

卒業論文要旨

大気圏突入カプセル模型の前面における衝撃層プラズマ発光分光計測

Plasma Spectroscopy of Shock Layer at The Front and Back of Atmospheric Entry Model

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1240142 堀内 涼平

1. 諸言

宇宙飛行士が帰還する際や小惑星サンプルなどを地球へ持ち帰る際に使用されるカプセルは大気圏突入時、前方に形成される衝撃波によって非常に高温となる⁽¹⁾。カプセル内部を保護するために熱防護材が使用されるが、加熱率をより正確に予測することで安全性を確保しつつ防護材の使用削減を可能とし、打ち上げ時のコストの削減に繋げることができる。

衝撃層内で高いエネルギーを得た粒子は光としてエネルギーを放射するため、その輻射スペクトルを分光計測することでカプセルにかかる輻射加熱の実測及び、加熱率予測精度の向上が可能である。

2020 年、NASA は火星探査を目的とした大型のカプセルを大気圏突入させ、その際に突入方向に対するカプセル背面側の加熱率を計測する機器を搭載した。火星大気に突入したカプセル背面の加熱率は数値計算による予測を上回っており、未だ不確実性が残された段階にあることが分かった⁽²⁾。

カプセルが受ける加熱には、対流加熱と輻射加熱があるが、カプセル背面側は強い膨張波の伝播による温度低下のため対流加熱は突入面側より低くなる。予測を大きく上回る背面加熱の原因となったのは、解離種の再結合によるエンタルピー輸送、または励起種からの発光による輻射加熱であると考えられるが詳細は未解明である。

国内外での分光実験は、これまで淀み点における最大加熱率評価を中心に行われてきたが、このように将来的に更なる外惑星への探査を目的としたミッションを行う時、カプセル前面の加熱率評価だけでなく、背面の正確な加熱率評価も必要とされる可能性が高い。

そこで本研究では、初段階として地球大気圏突入時のより正確なカプセル背面の輻射加熱率予測を目的として、参照できるデータ数の多い大気圏突入カプセルである“はやぶさ”の模型を作成し実験を行った。実験結果として、カプセル前背面における分光データを取得した結果を示し、加熱率について議論する。

2. 理論と実験手法

2.1 輻射スペクトル

衝撃層内で起こる発光は輻射遷移によるものであり、各化学種の束縛-束縛、束縛-自由、自由-自由遷移に分類できる。束縛-束縛遷移は原子や分子のある量子状態から別の量子状態への遷移を指す。とり得る量子状態のエネルギー準位は離散的であるため、遷移の際に線スペクトルを生じる。束縛-自由遷移は原子や分子に束縛された電子や原子が光を吸収して電離・解離する遷移を指す。原子では光電離、二原子分子では光電離、光解離が生じ得る。自由-自由遷移による輻射は自由電子と原子や分子の電場ポテンシャルが干渉し、原子、分子

のクーロン場で曲げられる遷移を指す。自由電子が運動エネルギーを失うことで光を放出する。

2.2 アーク加熱風洞

今回実験に使用したのは宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の 1MW アーク加熱風洞である。加熱装置はセグメント型であり、コンストリクタの上流に位置する陽極チャンバーと下流側の陰極チャンバーの間に通常 1500V の電圧が印加されてアーク電流を発生させる。作動ガスである空気はコンストリクタ壁面上の穴から加熱部内部に流入し、アーク電流によりジュール加熱を受けプラズマ化され、ノズルによって膨張加速し、超音速流となる⁽³⁾。

2.3 供試体諸元

実験に用いた供試体を以下の図 1 に示す。材料は SUS316L を用い、設計の際は大気圏突入カプセル”はやぶさ”の主要なパラメータ⁽⁴⁾を参考にした。

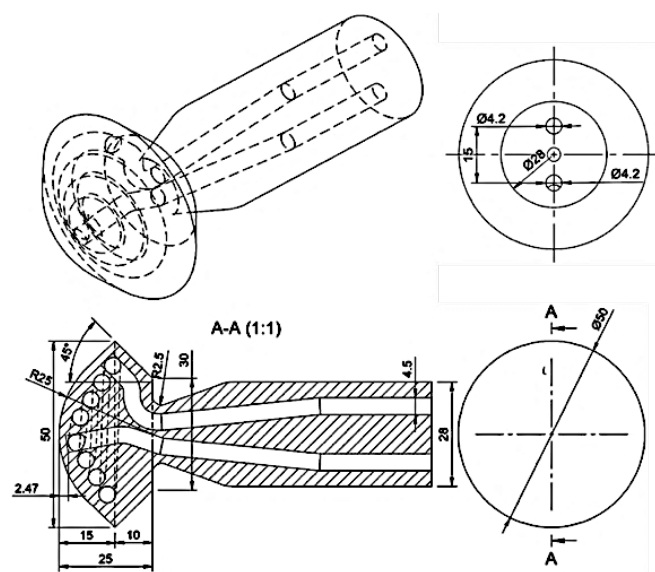


Fig. 1 Drawing of Hayabusa model test piece

2.4 分光法

2.4.1 分光器

本実験で使用した分光器は Ocean Insight 社の FLAME-T-XR1-ES である。ツェルニーターナー分光法⁽⁵⁾を用いるこの分光器は、光学分解能は 1.75nm、波長範囲 200-1025nm の広帯域における分光測定が可能である。

