には不明な点が多いことである。これによって計算の過程で様々なパラメータを仮定しなければならず、精度の高い流星観測が難しくなっている。流星の発光に関するパラメータで特に重要であるが正確さ

にけるものとして、発光効率が上げられる。発光効率は流星の運動エネルギーが発光エネルギーに変換される効率のことで、1933 年に Opik によって提唱されている。流星観測において発光効率は一般的に 0.2% という値が使われているが、理論的な値であるため様々な実験で Opik 理論の発光効率の検証が行われている⁶⁾。

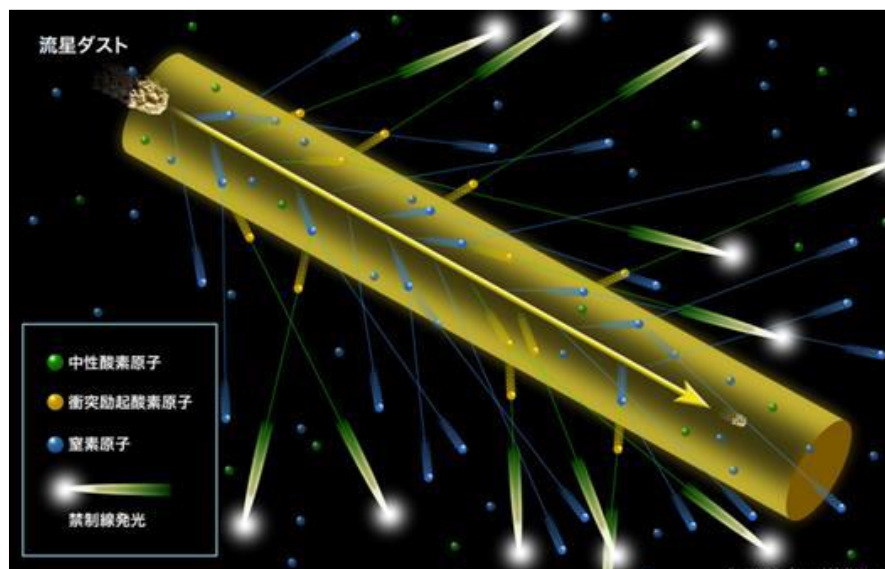


図 2 流星の発光原理²⁾



図 3 流星観測に使われているカメラと分光器³⁾

1.3 人工流星ミッション

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、これを人工衛星から放出し大気圏突入させることで（図 4）、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、明るい流星源を使って人工的な流れ星を発生させることで、より良質な分光データを取得することが可能になる。

人工流星の発光と高層大気の高度はほぼ同じであり、人工流星は高層大気観測に有用である。人工流星を用いた具体的な高層大気観測方法として、流星観測と同様の手法が考えられる。1 つ目は人工流星のアブレーションから発生した電離層に滞留している金属イオンを共鳴散乱ライダーで観測する方法である。この観測で気体やイオンの化学反応や温度構造を知ることができる。2 つ目に人工流星が通った後に残る発光物質である流星痕を観測する方法である。流星カメラを用いて流星痕の様子から高層大気の中性風の風向や風速を知ることができる。3 つ目は人工流星の発光スペクトルを観測することである。分光データから金属原子の励起温度や窒素分子の電子、振動、回転温度などの値を求めて、それらの結果をシミュレーションの条件に適用することで、高層大気のパラメータを求めることを検討している。

また、人工流星は流星観測の高精度化に貢献できると考えられている。人工流星は組成、突入速度、突入角、形状、密度などのすべてのパラメータが既知であるため、発光効率を正確に求めることが出来ると期待されている。人工流星で正確に求めることができた発光効率を活用することで、地球に飛来してきた流星のパラメータをより正確に求めることができ、流星観測の精度向上や流星がどこから飛来してきたのか知ることが出来る。

人工流星を活用した先行事例として、1960 年代に観測ロケット（図 5）に形状や質量がわかっている鉄でできた人工流星源のみを搭載して、高度 80-280 km で火薬を使って射出し、10 個の人工流星を発生させる実験が行われた⁷⁾。この人工流星の発光はスーパーシュミットカメラなどのビデオカメラで観測されて、20 km/s の流星の発光モデルの計算で使われている光力係数が高精度で求まるなどの成果がさらなる人工流星の実験を求める声も存在する⁸⁾。

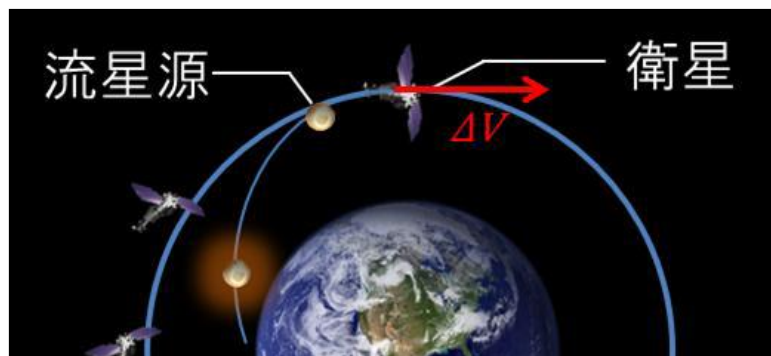


図 4 人工流星の発生方法

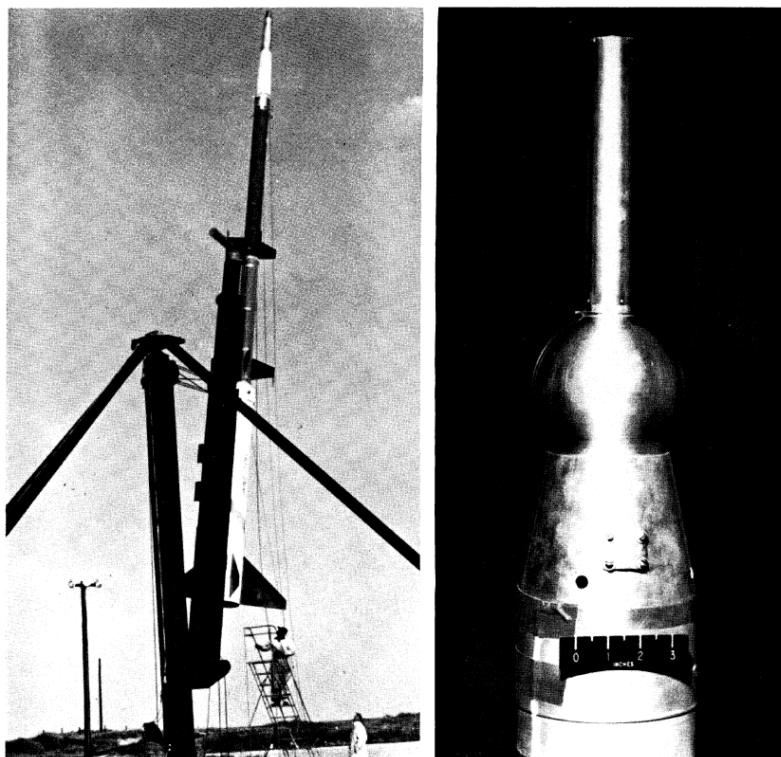


図 5 人工流星源を搭載した観測ロケット⁷⁾

人工流星による継続的な高層大気観測実現のためには、人工流星源の 1 放出あたりのコストを下げる必要がある。そのためにも低コスト短期開発が可能である超小型人工衛星に大量の人工流星源を搭載し、1 放出あたりのコストを抑えることを目指して、株式会社 ALE（以下 ALE）によって人工流星プロジェクトが提唱されている。このプロジェクトでは人工的に流れ星を発生させて宇宙を活用したエンターテインメントを提供することを目指す一方で、任意の地点・時刻に人工流星を発生させる技術の工学実証と人工流星を使った科学観測を目的としている（図 6）。このプロジェクトを実現させるために、ALE と東北大学が人工流星源を搭載した衛星である ALE-1 を共同開発した（図 7）。この衛星は 2019 年 1 月 18 日に JAXA のイプシロンロケット 4 号機から打ち上げられ、2020 年の春ごろには広島・瀬戸内地域で ALE 初の人工流れ星を発生させる予定である。

本研究室では超小型人工衛星での人工流星ミッションの実現のための諸検討を行ってきた。また日本大学の阿部研究室とは 2014 年度からアーク加熱風洞を用いて人工流星源の大気圏突入模擬実験を行ってきており、発光強度の観点から人工流星ミッションが成立することの検討を行ってきた。人工流星ミッションにおける流星源の明るさに対するミッション要求として、肉眼での地上観測が十分に可能である 1 等級という明るさが要求されているが、流星が 1 等級上の明るさで観測できるのはまれであり、この実現には入念な検討が必要である。また人工流星を観測する際には、流星観測で用いられる分光器やカメラなどの観測機器を使って観測することを想定しているが、例えば国立天文台にある高感度モノクロ CCD カメラ WAT-100N を用いて構築したシステム¹²⁾は 3 等星よりも明るい流星しか検出できないため、人工流星の発光強度の予測は非常に重要である。しかしながら大気圏再突入時の発光については、今まで十分に研究されてきておらず不明な点が多い。

本研究室では人工衛星から放出した人工流星源の軌道を予測する人工流星シミュレータを構築して、軌道上物体との衝突確率の評価や、人工流星源の放出速度および角度の誤差が地上の観測に与える影響の評価を行ってきた⁹⁾。人工流星シミュレータで正確に人工流星源の軌道を予測するためには、人工流星源が大気圏突入している際の質量減少率を正確に予測する必要がある。しかし、炭素系材料などの一部の材料しか質量減少率はわかっていないため、当研究室のシミュレータでは質量減少率に影響を及ぼすパラメータを仮定し

ており，軌道予測に不確定性が残っている．



図 6 人工流星のイメージ ¹⁰⁾

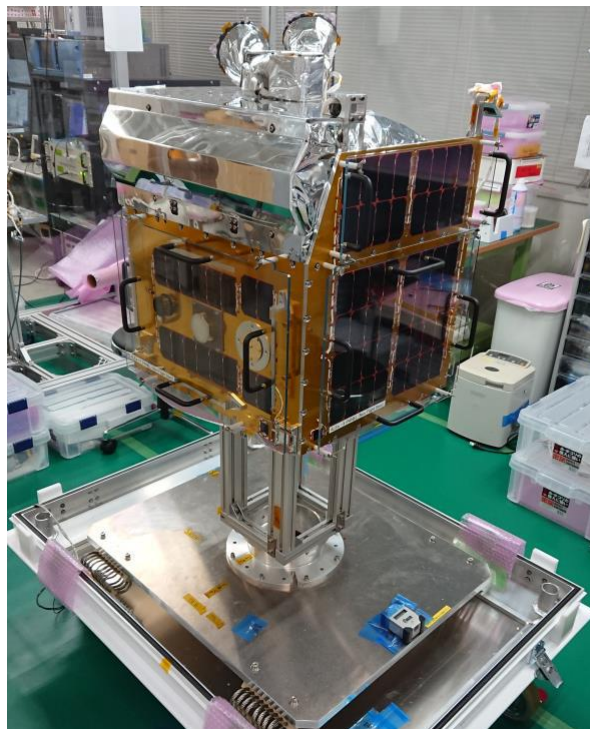


図 7 ALE-1 衛星フライトモデル外観 ¹¹⁾

1.4 研究目的

人工流星ミッションを成立させるには、人工流星源が大気圏突入している際の発光強度と質量減少率を予測する必要がある。発光強度に関しては、過去の当研究室の実験から人工流星源の材質と構造、大きさによって発光強度も変わることまで確認されているが、具体的にどのような物理的パラメータが発光強度に関係しているかまではわかっていない¹³⁾。また人工流星源の質量減少率に関する実験も行われたが、十分なデータが蓄積されていない。そこで、本研究では人工流星を模擬した実験を行い、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、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し、研究目的を以下の3つとする。

1. 熱物性値を変えたときの発光強度への影響をみる。
2. 熱物性値と加熱率を変えたときの質量減少率への影響をみる。
3. 発光強度の観点から評価項目を列举し、人工流星源の検討を行う。

第2章 アーク加熱風洞を用いた大気圏突入模擬実験

2.1 実験概要

人工流星ミッションに適した流星源を選定するために、ISAS/JAXA 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。人工流星源である供試体をアーク気流に暴露させ、そのときの発光強度と質量減少率を計測した。

2.1.1 アーク加熱風洞について

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る。アーク加熱風洞の作動ガスは窒素や空気、アルゴンなどが使われており、その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、ノズルにより膨張加速し、超音速のアーク気流を供試体に吹きつけて実験を行う¹³⁾。通常、数十秒から数分のオーダの連続運転が可能である。しかし、アーク加熱風洞には欠点があり、貯気槽の圧力が上げられないため、試験気流のマッハ数もあまり高くはない。よって空力加熱率は実際の大气圏突入の際の条件と合ってはいても、流れ場そのものは異なっていることに留意が必要である。本研究では ISAS/JAXA に設置されているアーク加熱風洞で実験を行った（図8）。このアーク加熱風洞は小惑星探査機「はやぶさ」のサンプルリターン用の耐熱カプセル開発のために設置されたもので、「はやぶさ2」の耐熱材開発の実験でも用いられている。表2に ISAS/JAXA アーク加熱風洞の性能を示す。通常はアーク電流を 450 A に設定して、供試体の加熱率を変えときにはアーク気流噴射口と供試体との距離を変更することで調整している。電流の値を変更して加熱率を調整することもできるが、出力が安定しなかったりメンテナンスの頻度が通常よりも多くなったりするなどの問題も発生するので留意する必要がある。

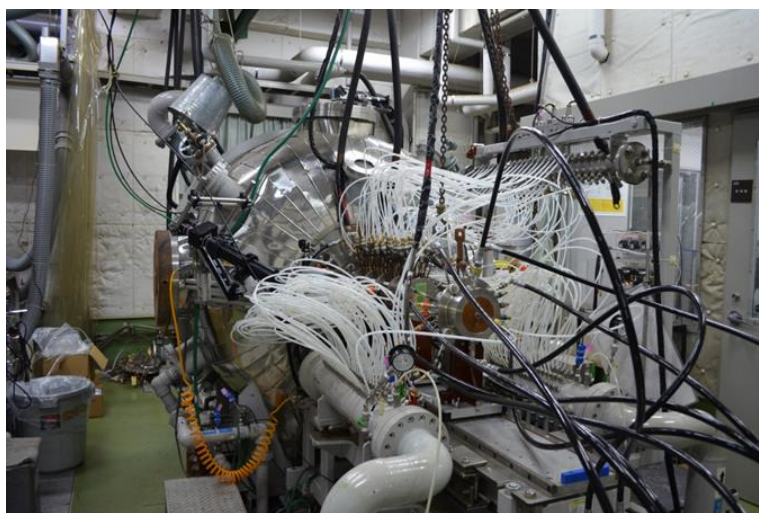


図8 ISAS/JAXA 1MW 級アーク加熱風洞

表 2 ISAS/JAXA アーク加熱風洞の性能¹⁴⁾

作動電流	[A]	300-700
最大作動電圧	[VDC]	2000
最大出力	[KW]	1000
質量流量比	[g/s]	10-30
エンタルピ	[MJ/kg]	3-20
澱点動圧	[kg/cm ²]	0.05-0.7

2.1.2 実験条件および供試体について

アーク加熱風洞の運転条件を表 3 に、供試体および実験条件を表 4 に示す。表 3 の実験条件は、本研究室で開発している人工流星シミュレータを使って人工流星が実際に受ける最大の加熱率の見積もりを行い、アーク加熱風洞で再現できるように定めた。また、当研究室の過去の実験では¹³⁾、流星の組成に近い流星模擬体での実験や、金属原子による励起発光を期待して発光増加剤を供試体に塗布して実験など行われたが、明るく光る天然の流星ほど発光しなかった。理由としては、人工流星は天然の流星よりも加熱率が低いため、アブレーションがあまり発生せず、流星の発光で顕著にみられる流星本体の周辺のプラズマによる発光が小さかったためだと考えられる。これら結果と考察を踏まえて、本研究では周辺大気と気化した流星物質によるプラズマ発光が大きい材料を探すのではなく、流星源自体の発光を大きくするために様々な熱物性をもった供試体を用意して実験を行った。表 5 に実験に用いた供試体の熱物性値を示す。ここで各材料の熱拡散率は 300 K のときの値である。また純金属以外の材料では代表値を示す。供試体のサイズは加工性と人工衛星の制約から、原則 $\Phi 10 \times 10$ の円柱とし、一部の材料は $\Phi 10$ の球である。

表 3 アーク加熱風洞の運転条件

電流	[A]	450
電圧	[V]	1550
電力	[kW]	700

表 4 供試体および実験条件

Run Number	Nozzle Length [mm]	Heat Flux [MW/m ²]	Material	Size	Supplier	Purity [%]
846	70	12.3	Ti64	Φ10×10	株式会社 J・3D	
846	70	12.3	Zn	Φ10×10	株式会社ニラコ	
847	70	12.3	Al	Φ10×10	株式会社 J・3D	
921	70	12.3	Cu	Φ10×10	株式会社ミスミ	99.96
922	70	12.3	BC6	Φ10×10	株式会社ミスミ	
922	70	12.3	Nb	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.9
922	70	12.3	Ta	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
922	70	12.3	Zr	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.2
923	70	12.3	HastelloyX	Φ10×10	株式会社オーサカ ステンレス	
923	70	12.3	SUS304	Φ10×10	株式会社ミスミ	
923	70	12.3	Mo	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
939	70	12.3	TiO ₂	Φ10×10	小段金属株式会社	
939	70	12.3	Ag	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.99
939	70	12.3	ZrO ₂	Φ10×10	アズワン株式会社	
941	80	9.16	Cu	Φ10×10	株式会社ミスミ	99.96
1005	70	12.3	Fe	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.5
1005	70	12.3	Nb	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.9
1005	70	12.3	Ta	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
1005	70	12.3	C6161	Φ10×10	株式会社スタンダ ードテストピース	
1006	80	9.16	Fe	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.5
1006	80	9.16	Nb	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
1006	80	9.16	Ta	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
1006	80	9.16	C6161	Φ10×10	株式会社スタンダ ードテストピース	
1007	100	7.03	Fe	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.5
1007	100	7.03	Nb	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.9
1007	100	7.03	Ta	Φ10×10	株式会社ニラコ	99.95
1007	100	7.03	C6161	Φ10×10	株式会社スタンダ ードテストピース	
1008	70	12.3	W	Φ10×10	株式会社セミコム	99.9
1008	70	9.93	SiC	Φ10	株式会社丸十	98

表 5 供試体で用いた材料の熱物性値¹⁵⁻²⁴⁾

Materials	Thermal Diffusivity [cm ² /s]	Melting Point [K]
Cu	1.17	1,357
BC6	0.228	1,272
Zr	0.127	2,125
HastelloyX	0.023	1,570
SUS304	0.041	1,700
Mo	0.543	2,896
Ag	1.74	1,235
Fe	0.227	1,810
Nb	0.237	2,741
Ta	0.247	3,269
C6161	0.253	1,300
Ta	0.247	3,269
W	0.662	3,660
64Ti	0.036	1,850
Zn	0.416	692
Al	0.968	933
TiO2	—	2,098
SiC	0.796	—
ZrO2	0.011	2,940

2.1.3 供試体設置方法

供試体に 2 mm ほどの深さの穴をあけて、タングステン製の支持棒を挿入し、無機系耐熱接着剤で固定した。その後タングステン棒を SUS 製の棒に差し込み嵌め合いでの固定をし、さらに SUS 棒をアーク加熱風洞の施設側が用意した銅のアタッチメントホルダに挿入し、イモねじで固定した。アタッチメント前面は熱防護材であるベークライトによって覆われており、後面はガラステープを貼ることで、アーク気流にさらされないようになっている（図 9, 図 10）。最後にアタッチメントホルダをアーク加熱風洞の射出機構にねじで取り付けを行う。アーク加熱風洞起動後に射出機構で供試体を射出することで、アーク気流に暴露を行う。また、実験計画において供試体の加熱率を変えるために、供試体とノズルとの距離の変更を行っているが、アーク加熱風洞のストラットを動かすとなると施設側の準備時間が伸びてしまうため、SUS 棒の長さを変えることで対応した。

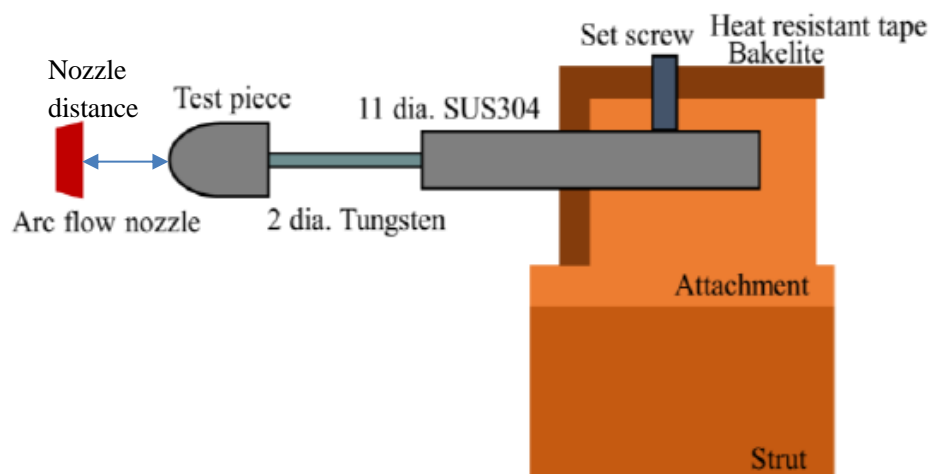


図 9 供試体設置方法

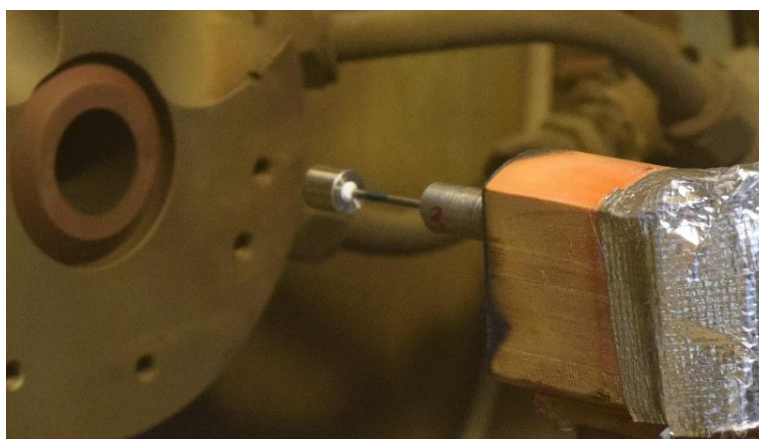


図 10 供試体を設置した後

2.1.4 計測装置

今回の実験で使用した分光器は、OceanOptics 社製の小型分光器 QEPro である (図 11)。QEPro は 250-1100 nm までの波長範囲が観測可能である。受光素子がペルチェ素子で冷却されているため、暗電流ノイズの影響が少なくなっている。また、コサインコレクタによって、発光強度の校正が可能である。QEPro の放射分析の校正用の光源として DH-3 plus-CAL (図 12)、波長の校正光源として HG-1 (図 13) をそれぞれ使用した。また、分光器と供試体との距離はレーザー距離計を用いて計測を行った。なお、QEPro を設置するアーク加熱風洞の観測窓を MgF_2 に変えることで、紫外域を含む分光データの取得を行っている。また、アーク加熱風洞で供試体を加熱している際の発光の様子や質量減少率の算出のために、デジタル一眼レフカメラである Nikon D5300 (図 14) と高速度カメラの MEMRECAM Hx-7s (図 15) による撮影を行った。シャッタースピードや F 値などの撮影条件は、供試体に合わせて適宜変更した。これらの計測装置の配置図を図 16 に示す。



图 11 小型分光器 QEpro²⁵⁾



图 12 校正光源（放射分析） DH-3 plus-CAL²⁶⁾



图 13 校正光源（波長） HG-1²⁷⁾



図 14 Nikon D5300²⁸⁾



図 15 MEMRECAM HX-7s²⁹⁾

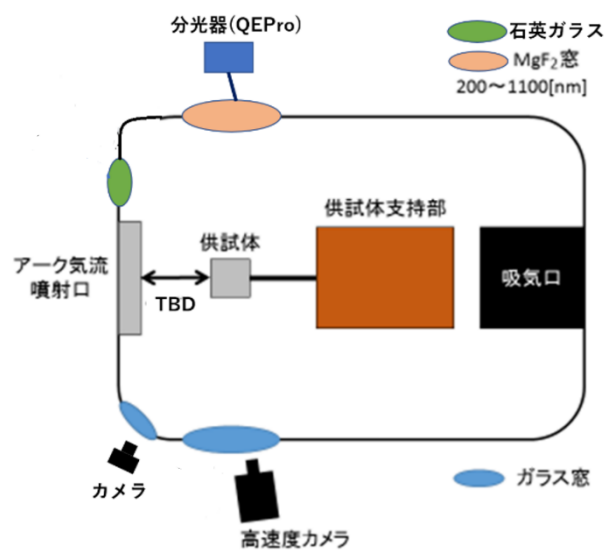


図 16 計測機器配置図

アーク加熱風洞は、ノズル出口から供試体までの距離によって加熱率が変わることが知られている。しかし風洞の施設側の推奨供試体サイズの加熱率と距離のプロファイルは存在するが、本実験での供試体サイズの加熱率と距離の関係は不明であったため、加熱率を測定する必要があった。そこで JAXA の山田哲哉准教授が開発したスラグ式カロリメータを用いて加熱率の計測を行った。³⁰⁾ 本実験で使ったカロリメータを示す(図 17)。このカロリメータは円柱形状の無酸素銅のスラグに熱電対を打ち込み、ルビー球を使って支持具と 3 点設置で固定することによって熱が支持具に逃げないようにしている(図 18)。このカロリメータをアーク気流に暴露したときの温度上昇の時間履歴を GL900 (図 19) というデータロガーを使って測定し、その値を使って式(1)で計算すると加熱率を求めることができる。

$$q_{ave} = \frac{mc \Delta T}{A \Delta t} \quad (1)$$

q_{ave} : 平均加熱率[W/m²]

m : スラグの質量[kg]

c : スラグの比熱[J/(kg・K)]

$\Delta T/\Delta t$: 単位時間当たりの温度上昇[K/s]



図 17 スラグ式カロリメータ

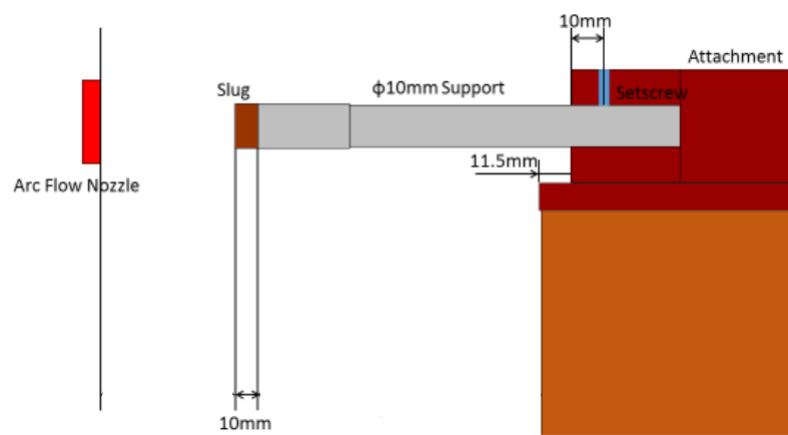


図 18 カロリーメータの設置方法



図 19 データロガー (GL900) ³¹⁾

2.2 解析手法

2.2.1 分光データの前処理

分光器のデータには供試体の発光だけでなく、バックグラウンドノイズと供試体以外の発光が含まれている(図 20)。特にタングステン棒がアーク気流に暴露されることで発生する発光は一部の供試体をアーク気流に暴露したときの発光よりも大きくなるので、分光データと画像データを照らし合わせてタングステン棒が発光している時間の分光データを除く必要がある。また分光器に周囲の光が入ることで分光データにノイズがのってしまうが、あらかじめノイズのみの分光データを集めて、実験データからノイズを差し引くことでノイズを低減させている。

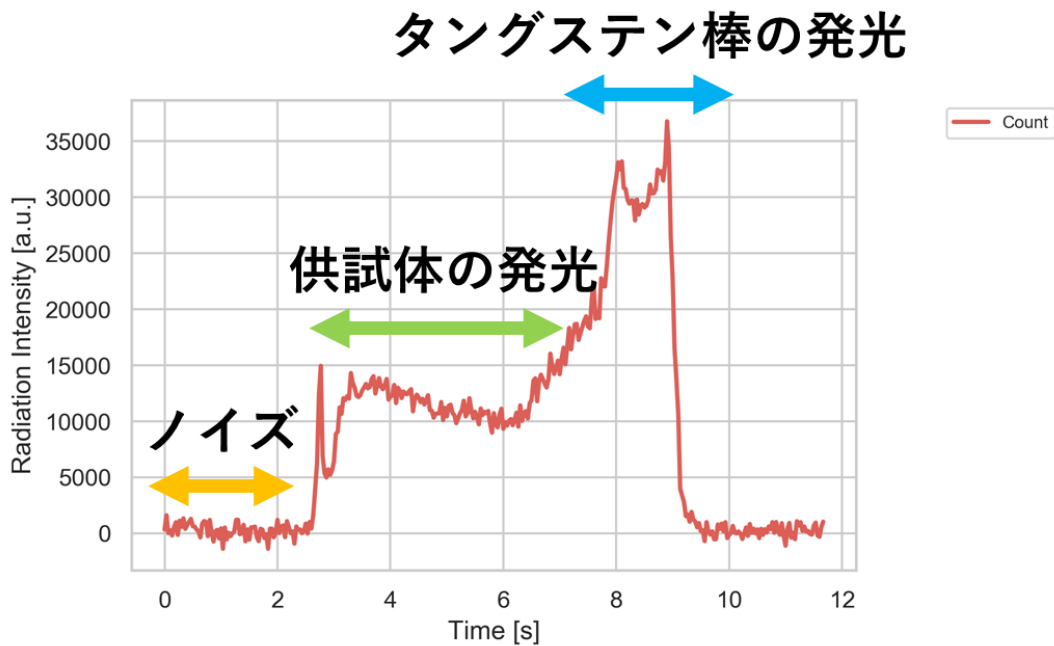


図 20 各種前処理前の分光データ

2.2.2 発光強度の算出方法

分光データの前処理をした後、以下の計算手順に従って分光器のデータより発光強度算出を行う。分光器のカウント値から絶対校正されたスペクトルは式(2)より求めることができる。

$$I_{abs} = I_{measured} \times \frac{I_{abs}^{std}}{I_{measured}^{std}} \quad (2)$$

I_{abs} : 絶対校正されたスペクトル[W/m²/nm]

$I_{measured}$: 測定されたスペクトル[count/sec]

I_{abs}^{std} : 標準光源の絶対放射強度スペクトル[W/m²/nm]

$I_{measured}^{std}$: 測定された標準光源スペクトル[count/sec]

I_{abs} は単位波長当たりの発光強度であるので、分光器で観測することが出来る範囲の波長で積分をすると、発光強度に換算することが出来る。

$$F = \int I_{abs}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

F : 発光強度[W/m²]

λ : 波長[nm]

2.2.3 等級の算出方法

等級は流星の明るさを表す尺度でポグソンの式を使って求めることができる。等級は 1 等級大きくなると明るさが 2.5 倍になる。また、等級は検出器を使用するフィルターの検出波長域の違いによって V バンド等級, B バンド等級, U バンド等級などが存在する。本研究では人間の目の感度を基準に作られた V バンド等級（以下実視等級と表記する）を人工流星源の評価に用いることと定め、その算出を行った。以下に実視等級を算出する手順を示す。

上空 h [m]で発光した際の地上での単位波長当たりの発光強度 $F_{\lambda,h}$ は式(3)より求めることができる。

$$F_{\lambda,h} = I_{abs} \times \left(\frac{l}{h}\right)^2 \quad (4)$$

$F_{\lambda,h}$: 高度 h [m]で発光した時の単位波長当たりの発光強度[W/m²/nm]

l : 分光器からの距離[m]

h : 高度[m]

次に、実験で用いた供試体が高度 h [m]は発光した時に地上から何等級で観測することが出来るのか求める。 m 等級の星の見かけの明るさを I_m , n 等級の星の見かけの明るさを I_n とすると、ポグソンの式を用いて式(5)で示すことが出来る。

$$m - n = -2.5(\log_{10} I_m - \log_{10} I_n) \quad (5)$$

m : 等級[等星]

n : 等級[等星]

I_m : m 等星の見かけの明るさ

I_n : n 等星の見かけの明るさ

ここで、実視等級 0 等星の天頂の波長が 545 nm の単位波長当たりの発光強度は 3.63×10^{-11} W/m²/nm であるので³²⁾, $n = 0$, $I_n = 3.63 \times 10^{-11}$ を代入して、式を変形すると式(6)で示すことが出来る。

$$m_v = -2.5 \log_{10} f_h - 21.1 \quad (6)$$

m_v : 実視等級[等星]

f_h : 高度 h [m]で波長が 545nm での単位波長当たりの発光強度

2.2.4 質量減少率の算出方法

供試体の質量減少率の計算をするために、アーク加熱風洞で加熱されている供試体を動画で撮影し、ImageJ という画像解析ソフトを用いて供試体の前面の移動速度を分析し、質量減少率を算出した (図 21)。以下に質量減少率の算出の手順を示す。

1. 動画をそれぞれ 1 枚の画像に分割し、グレースケール化処理を行う。
2. 画像解析ソフト ImageJ を起動し、画像を時系列データとして読み込む。
3. 供試体のサイズは既知であるため、供試体の長さが何 pixel なのか計測し、1pixel あたり何 mm なのか計算する。
4. 供試体が射出されて完全に静止したタイミングを見つけ、それを開始時点とする。
5. 供試体の軸中心に基準線をひく。
6. 時間を進めて、基準線上にある供試体の前面が 1 秒当たり何 pixel 移動しているのか記録する。
7. 記録したデータをもとに、質量減少率を計算する

次に質量減少率を求める手順について数式を使って示す。時刻 t における 1 秒当たりの供試体前面の移動ピクセル数は式(7)を使って計算することが出来る。

$$n_{diff}(t) = n_{edge}(t) - n_{edge}(t - 1) \quad (7)$$

$n_{diff}(t)$: 時刻 t における供試体前面の移動ピクセル数 [pixel/sec]

$n_{edge}(t)$: 時刻 t における供試体前面のピクセル座標

ここで、供試体の長さは既知であるため、1pixel あたりの長さを導出することができる。

$$D = l/L \quad (8)$$

D : 1pixel あたりの mm [mm/pixel]

l : 供試体の長さ [mm]

L : 供試体の長さ[pixel]

時刻 t における体積減少率は式(9)より計算できる。

$$\frac{dV}{dt} = \pi r^2 D \times n_{diff}(t) \quad (9)$$

$\frac{dV}{dt}$: 体積減少率 [mm³/s]

r : 供試体の半径 [mm]

式(9)で求めた体積減少率に密度をかけあわせることで、質量減少率を求めることができる。

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

$\frac{dm}{dt}$: 質量減少率 [g/s]

ρ : 密度 [g/mm³]

この上記の方法を用いて Ag, Fe, Al, Zn, Cu の 5 種類の純金属の質量減少率を求めることができた。しかし、Ta や Mo などの高融点金属は、他の材料と比較して発光強度が最大で 10 倍以上違うことや、アーク加熱風洞に投入された直後と融け始めてからの発光強度の差があまりにも大きすぎるため、カメラで撮影したデータがサチレーションを起こしてしまい、質量減少率を求めることが出来なかった。

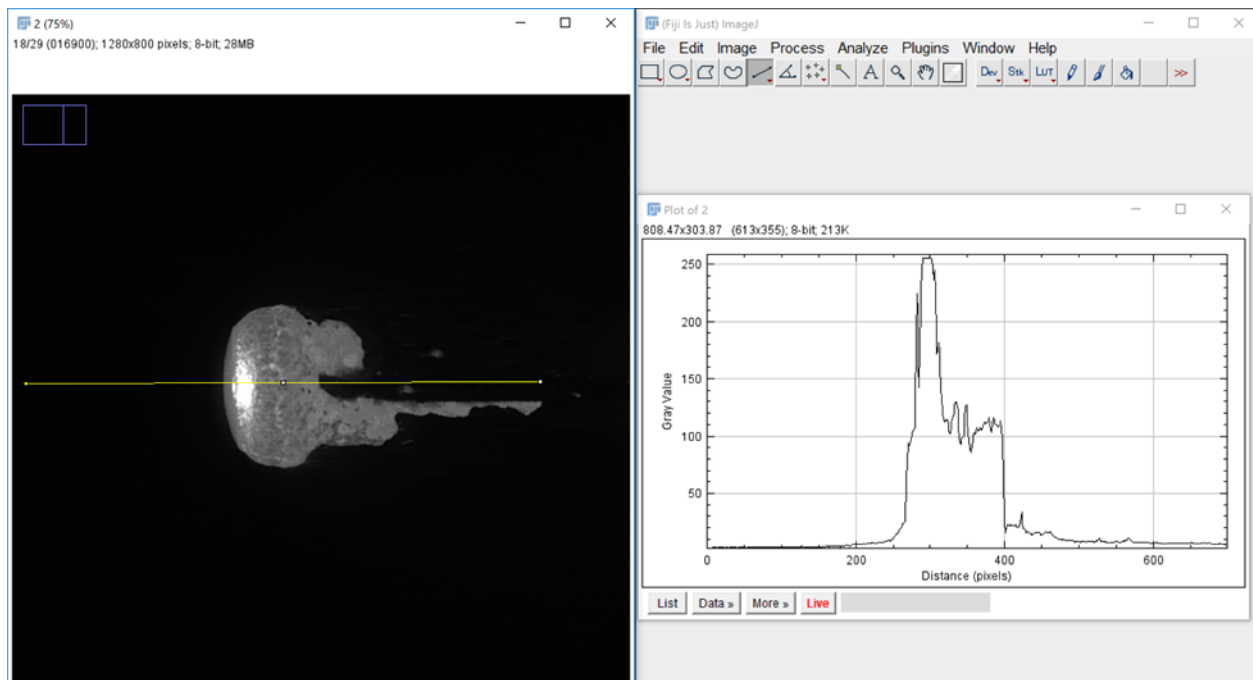


図 21 画像解析ソフト ImageJ を使って質量減少率を算出しているときの様子

2.3 実験結果

発光強度、質量減少率及び体積減少率の時間変化を以下に示す．なお、加熱率の条件に関してはすべて 12.3 MW/m^2 で実験を行っている．

2.3.1 高融点金属の発光強度の時間変化

高融点金属の発光強度の時間変化を図 22 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 $2,000 \text{ K}$ 以上である．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．また，Nb と Zr は Mo，Ta，W よりも発光時間が短いことが読み取れる．また，W は 30 秒近く加熱されても供試体自体がほとんど融けなかった．Ta は融けて円柱形状から変形したが，つらら状になって固まり，アーク気流によって吹き飛ばされることはなかった．

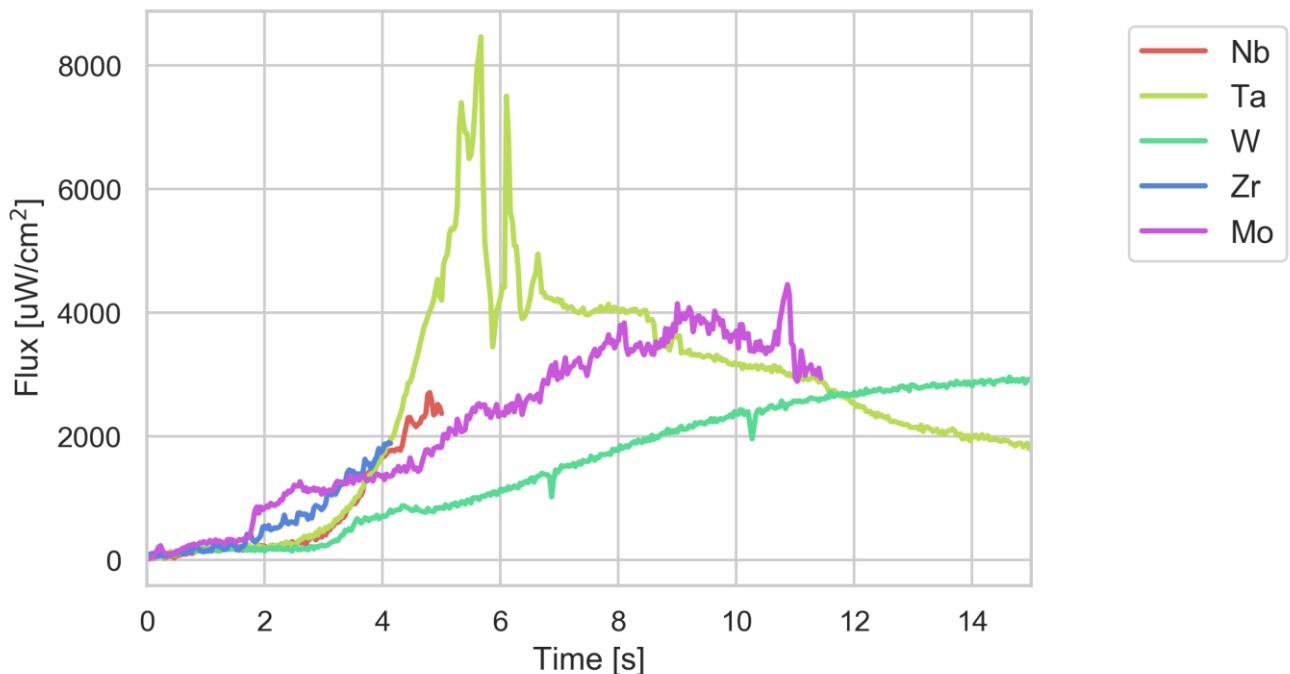


図 22 高融点金属材料の発光強度の時間変化

2.3.2 低融点金属の発光強度の時間変化

低融点金属の発光強度の時間変化を図 23 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 2,000 K 以下である。これより，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。また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。

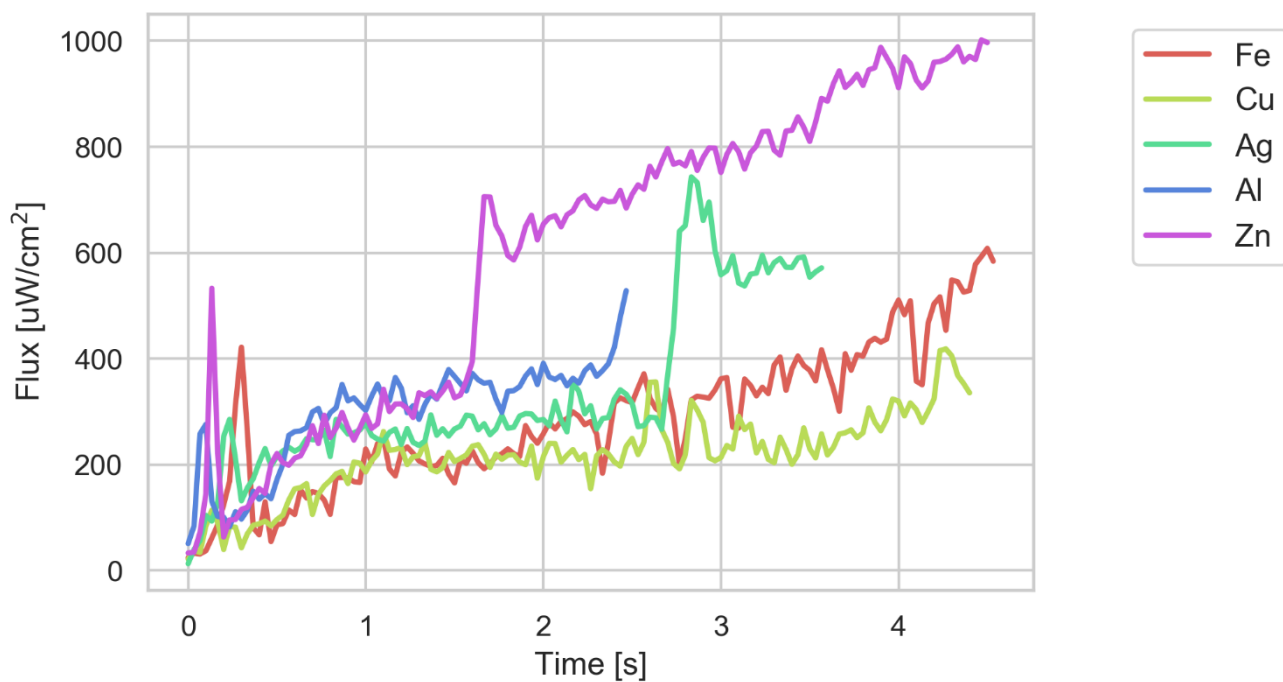


図 23 低融点金属の発光強度の時間変化

2.3.3 合金の発光強度の時間変化

合金の発光強度の時間変化を図 24 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 2,000 K 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。また SUS304 や HastilloyX などの熱拡散率の小さい合金の発光時間が長いこともわかる。

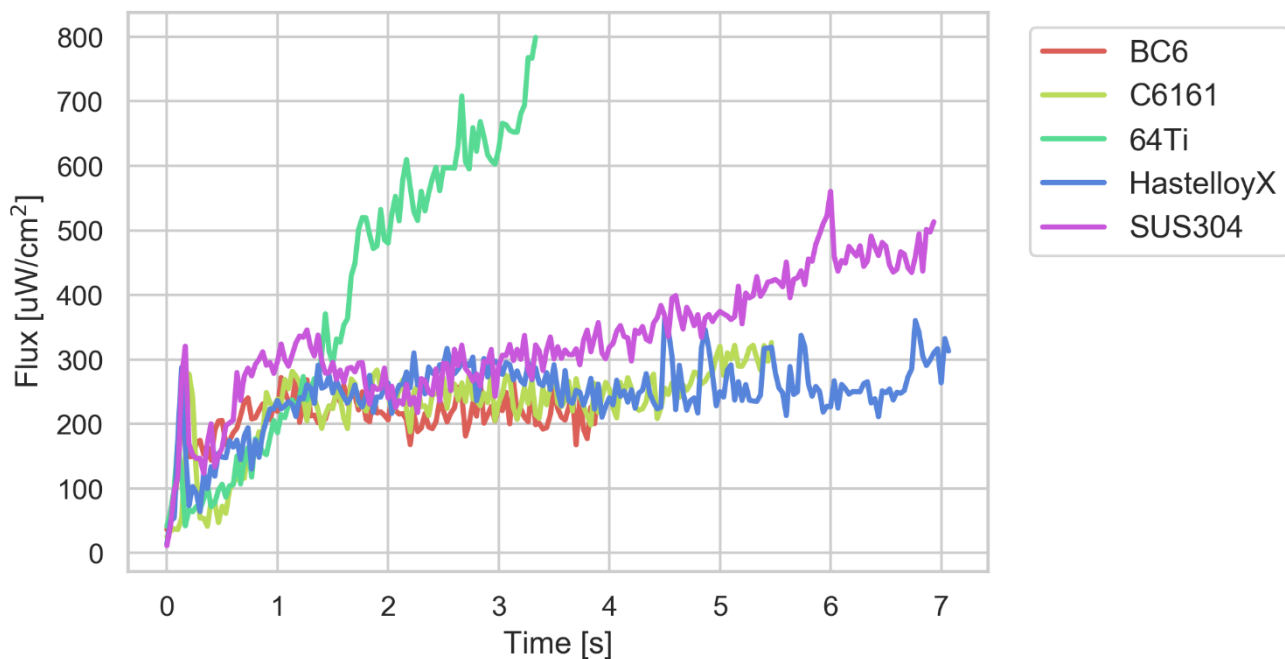


図 24 合金の発光強度の時間変化

2.3.4 セラミックの発光強度の時間変化

セラミックの発光強度の時間変化を図 25 に示す。縦軸が発光強度，横軸が時間となっている。TiO₂ と ZrO₂ と SiC の 3 つの材料を用意したが，TiO₂ と ZrO₂ は熱衝撃性に弱いためか，風洞に投入されてから 1 秒未満でアーク気流の熱衝撃によって破壊されてしまい，十分な実験結果が得られなかった。それに対して大気圏投入時の耐熱材料で使われる SiC は 30 秒以上加熱を続けても破壊されることも形状が変わることもなく，最後まで緩やかに発光強度が増大し続けた。

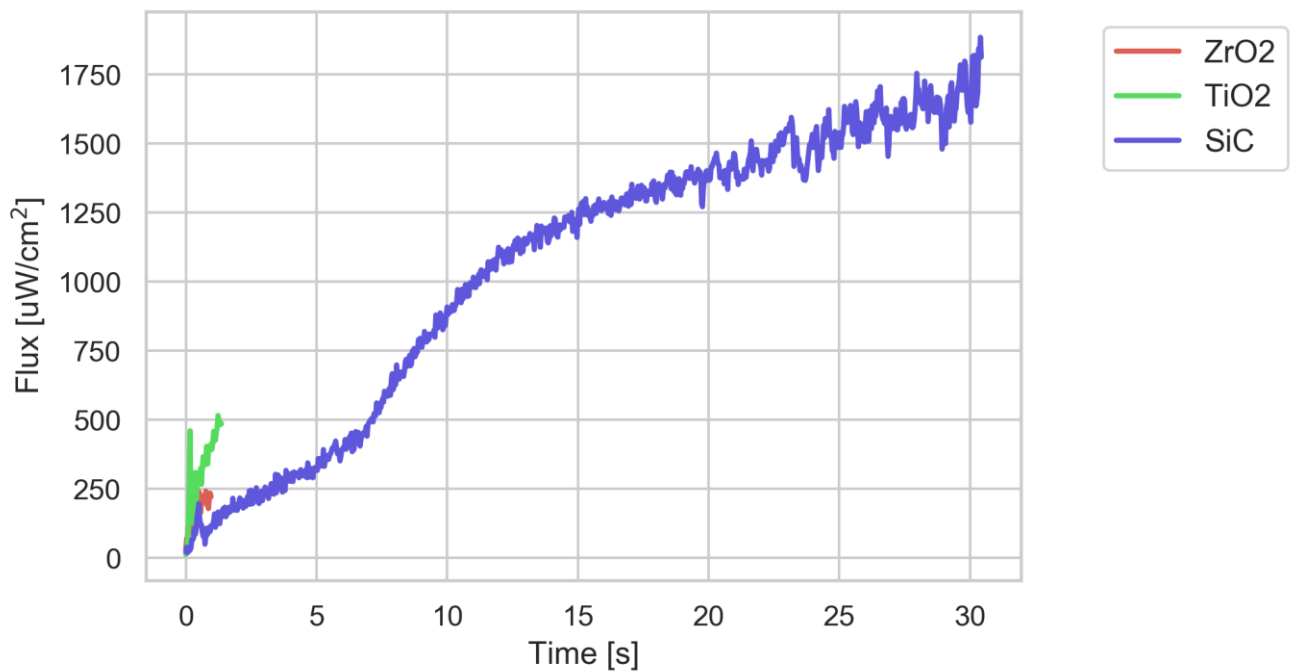


図 25 セラミックの発光強度の時間変化

2.3.5 質量減少率の時間変化

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 26 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。融け始めてからすぐに Al, Cu, Ag の3つが急激に融けているのに対して、Fe と Zn は時間をかけて融けていることがわかる。また、Al と Ag はアーク気流に暴露されてからすぐに融け始めているが、Zn や Cu は2 秒以上経過してから融け始めていることがわかる。

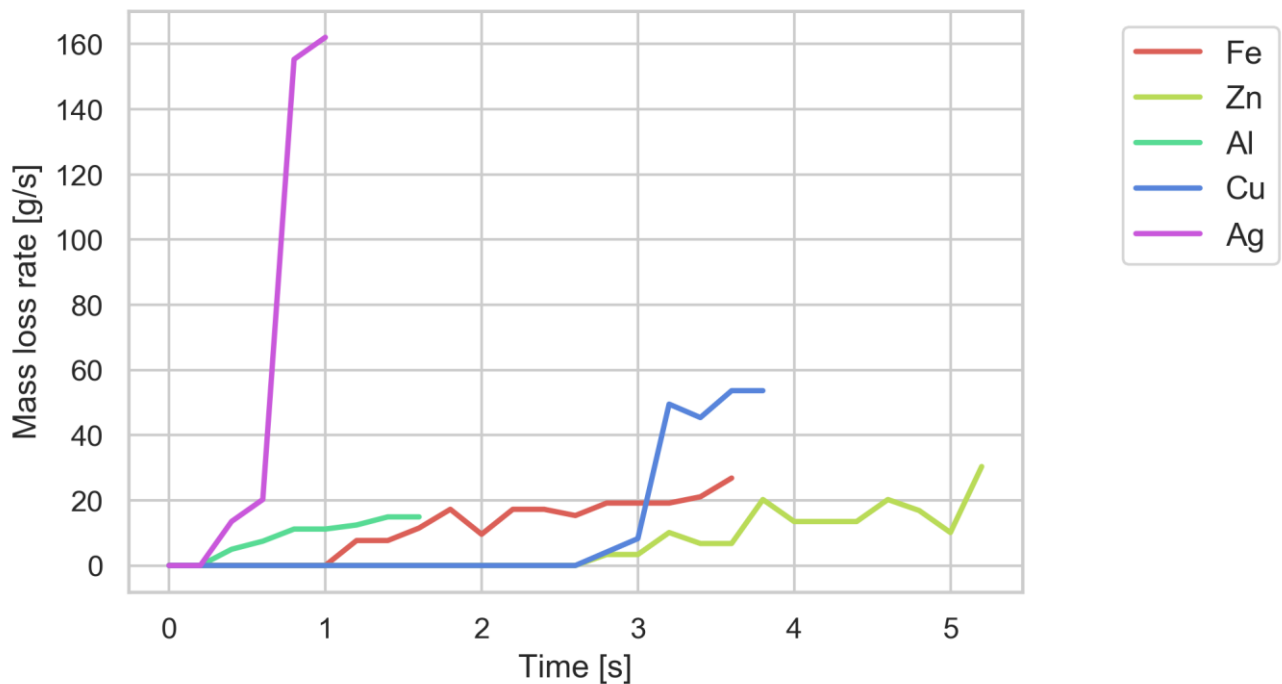


図 26 Fe, Zn, Al, Cu, Ag の質量減少率

2.3.6 体積減少率の時間変化

Fe, Zn, Al, Cu, Ag の 5 種類の純金属の体積減少率の時間変化を図 27 に示す。縦軸が体積減少率，横軸が時間となっている。図 26 と同様に Al, Cu, Ag の 3 つが急激に融けているのに対して，Fe と Zn は時間をかけて融けていることがわかる。

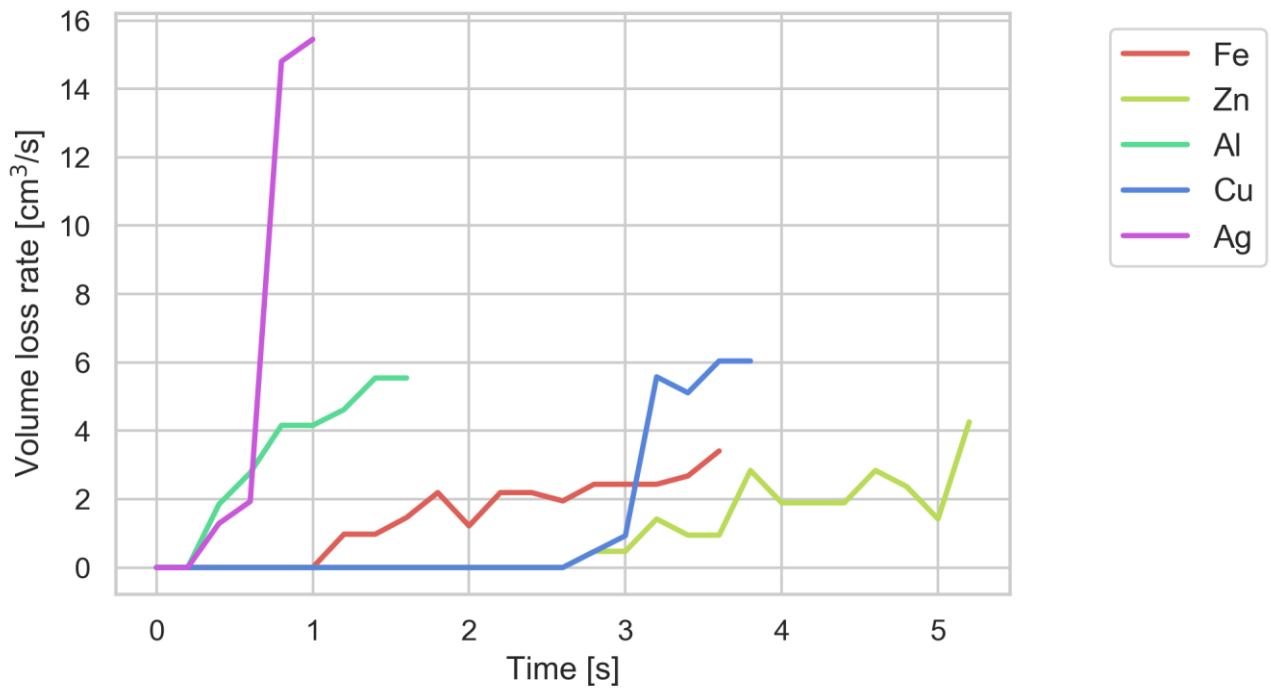


図 27 Fe, Zn, Al, Cu, Ag の体積減少率

第 3 章 発光強度と質量減少率の分析と考察

3.1 発光強度の分析項目

これまでの実験結果から材料によって発光強度が大きく違うことがわかった。その要因を分析するために、アーク加熱風洞実験で用いた供試体の発光強度と熱物性値との相関を分析することとして、以下の項目についてグラフで可視化して分析を行う。また、低融点の金属ではアーク気流が供試体との支持具に当たることによって生じる発光の影響が無視できないため、適宜材料を絞りこみ分析を行う。なおセラミックは熱衝撃で破壊されて十分なデータが無いが、熱物性値が不明なためこの分析結果からは除くこととした。加熱率の条件に関してはすべて 12.3 MW/m^2 で実験を行った結果を用いている。

1. 最大発光強度と供試体の融点
2. 平均発光強度と供試体の融点
3. 最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率
4. 最大発光強度までの時間と熱拡散率

3.1.1 最大発光強度と供試体の融点

最大の発光強度と供試体の融点の関係を図 28 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高くなり、それによって黒体輻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。

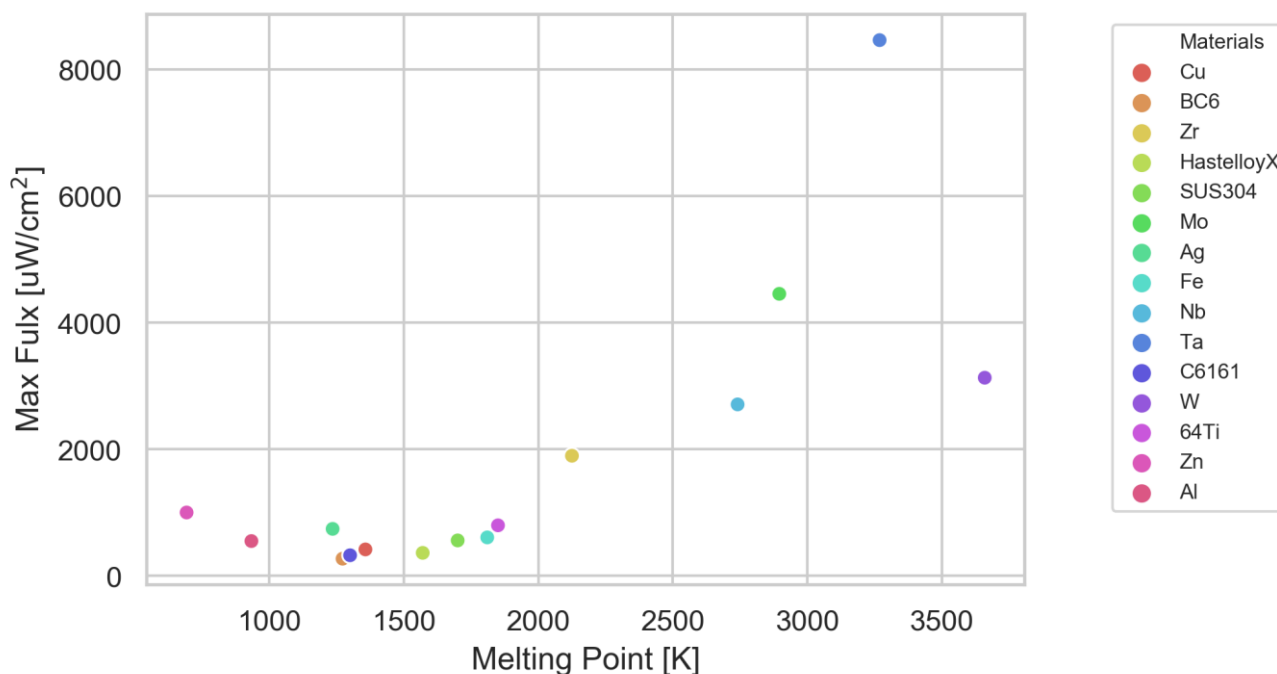


図 28 最大の発光強度と供試体の融点の関係

3.1.2 平均発光強度と供試体の融点

平均発光強度と供試体の融点の関係を図 29 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輻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．

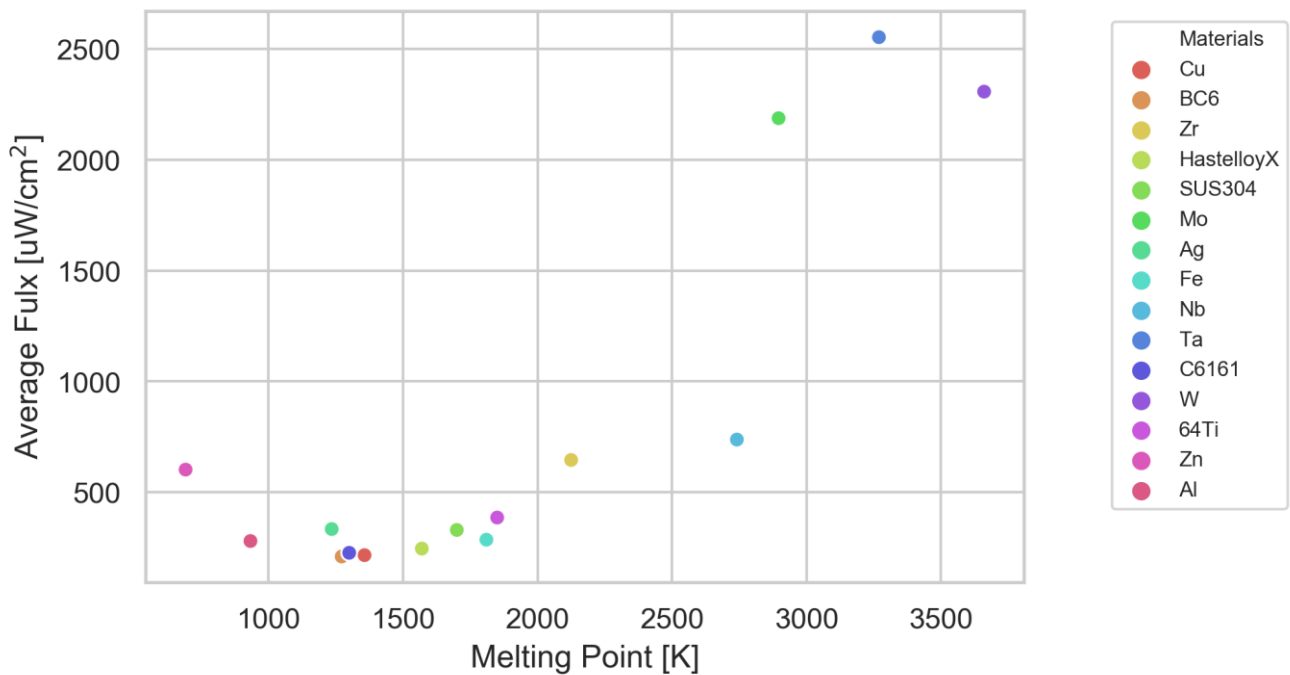


図 29 平均発光強度と供試体の融点の関係

3.1.3 最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率

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る。図 30 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輻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。

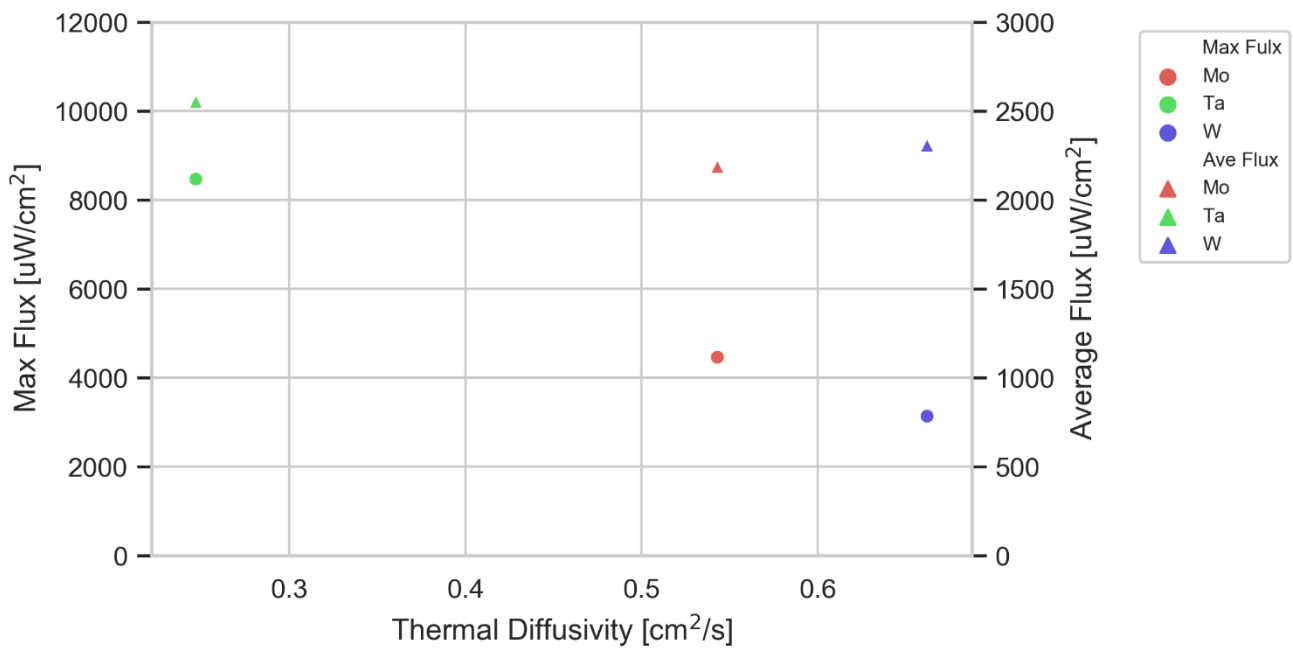


図 30 最大発光強度および平均発光強度と供試体の熱拡散率との関係

3.1.4 最大発光強度までの時間と供試体の熱拡散率

融点が 2,000 K 以下の材料では、支持具などの外的要因による発光などの影響を受けて、どの材料も加熱され始めてから早い時間で最大の発光強度近くまで達していたので、熱拡散率と最大の発光強度までの時間との関係が見づらくなっている。そのため融点が 2,000 K 以上の金属である Zr, Nb, Mo, Ta, W に絞って、最大発光強度までの時間と供試体の熱拡散率との関係を分析する(図 31)。縦軸は最大発光強度までの時間、横軸が熱拡散率となっている。これより熱拡散率が高くなると最大発光強度までの時間が増加することがわかる。これは熱拡散率が低い材料ほど、局所的な温度の上昇が急激に起こりやすくなり、黒体輻射による発光が増大して最大発光強度までの時間が短くなるが、熱拡散率が高いと金属は、供試体が融けながら全体の温度がゆるやか上昇して、熱拡散率が低い金属よりも遅い時間で発光強度が最大に達するため、最大発光強度までの時間が長くなると考えられる。

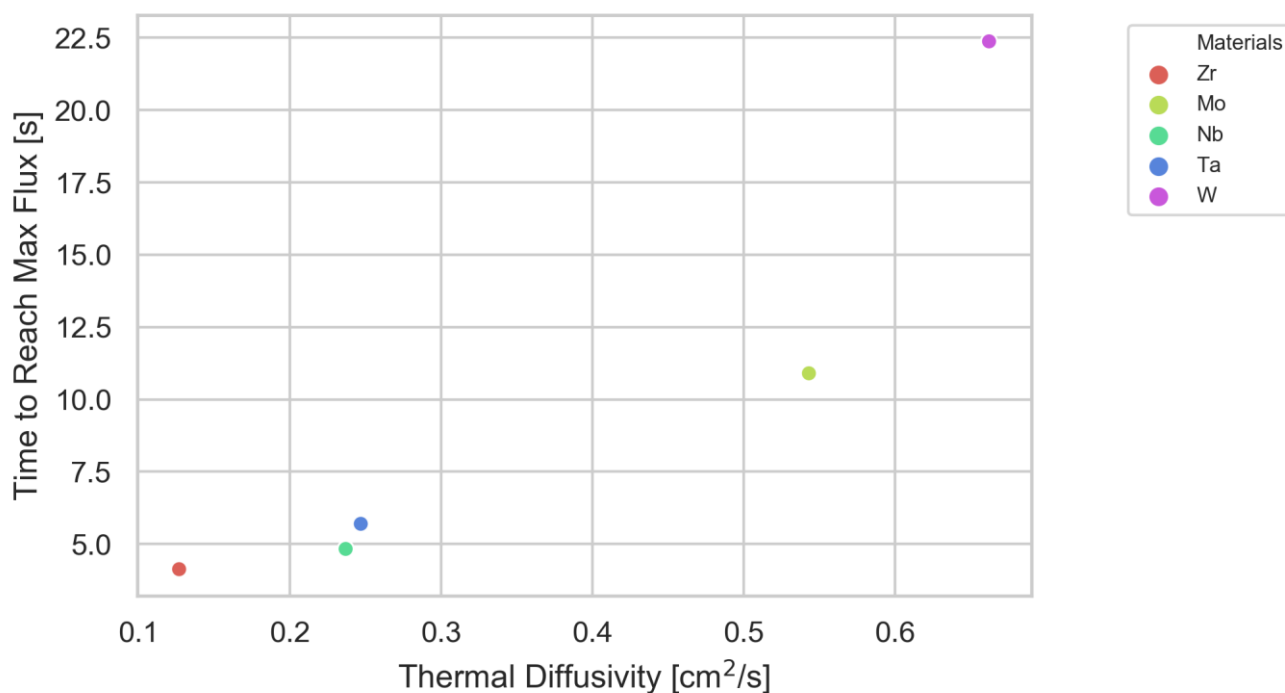


図 31 最大発光強度までの時間と供試体の熱拡散率との関係

3.2 画像を用いた分析

ここまでは分光スペクトルから発光の分析を行ってきたが、本節ではアーク加熱風洞で加熱中の供試体の画像の発光の分析を行う。図 32 に Nb と Mo が発光している際の様子を示す。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。また、Nb は可視光の中でも長波長側である橙色の発光が見られるが、Mo は可視光の中でも短波長側である黄色もしくは緑色での発光が見られる。Nb のような供試体自体の温度が上がって発光する現象は他の材料でも見られるが、Mo のように供試体の後方で尾を形成して発光する材料は、表 4 で示した材料の中では Mo と W 以外には見られない。

この現象について流星の発光モデルを使って説明を試みる。図 33 に流星の発光モデルを示す。図 33 の a (上) が流星本体にアブレーションが起きていないときの発光のモデルで、b (下) が流星本体でアブレーションを起きたときの発光モデルである。この図で示している通り、流星本体でアブレーションが起きている際には、昇華もしくは蒸発した流星物質と流星の後ろ側でガス雲が形成されて、地球大気との接触面で激しく衝突することでウェイク (wake) と呼ばれるプラズマの尾を流星本体後方に形成する。逆にアブレーションをしていない場合には、流星源の極近傍のみの発光しか見られない。つまり、アーク気流によって加熱されたことで Mo にアブレーションが起きて、それにより供試体の後方でプラズマの尾を形成して発光したと考えられる。

次に、このような現象がなぜ Mo でみられたのか、酸化物の熱物性に着目して考察を行う。図 34 に Mo と酸化 Mo の融点と沸点を示す。この図より、Mo の融点よりも酸化 Mo の沸点が低いことがわかる。この Mo の性質によって、Mo がアーク加熱風洞で加熱されているときに、試体前面の Mo が酸化反応で酸化 Mo になった後、酸化 Mo がすぐに気化、つまりアブレーションが起きて、供試体の後方で尾を形成して発光している可能性が考えられる。なお、W も同様の現象が見られているが、W の融点よりも W の酸化物の沸点が低いことがわかっている³⁶⁾。

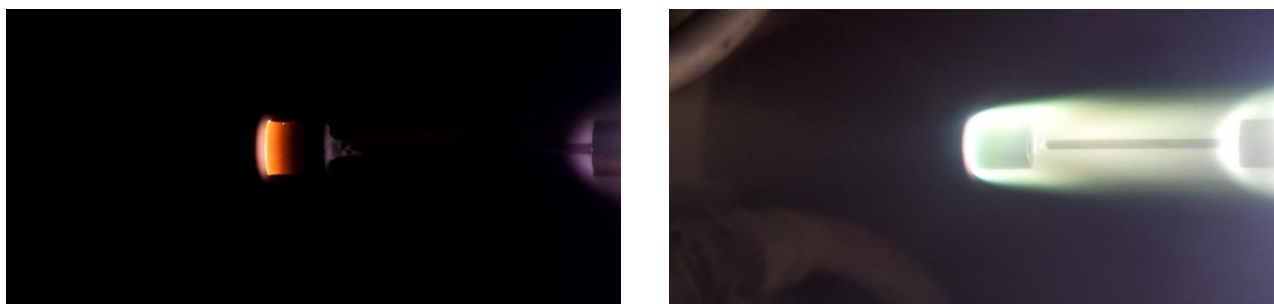


図 32 Nb (左) と Mo (右) が発光しているときの様子

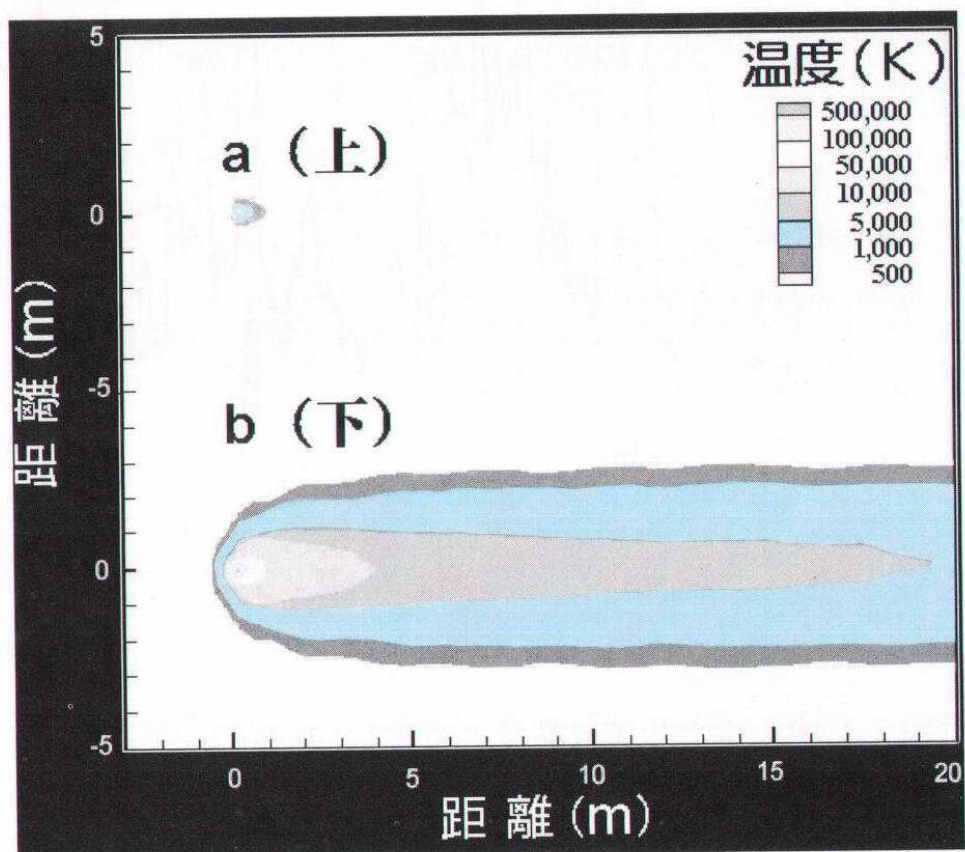


図 33 流星の発光モデル³⁾ (直径 1 cm, 突入速度 72 km/s, 発光高度 95 km での Mg の発光モデル)



酸化Mo (VI)
融点 : 1068[K]
沸点 : 1428[K]



Mo
融点 : 2896[K]
沸点 : 4912[K]

図 34 酸化 Mo (VI) と Mo の融点と沸点^{33) - 35)}

3.3 分光スペクトルの分析

アーク加熱風洞で加熱されている供試体でどのような発光現象が起きているのか分析するために、分光スペクトルの時間変化について分析を行う。分析する供試体は、発光強度が大きい Mo をモデルケースとした。図 35 に Mo の発光強度の時間変化を示す。この図の 1, 3, 5 s の時点での分光スペクトルを図 36 に示す。縦軸が単位波長当たりの発光強度、横軸が波長となっている。図 36 より 1 s の時点では黒体輻射による発光はあまり見られず、紫外線域での金属原子もしくは空気分子による励起発光が顕著に見られる。しかし時間が進むにつれて、可視光域での発光の割合が上昇していることがわかる。これは、時間経過とともに供試体の温度が上昇し、黒体輻射による発光が大きくなったためだと考えられる。

次に比較的融点の近い Nb と Mo の 5 s 加熱された後のスペクトルと、それに対してプランクフィッティングをした図を、図 37 と図 38 に示す。図 37 をみると Nb のスペクトルに対してプランクフィッティングしたときの黒体温度は 2,725 K であるが、Nb の融点は 2,741 K であり、Nb の融点に近い黒体温度がみられた。それに対して図 38 をみると、Mo のスペクトルに対してプランクフィッティングしたときの黒体温度は 4,048 K であり、Mo の融点は 2,896 K であるので、Mo の融点よりも大幅に大きい黒体温度がみられた。また、Mo は Nb のスペクトルよりも、原子バンドや分子バンドの発光が顕著にみられた。これは 3.2 節で示した通り、Mo が加熱中にアブレーションを起こして、気化することで融点を大きく超えた黒体温度になったことや、気化したあとに空気分子と衝突を起こし、金属原子と気体分子の励起発光が起きたため、原子バンドや分子バンドの発光が強く見られたと考えられる。

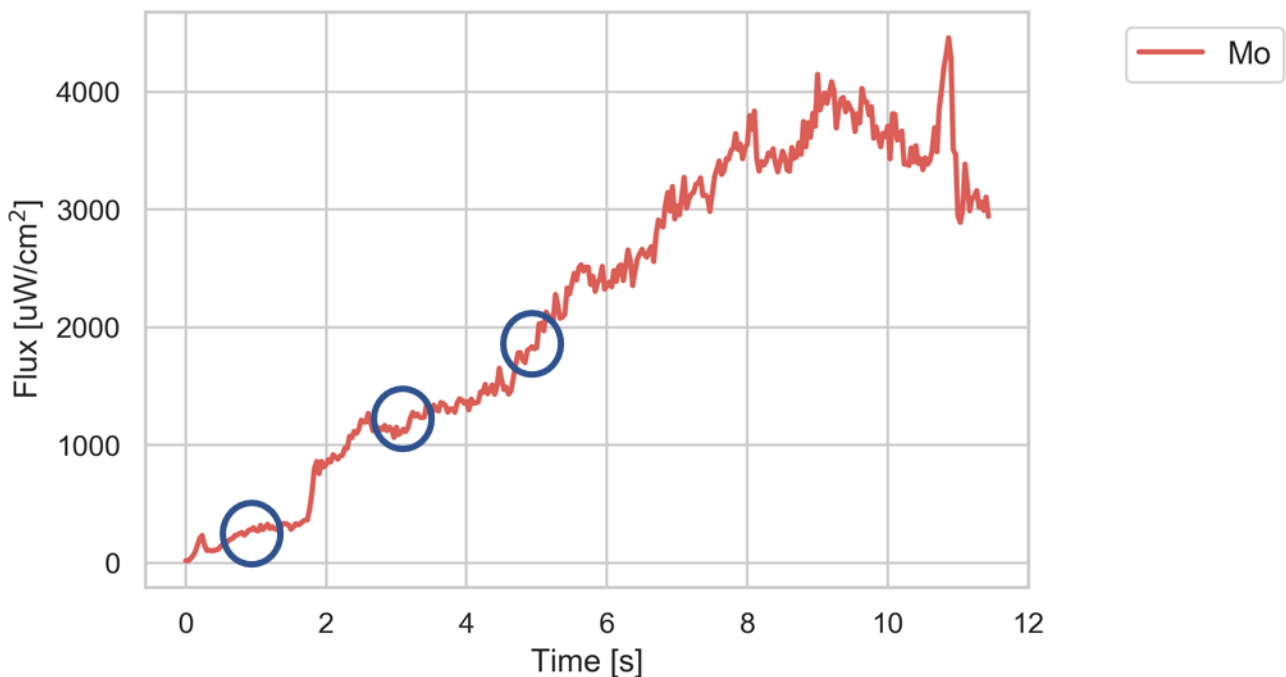


図 35 Mo の発光強度の時間変化

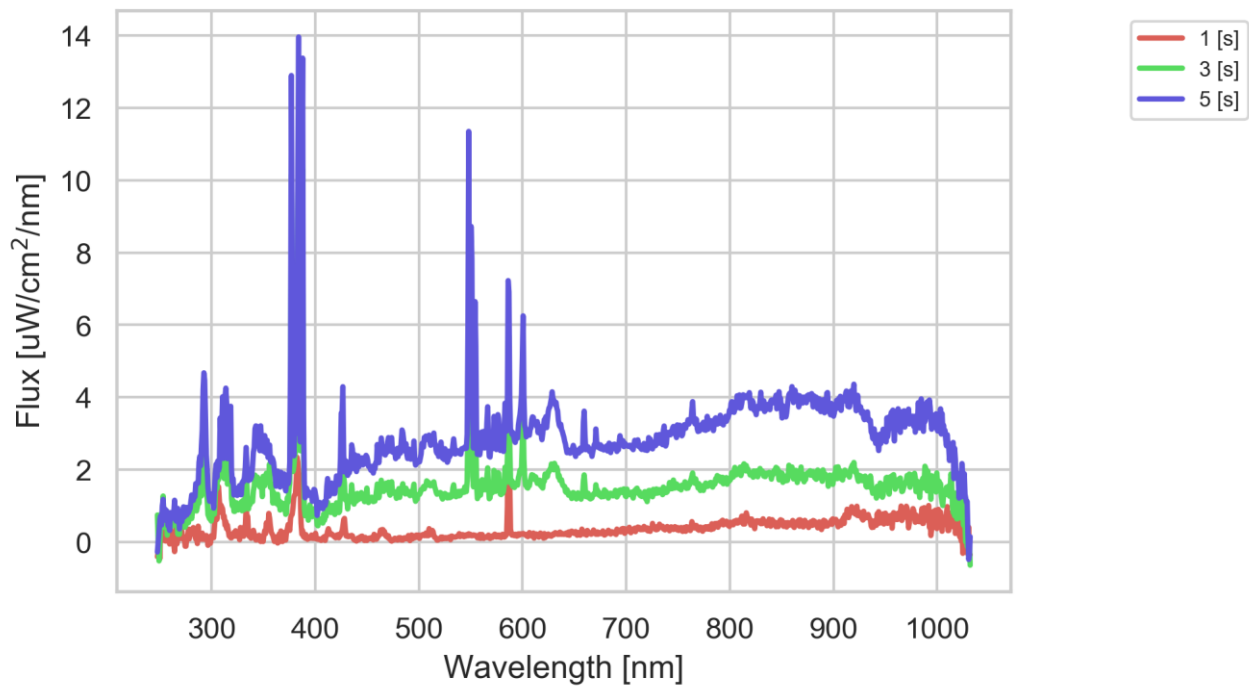


図 36 Mo がアーク風洞に投入されてから 1, 3, 5 s の時点の分光スペクトル

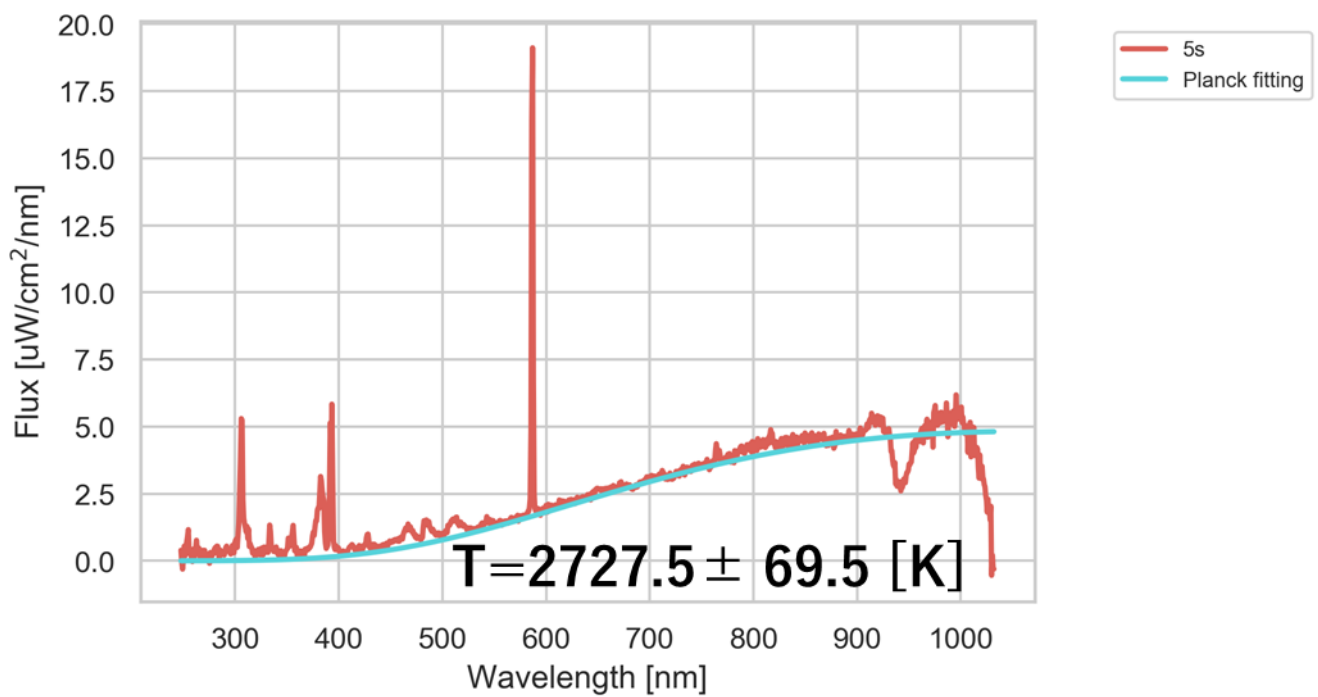


図 37 Nb を 5 s 加熱した時のスペクトルとプランクフィッティング

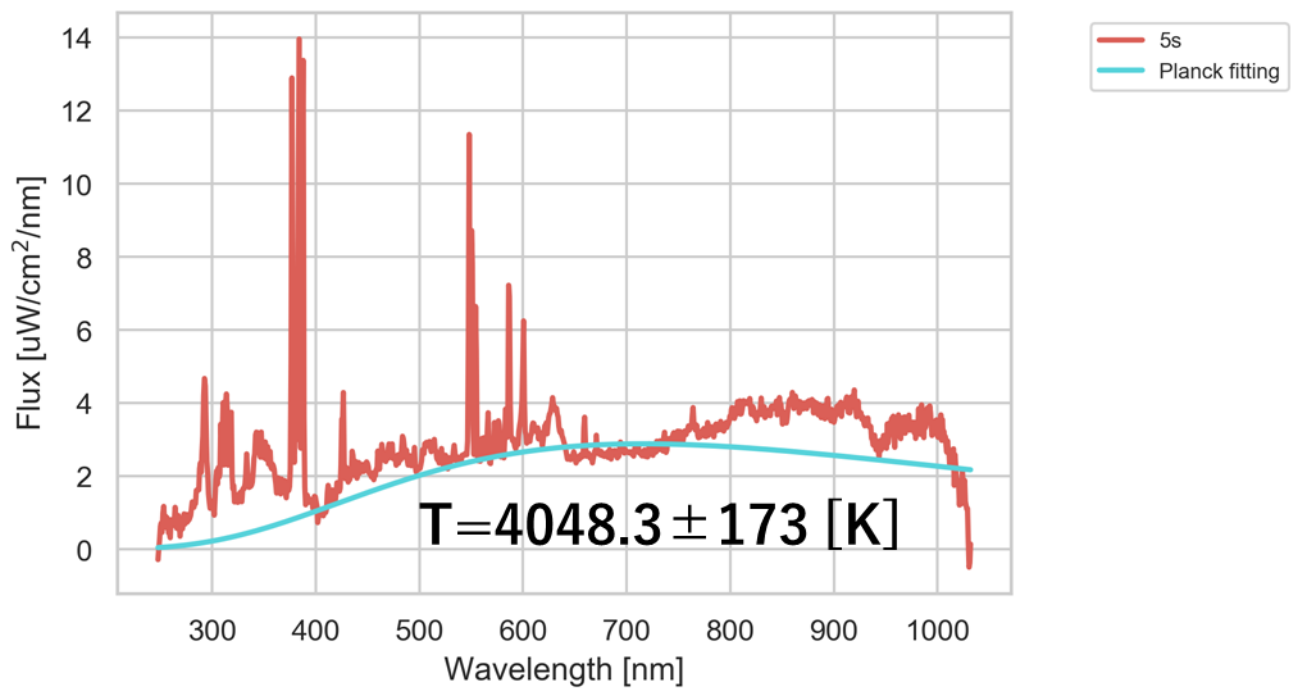


図 38 Mo を 5 s 加熱した時のスペクトルとプランクフィッティング

3.4 実視等級の算出と流星源の検討

これまでの実験結果から、実際に人工衛星から流星源を放出して大気圏に突入して発光しているときに、地上からどのくらいの明るさで観測することが出来るのか算出を行い、人工流星ミッションに適した流星源を提案する。流星源の高度は 70 km を想定する。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。実験結果から 式(2)-(6)を用いて実視等級を算出し、最大等級および平均等級、また各等級での発光時間を求めた。図 39 に実験で用いた供試体の最大実視等級と平均実視等級を、図 40 には供試体の各等級の発光時間を示す。TiO₂ と ZrO₂ はアーク加熱風洞に投入されてから 1 秒未満で破壊されてしまったため、ここでの結果からは除いた。図 39 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。また Nb や Zr は熱拡散率が低いいため最大実視等級は明るい、平均実視等級は暗い。つまり Nb と Zr は瞬間的に明るい、明るく光る時間が短いことがわかる。図 40 からは Mo、Ta、W の供試体は 2 等級および 3 等級以上の明るさでの発光がみられることがわかる。特に W は 2 等級以上の明るさでの発光が約 20 秒みられ、Ta や Mo に対して 4 倍以上の発光時間であることがわかる。それに対して他の供試体では、Nb のみわずかな時間だけ 3 等級以上の明るさでの発光が確認できるだけで、3 等級以上の明るさでの発光が見られないことがわかる。これらの結果から表 4 の供試体の中では Ta、W、Mo などの材料が明るくかつ長く発光するため、人工流星源に適しているといえる。特に、Mo と W は加熱されている間にアブレーションが起きているため、明るく光る流星に尾が見えるような発光が期待できる。ただし W、SiC、Ta は最後まで融けきらなかったため、加熱時間の上限である 30 秒で実験を終えていることに注意が必要である。

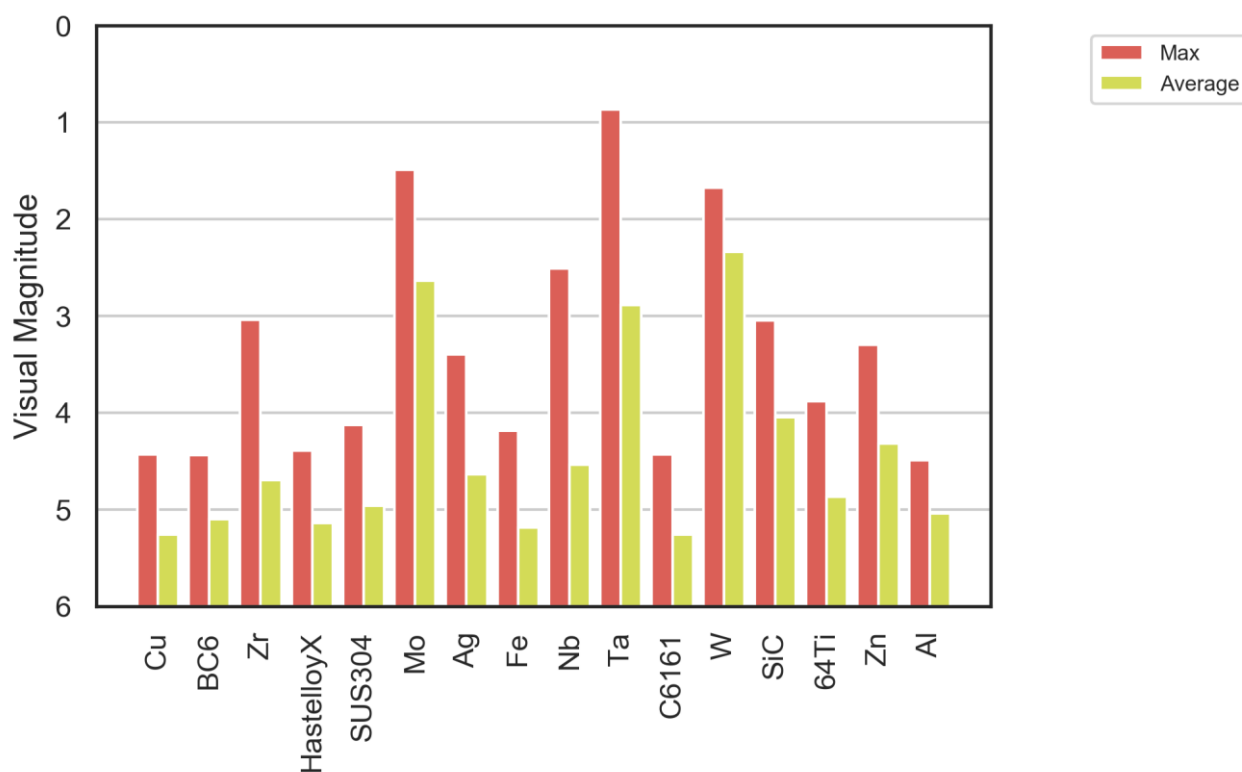


図 39 供試体の最大実視等級と平均実視等級

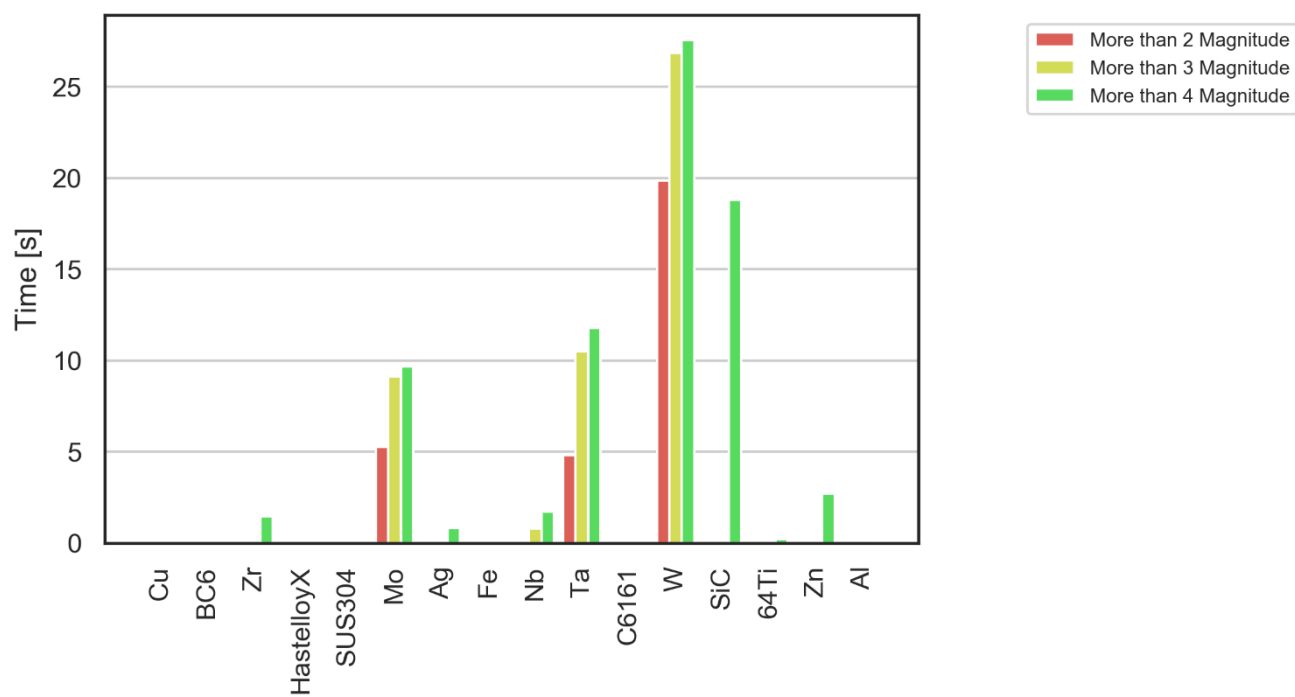


図 40 供試体の各等級における発光時間

3.5 質量減少率の分析項目

アーク加熱風洞実験で用いた供試体の質量減少率について分析するために、以下の項目についてグラフで可視化して分析を行う。材料は 2.3.5 で示したものと同じく、Fe, Al, Cu, Zn, Ag の 5 つの材料で分析した。なお、加熱率の条件に関しては、特に記載されていない場合はすべて 12.3 MW/m^2 で実験を行っている。

1. 融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率
2. 融け始めてからの質量減少率の平均値と融点
3. 質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率
4. 質量減少率の増加率の平均値と融点
5. 加熱率を変えた時の質量減少率の変化

3.5.1 融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率

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 41 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とがわかる。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、加熱率を変えたとこの境界値が変化すると考えられる。

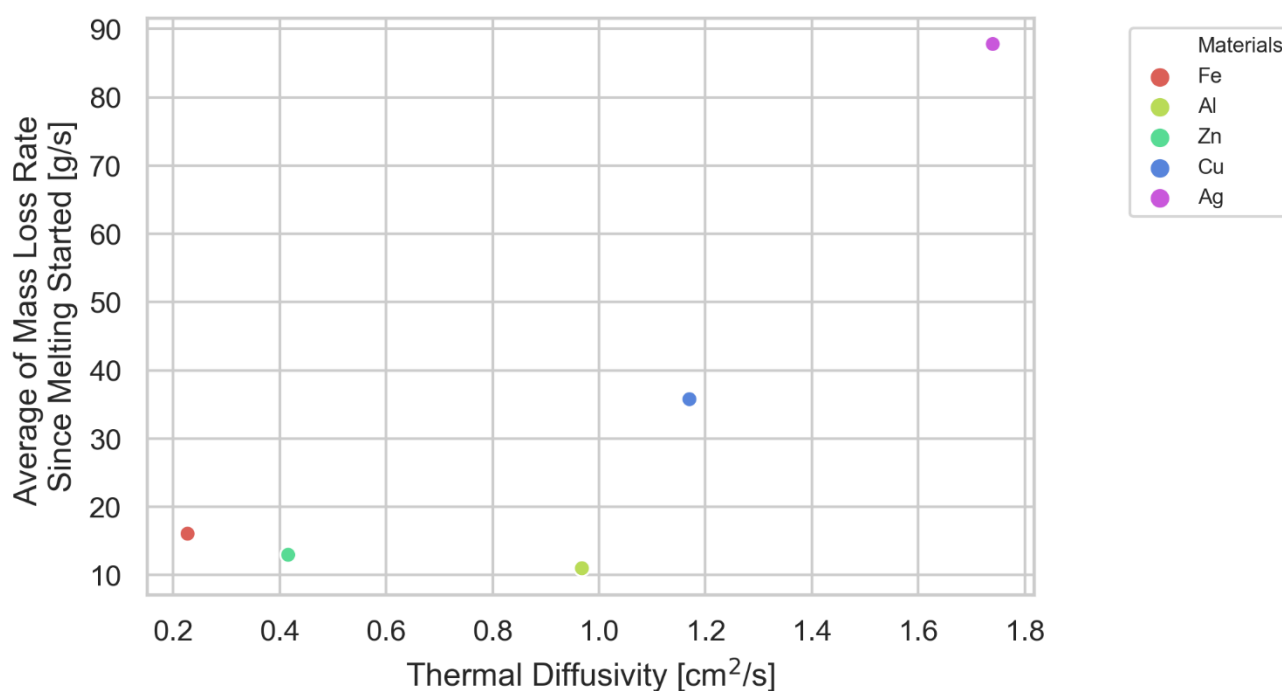


図 41 融け始めてからの質量減少率の平均値と熱拡散率

3.5.2 融け始めてからの質量減少率の平均値と融点

融け始めてからの質量減少率の平均値と供試体の融点との関係を図 42 に示す．縦軸が融け始めてからの質量減少率の平均値，横軸が融点となっている．この図から融け始めてからの質量減少率の平均値は Zn と Al よりも融点の高い Ag で最大値をとったあと，Ag よりも融点の高い Cu と Fe は Ag よりも小さくなっている．この結果から，低融点金属では融け始めてからの質量減少率と融点の間には相関がみられなかったが，Mo や W などの融点の高い材料では熱輻射の影響も無視できなくなるため，融点が高くなるほど質量減少率が低くなる可能性がある．

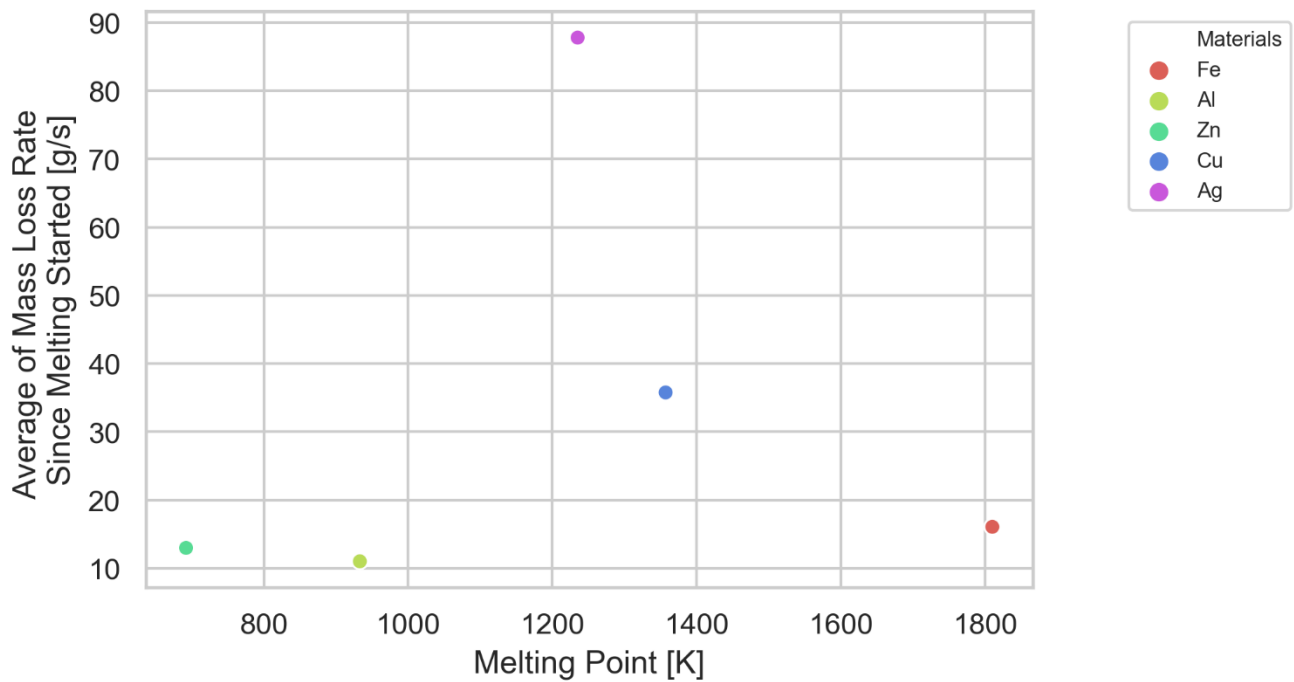


図 42 融け始めてからの質量減少率の平均値と融点の関係

3.5.3 質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率

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 43 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とがわかる．この値は 3.5.1 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．

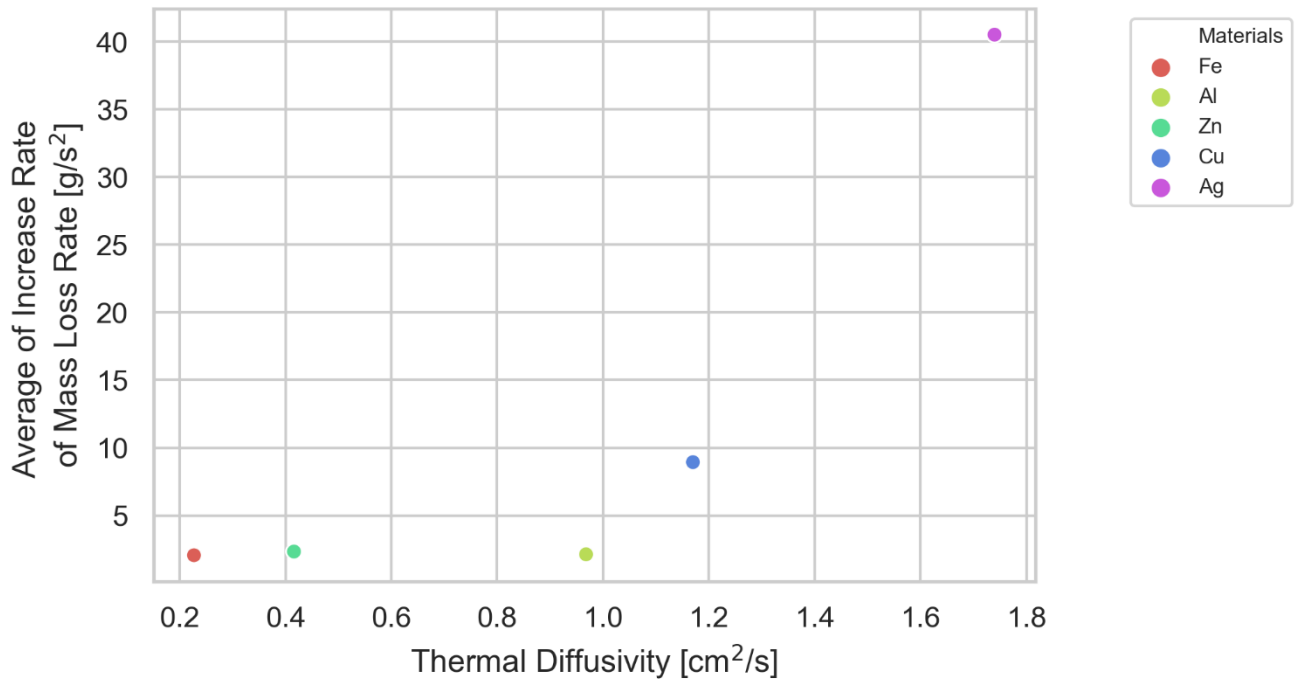


図 43 質量減少率の増加率の平均値と熱拡散率の関係

3.5.4 質量減少率の増加率の平均値と融点との関係

質量減少率の増加率の平均値と供試体の融点との関係を示した散布図を図 44 に示す。縦軸が質量減少率の増加率の平均値、横軸が融点となっている。この図から、質量減少率の増加率の平均値は図 42 と同様、Zn と Al よりも融点の高い Ag で最大値をとったあと、Ag よりも融点の高い Cu と Fe は Ag よりも小さくなっている。この結果から質量減少率の増加率と融点の間には相関がみられなかった。ただし Mo や W などの融点の高い材料では熱輻射の影響も無視できなくなるため、融点が高くなるほど質量減少率の増加率が低くなる可能性がある。

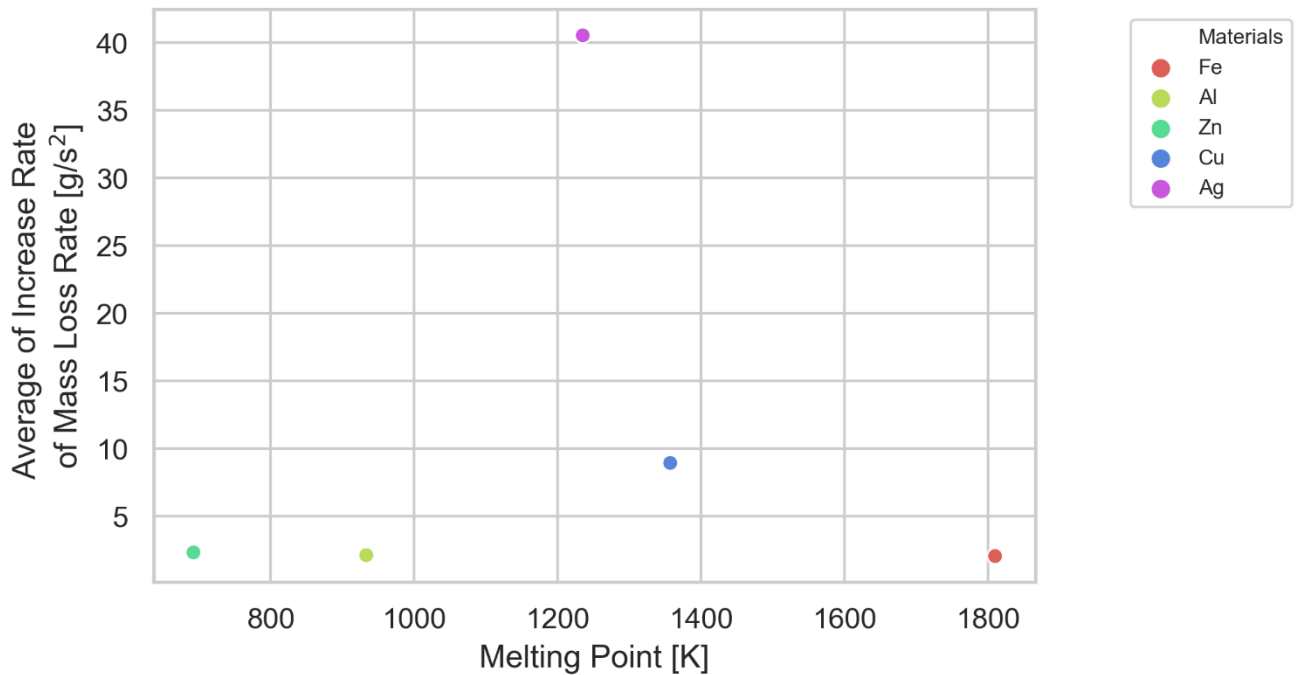


図 44 質量減少率の増加率の平均値と融点との関係

3.5.5 加熱率を変えた時の質量減少率の変化

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 45 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ことがわかる。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。よって加熱率を下げるほど，質量減少率が低下し，完全に融けるまでの時間も長くなることがわかる。

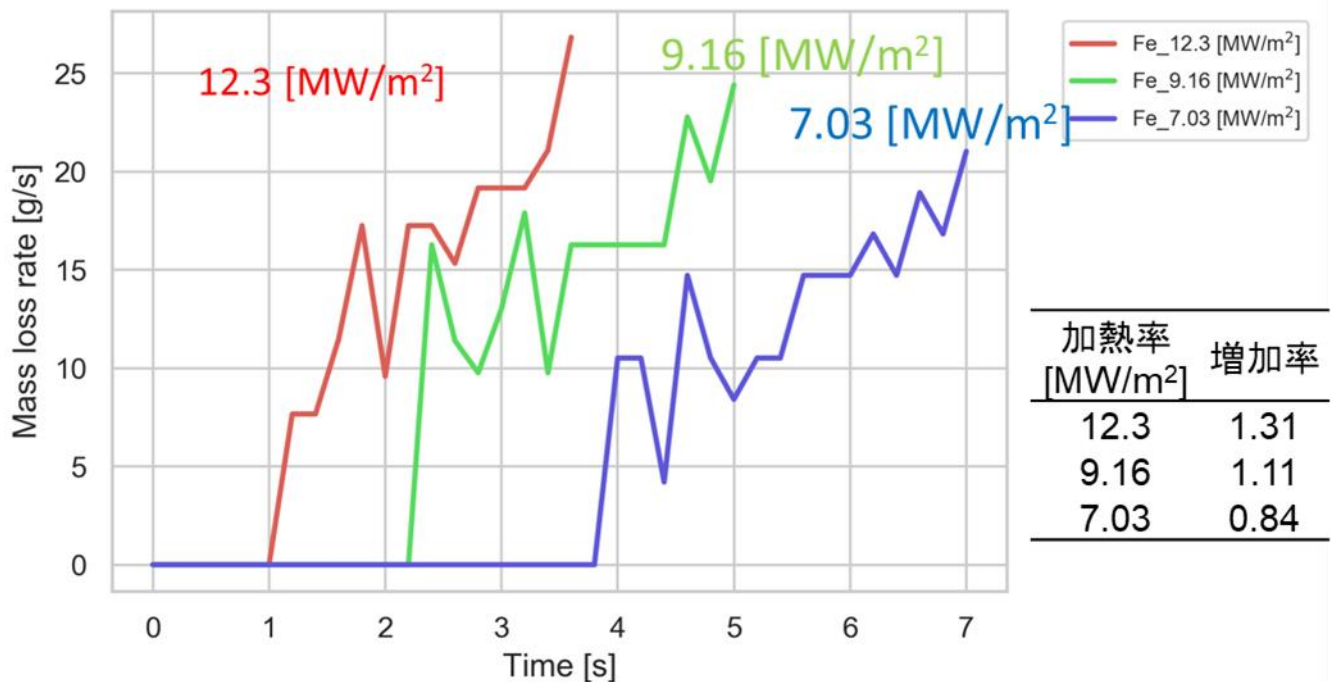


図 45 材料が Fe で加熱率を変えたときの質量減少率の時間変化

第4章 結論

4.1 結論

本研究ではアーク加熱風洞を用いて、様々な熱物性をもった供試体で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. 融点が高いほど最大、平均発光強度は大きくなる。熱拡散率を低いほど、最大発光強度は大きくなる。
2. 熱拡散率を低いほど、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。

4.2 今後の課題

今後の課題としては、以下の検討を進める必要があると考えられる。

- 今までの実験条件を同じ条件で実験を行い、試行回数を増やすことで、実験結果の再現性を向上させること。
- 流星痕から高層大気観測を行うこともできるため、供試体の後ろの側の発光を分光観測できるように実験装置及び支持具の改良をすること。
- 時間とともに加熱率をかえることができる実験装置を用いて、大気圏突入の加熱率に近い条件で発光強度と質量減少率の時間履歴を求められるようにすること。
- 酸化物の熱物性とアブレーションの有無の関係を確認するため、Mo と W が実験前後で酸化反応が起きているか分析し、酸化反応が起きてから気化するまでのプロセスについて調査すること。

参考文献

- 1) 観測ロケットを用いた超高層大気領域の研究：<http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2012/abe/> [cited on Dec. 18. 2018.]
- 2) 流星発光メカニズム：http://www.naoj.org/Pressrelease/2007/09/10/j_index.html [cited on Jan. 2, 2017.]
- 3) 沼田宗一郎：アーク加熱風洞を用いた流星アブレーションの研究，平成 27 年度宇宙航行の力学シンポジウム，2015.
- 4) 海老塚 昇：グリズムを用いた天体観測，光学，Vol.30, No.12，pp.566-571, 2010.
- 5) 阿部新助 他：流星に生命の起源を求めて，天文月報 2002 年 11 月，pp.515-528, 2002.
- 6) Wendell G. Ayers, LUMINOUS EFFICIENCY OF AN ARTIFICIAL METEOR AT 11.9 KILOMETERS PER SECOND, NASA TECHNICAL NOTE D-2931, pp1-36, 1965.
- 7) McCrosky, R E, et.al, Results from an Artificial Iron Meteoroid at 10km/sec, Smithsonian Contributions to Astrophysics, Vol. 7, pp199-208, 1963.
- 8) Ceplecha, Z., et al., Meteor Phenomena and Bodies, Space Science Reviews, Vol.84, pp. 327-471, 1998
- 9) 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.
- 10) 人工流れ星，<http://cemed.in/hakuto/news/archives/1452> [cited on Jan. 24. 2019.]
- 11) 栗原 聡文 他：ALE衛星プロジェクト概要，第62 回宇宙科学技術連合講演会講演集，2018.
- 12) Watanabe, J., et al., Wide-Field TV Observation of the Leonid Meteor Storm in 2001: Main Peak over Japan, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 54, Issue 2, pp. L23-L26, 2002.
- 13) 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
- 14) 下田孝幸，山田和彦：JAXA/ISASにおけるアーク風洞の現状と展開，日本航空宇宙学会誌，Vol.63, No.10, pp.315-320, 2015.
- 15) Y. S. Touloukian., et al., Thermophysical properties of matter, Vol.10, pp.2-220, 1974
- 16) 日本熱物性学会編：新編 熱物性ハンドブック，養賢堂，2008.
- 17) 炭化ケイ素 <http://www.asuzac-ceramics.jp/material/material2.htm> [cited on Dec. 17. 2018]
- 18) HASTELLOY X alloy <http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/x-brochure.pdf?sfvrsn=8> [cited on Dec. 17. 2018]
- 19) Inconel alloy 718 http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf [cited on Dec.17. 2018]
- 20) Cast copper alloy C90500 (Gun Metal) http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=cast_copper_alloy_c90500_gun_metal [cited on Dec. 17. 2018]
- 21) The Engineering ToolBox <https://www.engineeringtoolbox.com/> [cited on Dec. 17. 2018]
- 22) 日本酸化チタン工業会：ナノサイズ酸化チタンについて，pp48, 2008.
- 23) 京セラ：CHARACTERISTICS OF KYOCERA FINE CERAMICS 材料特性表，pp7
- 24) 東條壮男，川路 均，阿竹 徹：安定化ジルコニアの低温熱容量と格子欠陥，pp187, 2000.
- 25) QEproサイエンティフィックグレード分光器，<http://www.oceanoptics.jp/products/qepro.html> [cited on Jan. 9, 2017.]
- 26) DH-3plus-CAL Family, <http://oceanoptics.com/product/dh-3-3-plus-family/> [cited on Jan. 18. 2019.]
- 27) HG-1, <http://www.oceanoptics.jp/products/hg1.html> [cited on Jan. 18. 2019.]
- 28) Nikon D5300, <https://www.nikon-image.com/products/slr/lineup/d5300/> [cited on Dec. 21. 2018.]
- 29) MEMRECAM HX-7S, <https://www.nacinc.jp/analysis/high-speed-camera/memrecam-hx7s/>, [cited on Dec. 21. 2018.]
- 30) 麻野将吾：形状の異なるスラグ式カロリメータによるアーク気流中の供試体の加熱率測定，平成28年度，首都大学東京卒業論文，1-34, 2015.
- 31) Midi LOGGER GL900 http://www.graphtec.co.jp/site_instrument/instrument/gl900/index.html

[cited on Dec. 18. 2018]

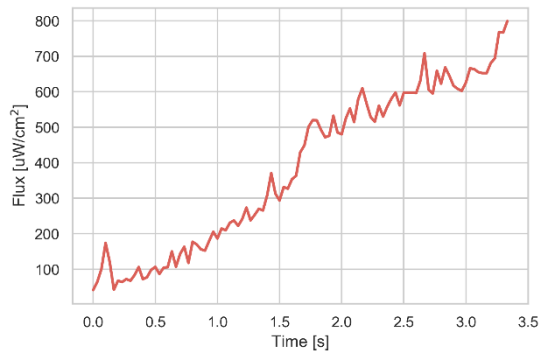
- 32) M.S. Bessell, et.al, Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O-M stars, *Astron. Astrophys.* 333, pp231–250, 1998
- 33) Molybdaen <http://pse-mendelejew.de/molybdaen/> [cited on Jan. 8. 2019.]
- 34) 日本無機化学工業株式会社 http://www.muki.co.jp/product/molybdenum_regular/oxide_m.html [cited on Jan 8. 2019.]
- 35) 上條 富士太：酸化モリブデン膜の作製と基本的特性の評価，高知工科大学修士論文，pp1-40, 2003
- 36) 佐藤 進：WO₃-MoO₃蒸着薄膜におけるエレクトロクロミズム，応用物理，第47巻，第7号，pp.656-657, 1978.

謝辞

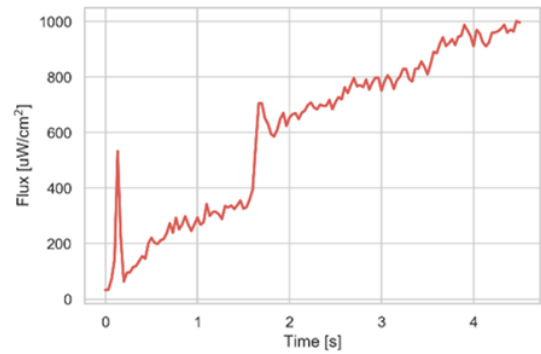
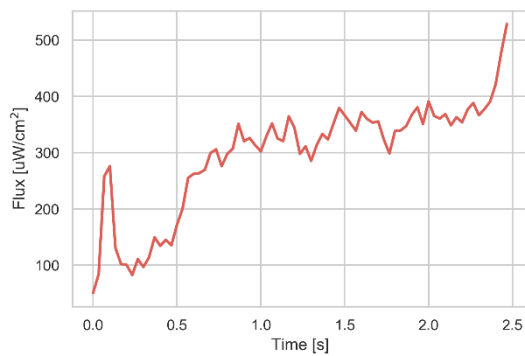
本研究を進めるにあたり、毎年3か月にわたる実験準備と2週間の実験を手伝ってくださった、首都大流星チーム作山さん、麻野さん、木村さん、平野君、石川君、工藤君には深く感謝を申し上げます。また、日本大学阿部研の阿部先生、荒木さん、岩崎さん、松山君、鴻巣君、大木君、宮下君、小川君も実験を行うにあたって、多くのことを協力してくださりありがとうございました。また、株式会社 ALE の岡島様、蒲池様、Adrien 様には貴重な実験機会とご助言を頂き感謝を申し上げます。また自分の研究結果がこれからの人工流星プロジェクトに少しでも貢献できたら幸いです。最後に学部1年生から修士2年までの6年間一緒だった研究室の同期と、ご指導と教育をしていただいた佐原先生には心から感謝を申し上げます。誠にありがとうございました。

付録 A 発光強度の時間変化

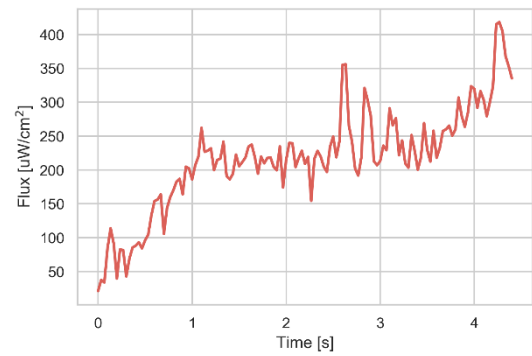
表 4 で示した供試体の発光強度の時間変化を示す。ここで発光強度は分光器から 1m の距離から観測したときの値となっている。



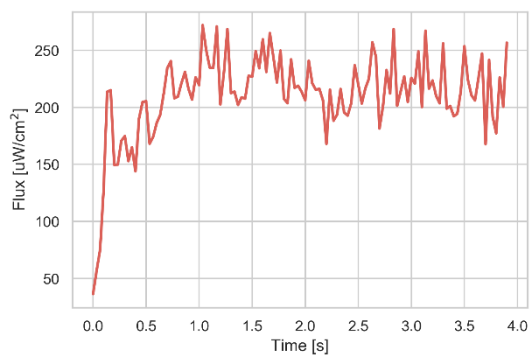
^{64}Ti の発光強度の時間変化
(加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)



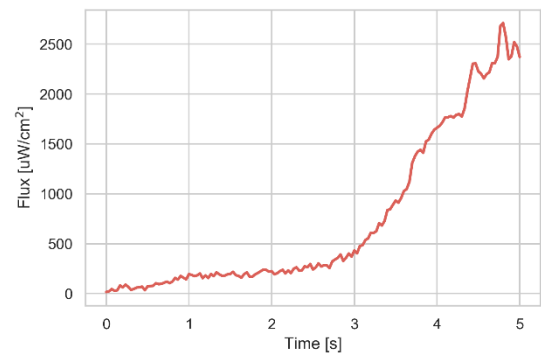
Zn の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)



Al の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)

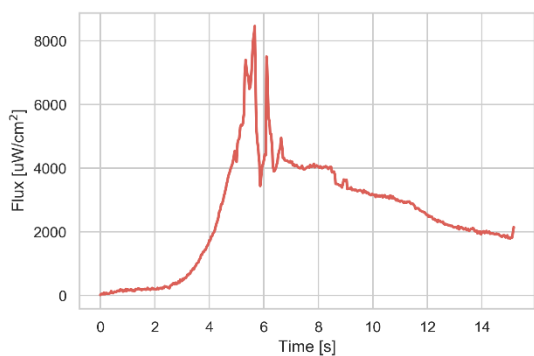


Cu の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)

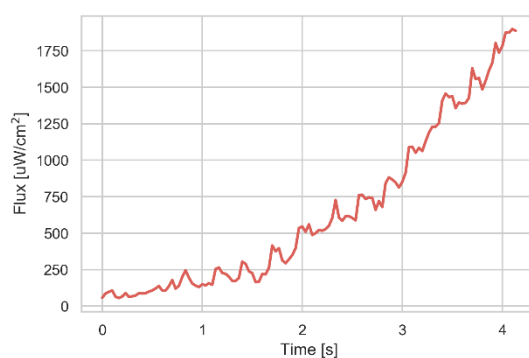


BC6 の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)

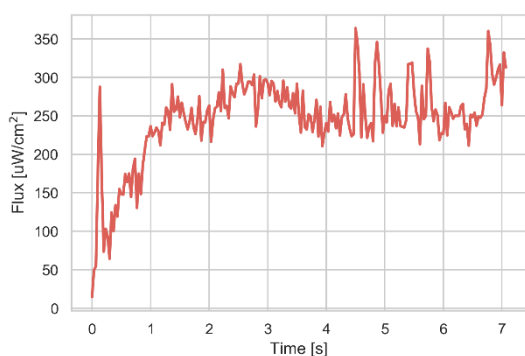
Nb の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)



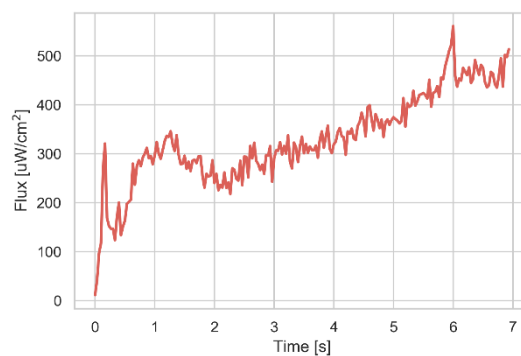
Ta の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



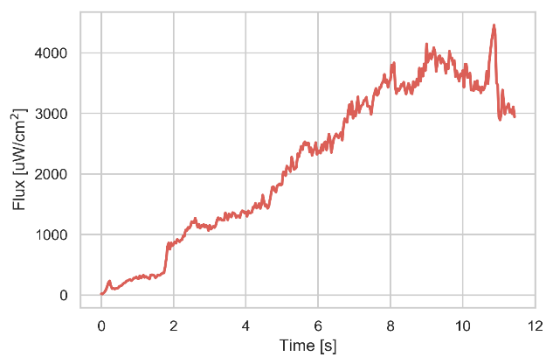
Zr の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



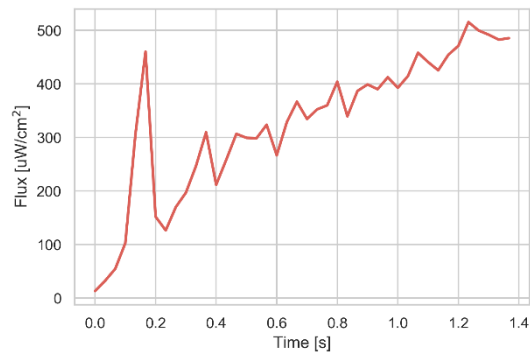
Hastelloy X の発光強度の時間変化
(加熱率 12.3 MW/m²)



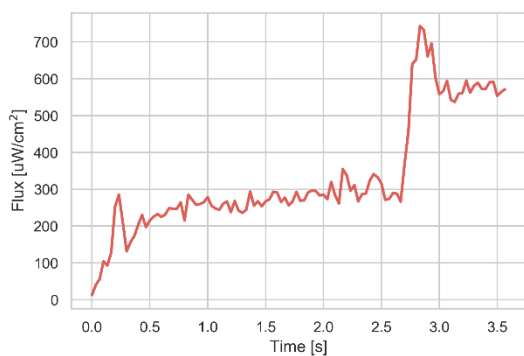
SUS304 の発光強度の時間変化
(加熱率 12.3 MW/m²)



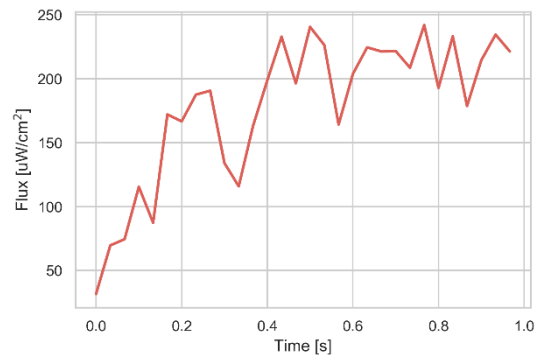
Mo の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



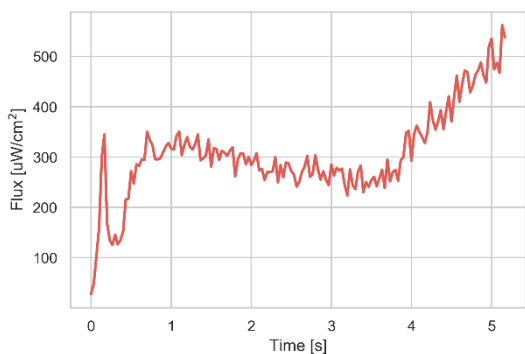
TiO₂ の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



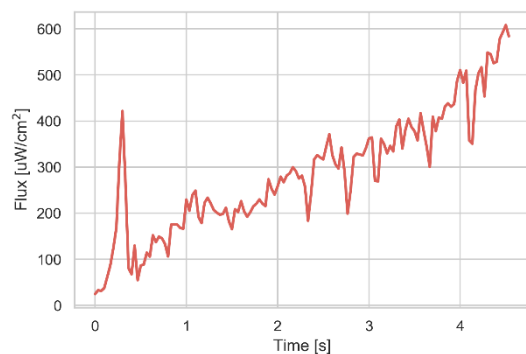
Ag の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



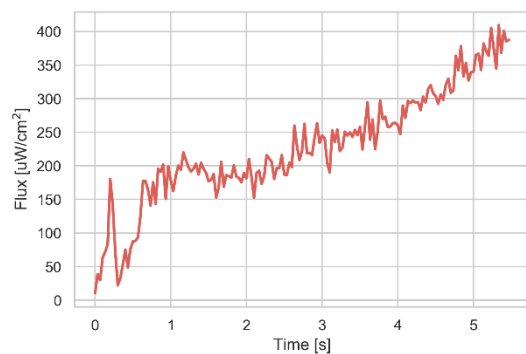
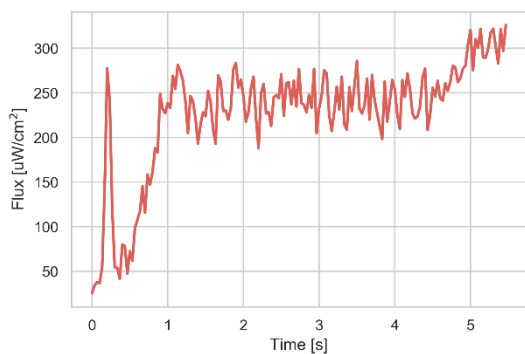
ZrO₂ の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3 MW/m²)



Cu の発光強度の時間変化 (加熱率 $9.16 \text{ MW}/\text{m}^2$)

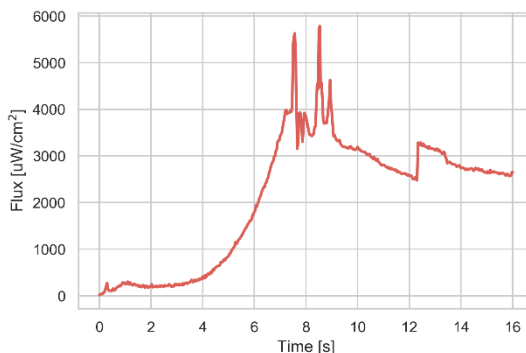
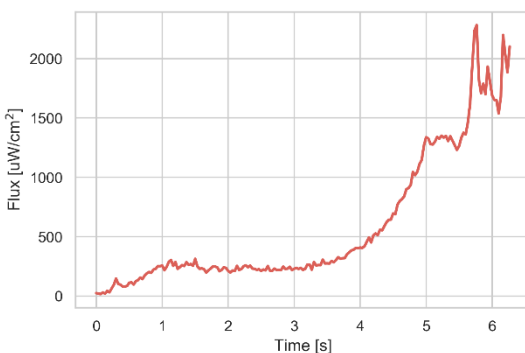


Fe の発光強度の時間変化 (加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)



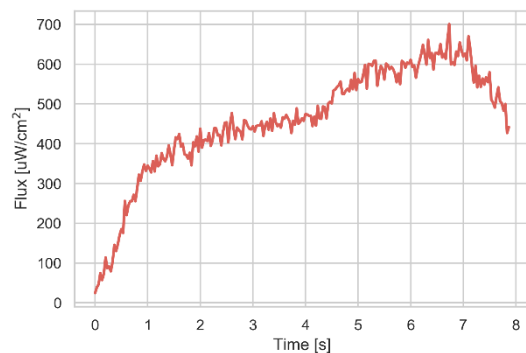
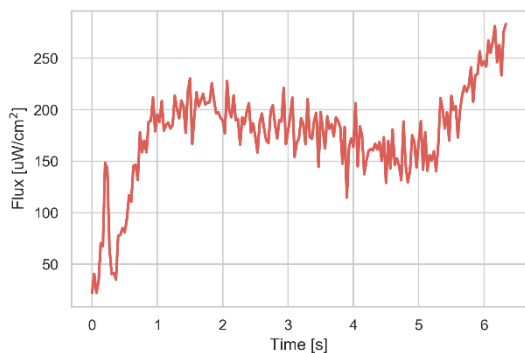
C6161 の発光強度の時間変化
(加熱率 $12.3 \text{ MW}/\text{m}^2$)

SUS304 の発光強度の時間変化
(加熱率 $9.16 \text{ MW}/\text{m}^2$)



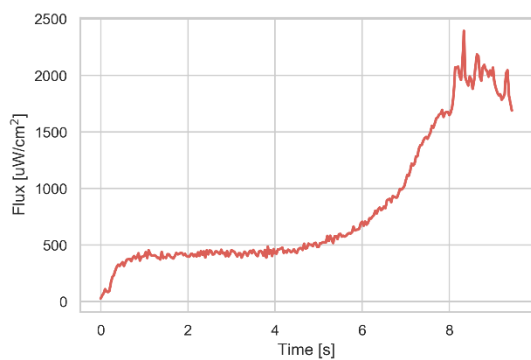
Nb の発光強度の時間変化 (加熱率 $9.16 \text{ MW}/\text{m}^2$)

Ta の発光強度の時間変化 (加熱率 $9.16 \text{ MW}/\text{m}^2$)

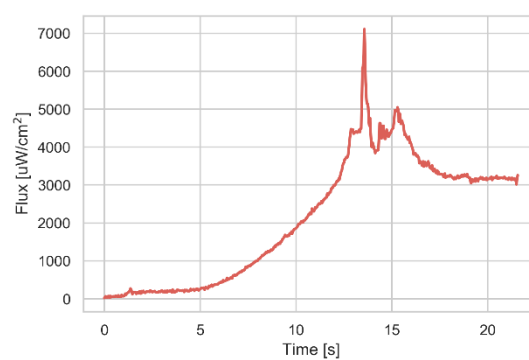


Ta の発光強度の時間変化 (加熱率 $9.16 \text{ MW}/\text{m}^2$)

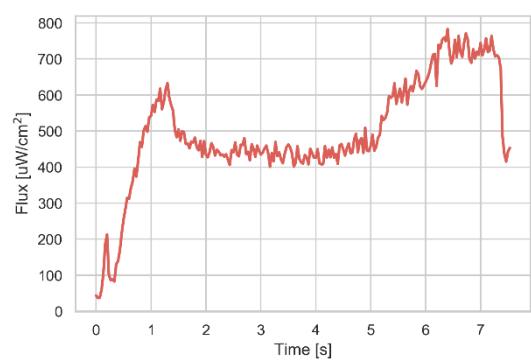
Fe の発光強度の時間変化 (加熱率 $7.03 \text{ MW}/\text{m}^2$)



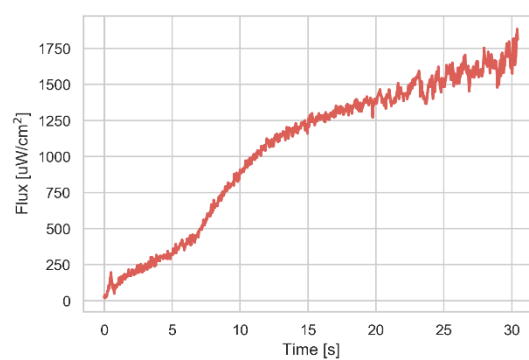
Nb の発光強度の時間変化 (加熱率 7.03MW/m^2)



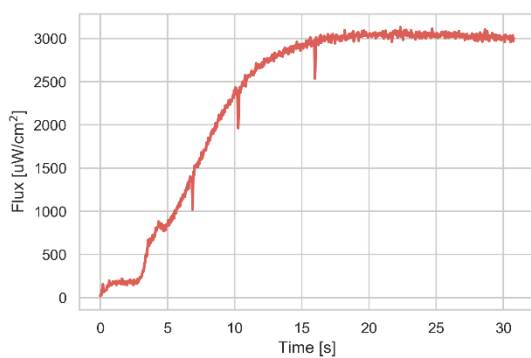
Ta の発光強度の時間変化 (加熱率 7.03MW/m^2)



C6161 の発光強度の時間変化 (加熱率 7.03MW/m^2)



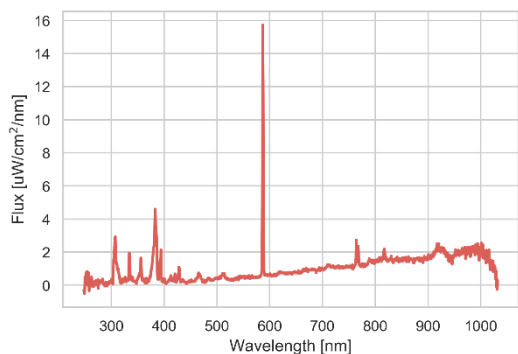
SiC の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3MW/m^2)



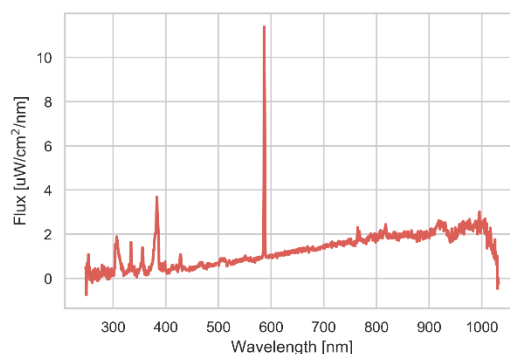
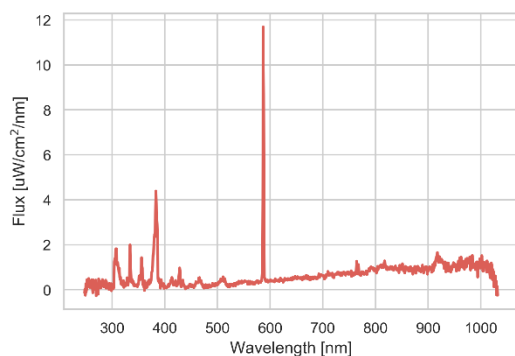
W の発光強度の時間変化 (加熱率 12.3MW/m^2)

付録 B 最大発光強度でのスペクトル

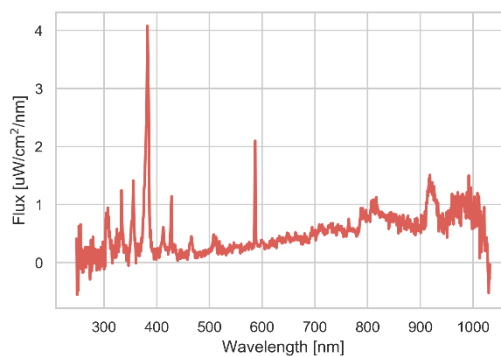
表 4 で示した供試体の最大発光強度での単位波長当たりの発光強度と波長の関係を示す．ここで発光強度は分光器から 1m の距離から観測したときの値となっている．



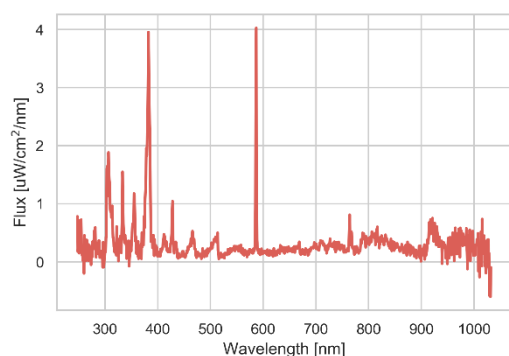
Ti64 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



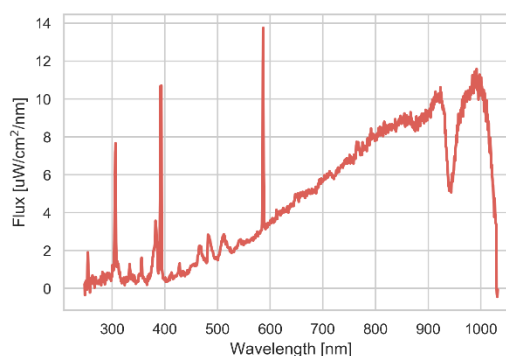
Zn の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



Al の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)

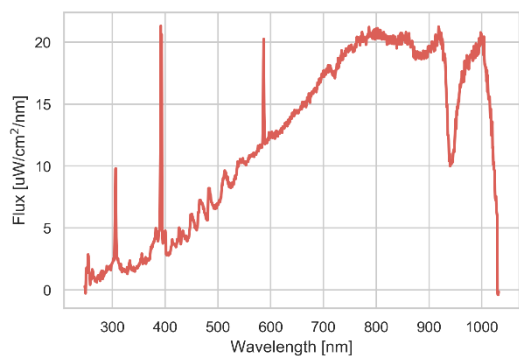


Cu の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)

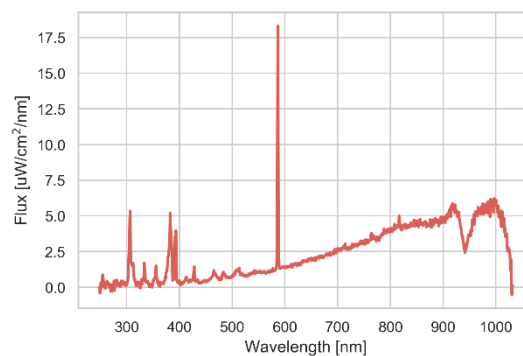


BC6 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)

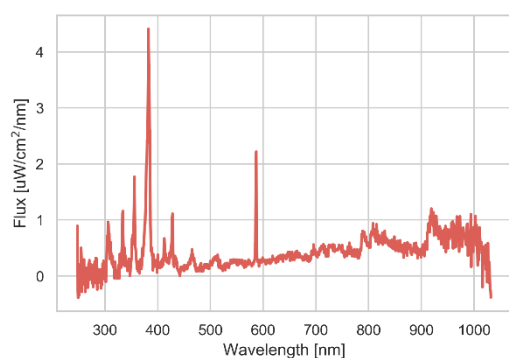
Nb の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



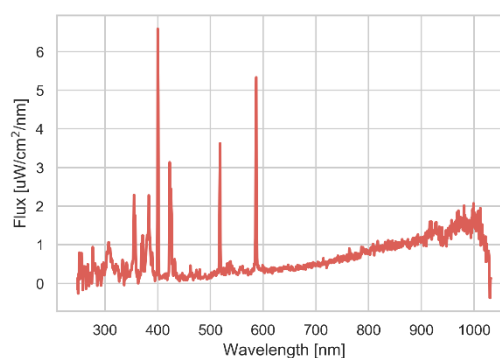
Ta の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



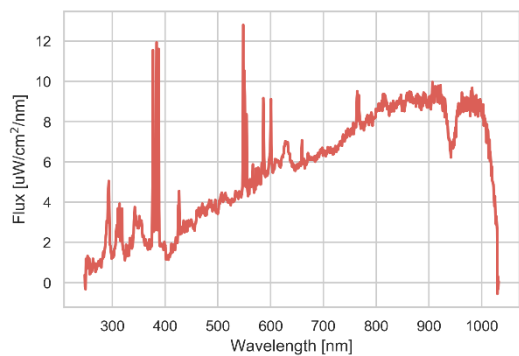
Zr の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



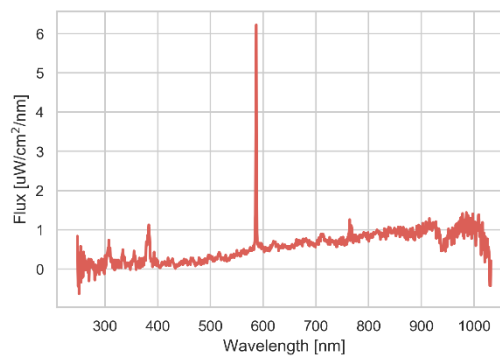
HastelloyX の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



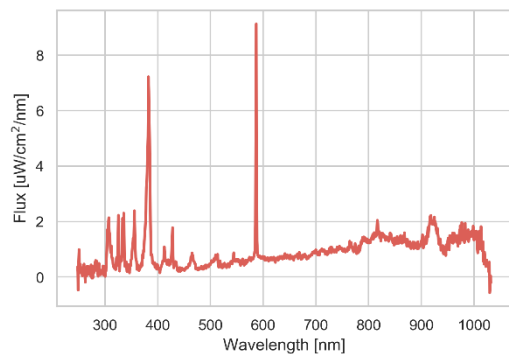
SUS304 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



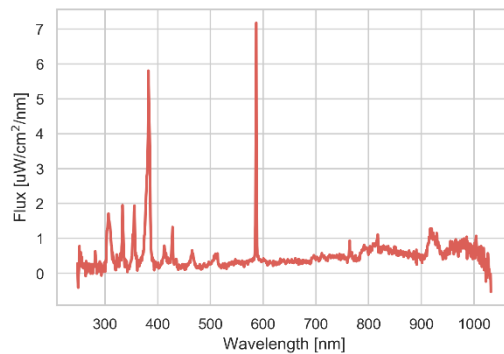
Mo の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



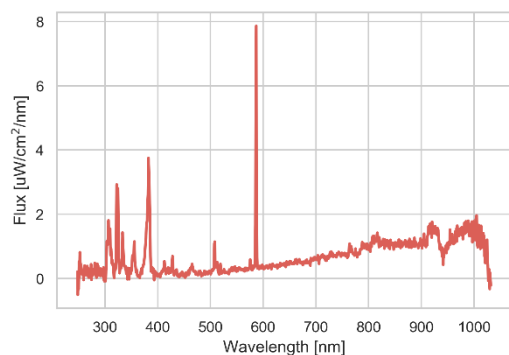
TiO₂ の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



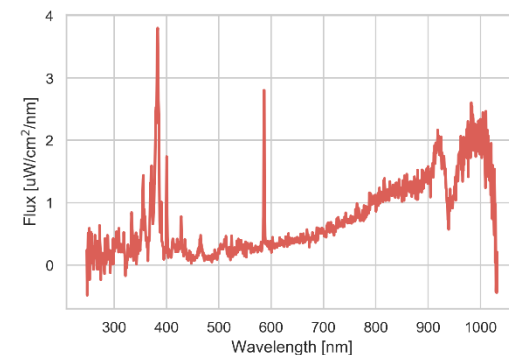
Ag の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



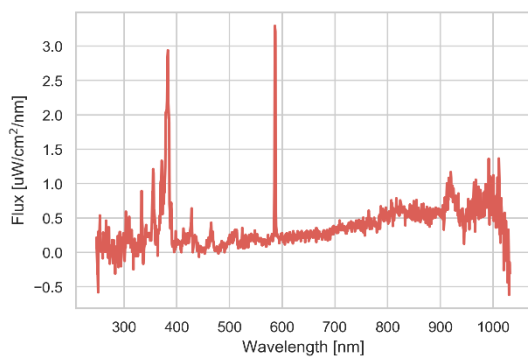
ZrO₂ の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



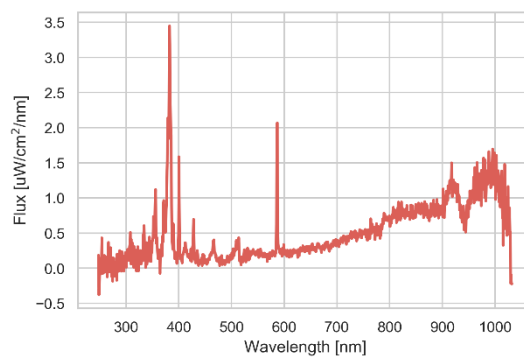
Cu の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 9.16 MW/m²)



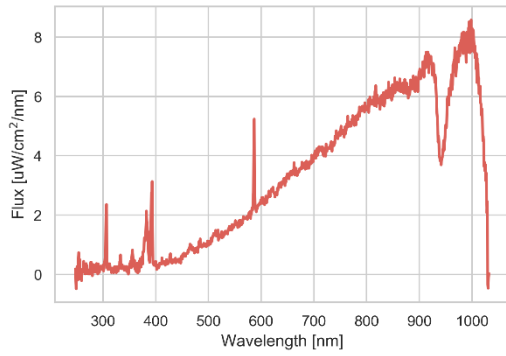
Fe の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



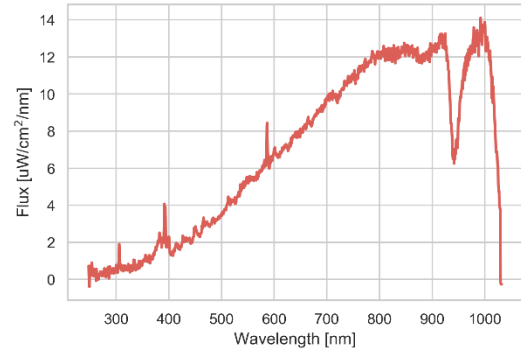
C6161 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m²)



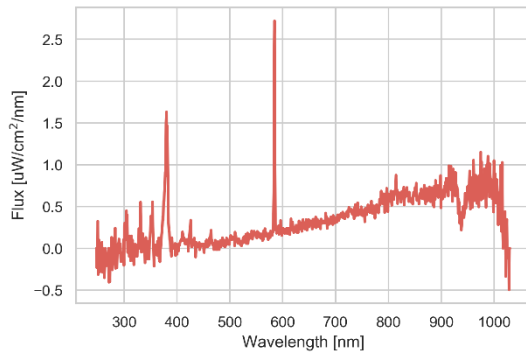
Fe の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 9.16 MW/m²)



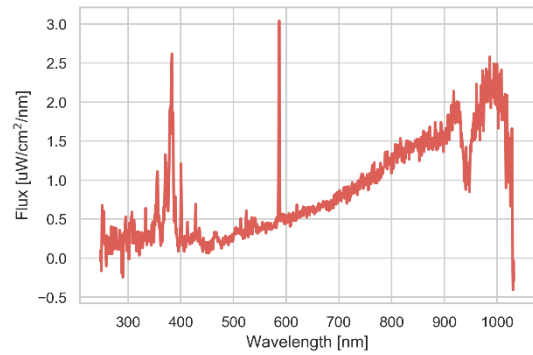
Nb の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 9.16 MW/m²)



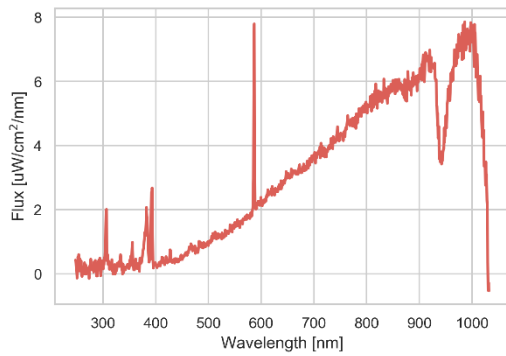
Ta の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 9.16 MW/m²)



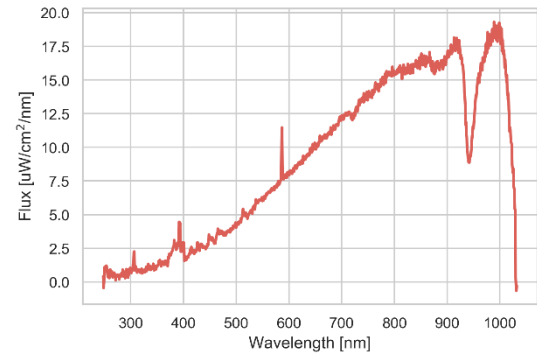
C6161 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 9.16 MW/m²)



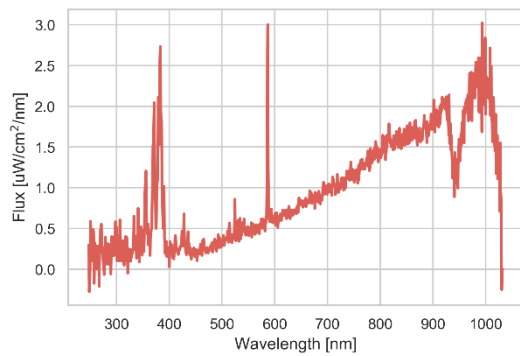
Fe の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 7.03 MW/m²)



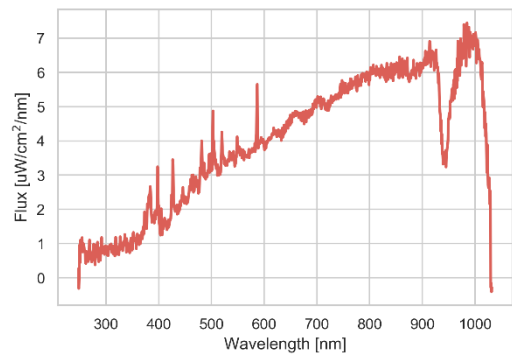
Nb の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 7.03 MW/m²)



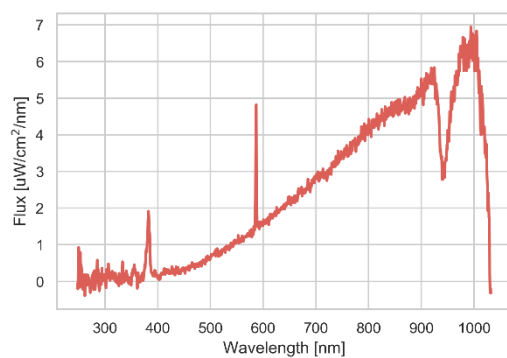
Ta の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 7.03 MW/m²)



C6161 の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 7.03 MW/m^2)



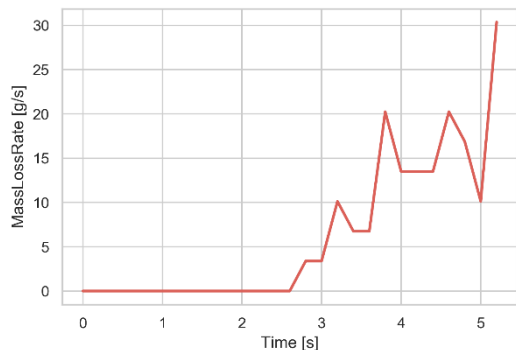
W の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m^2)



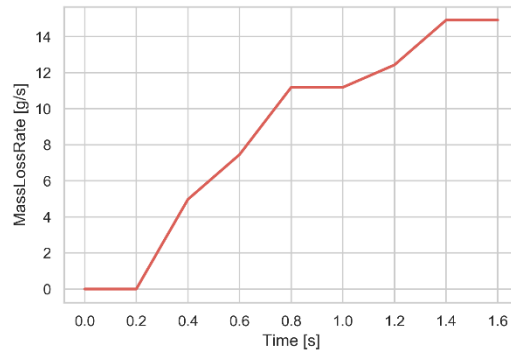
SiC の単位波長あたりの
発光強度と波長の関係
(加熱率 12.3 MW/m^2)

付録 C 質量減少率の時間変化

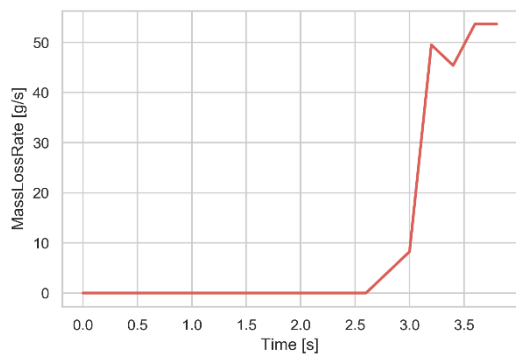
表 4 で示した供試体で低融点の純金属の質量減少率の時間変化を示す。



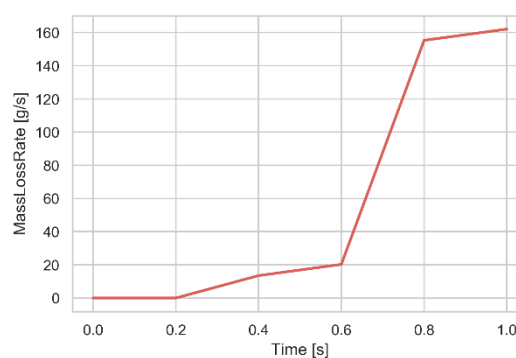
Zn の質量減少率の時間変化
(加熱率 12.3MW/m^2)



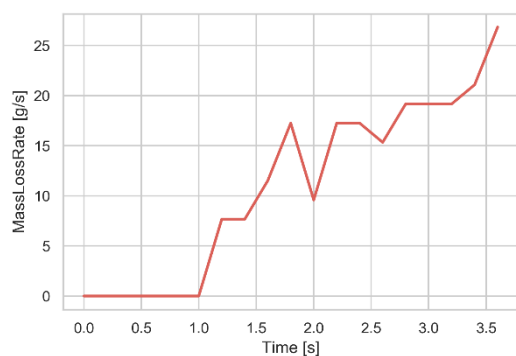
Al の質量減少率の時間変化
(加熱率 12.3MW/m^2)



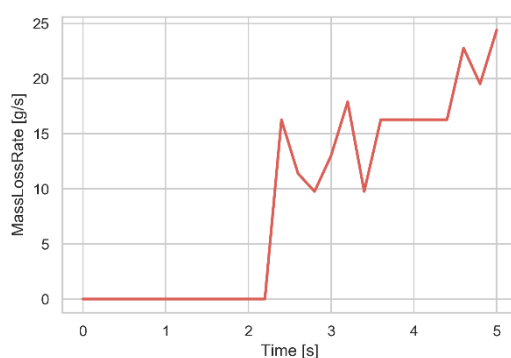
Cu の質量減少率の時間変化
(加熱率 12.3MW/m^2)



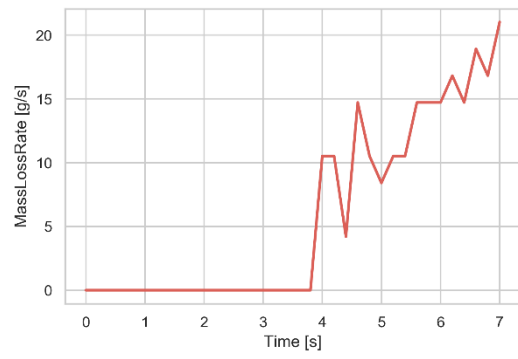
Ag の質量減少率の時間変化
(加熱率 12.3MW/m^2)



Fe の質量減少率の時間変化
(加熱率 12.3MW/m^2)



Fe の質量減少率の時間変化
(加熱率 9.16MW/m^2)



Fe の質量減少率の時間変化
(加熱率 7.03 MW/m²)