2.4.2 光学系

光学系は、チャンバー内の側壁に取り付けた L 字のアルミプレート上に、2 枚のレンズとミラー、ファイバーを用いて設

置した。衝撃層内の発光をレンズ 1 によって集光し、角度 45 度のミラーで反射することによって光軸を主流平行方向に転換し、その後レンズ 2 によってファイバーの端面位置で結像させることを可能としている。模式図を図 2 に示す。

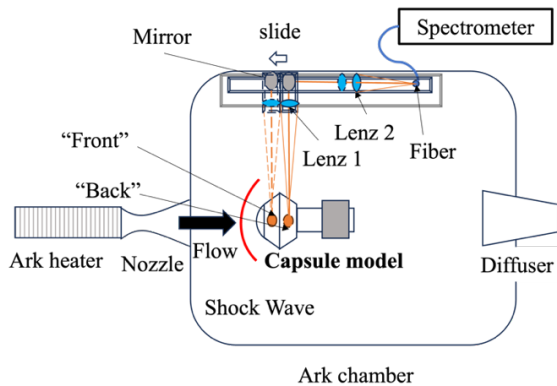


Fig. 2 Schematic diagram of optics in the chamber

3. 計測データによる気流特性診断

3.1 実験条件

アーク加熱風洞の作動条件は、作動ガスを空気、入力電流を 450A、加熱機内圧を 0.5MPa とした。下田らの論文⁽³⁾によると同条件かつ円柱形状の供試体が $\phi 50\text{mm}$ の場合、淀み点熱流束は約 1.8MW/m^2 、淀み点圧力は約 5kPa である。

供試体の前背面における測定点の模式図を図 3 に示す。ノズル出口から供試体前縁までの距離は 150mm とし、高さとともに肩部から 5mm 下、壁面からの距離は前面側が 1.5mm 、背面側が 1.3mm とした。また 2 点は供試体の対称面上にある。分光器の露光時間は前背面ともに 3 秒とした。

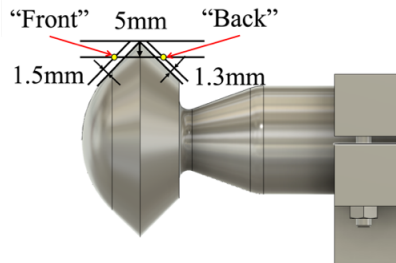


Fig. 3 Schematic diagram of measurement points

3.2 前背面における発光強度の変化と化学種の同定

実験で得たスペクトルの絶対強度を National Institute of Standards and Technology(NIST)⁽⁶⁾の原子の発光スペクトルデータに記されている中心波長と比較したところ、前背面ともに、O 原子、N 原子、 Cu^+ イオン、 Fe^+ イオン、 Fe^{2+} イオンによる輝線スペクトルが確認された。根拠となる NIST の波長と測定した実験値を表 1 に示す。また、以下の図 4 に前背面の絶対強度スペクトルを示す。化学種の隣の I は中性、II は一価の陽イオンであることを示す。

前背面のスペクトルでは、前面側がより強い発光強度を示し、化学種の同定から、試験気流の主組成である N 原子と O 原子の典型的な輝線を確認することができた。このことから、供試体前方で輝線を放った気流が背面側に回り込む際、強い膨張波の伝播によって気体が断熱冷却されることで発光強度が低下したか、あるいは再結合反応によって N_2 分子、 O_2 分子となり密度が減少したためであると理論的に予想できる。また、背面で輝線が残っていたため、再結合反応は緩やかであると考えられる。

また、 Fe III の輝線が唯一背面側の方が前面より強い発光強度を示す結果となったが、溶融した供試体の一部であると考えられる。 Cu II の発光はアーク加熱器の電極に使用されている銅の溶融が原因であると考えられる。

Table 1 Center wavelength of emission line spectrum

Substance	Wavelength[nm]	
	NIST	Exp.
Cu II	510.83335	510.870
Cu II	521.8202	521.720
Fe III	589.191	589.194
N I	746.8312	746.826
O I	777.4166	777.439
Fe II	821.90384	821.909
O I	844.625	844.617
N I	868.028	867.982

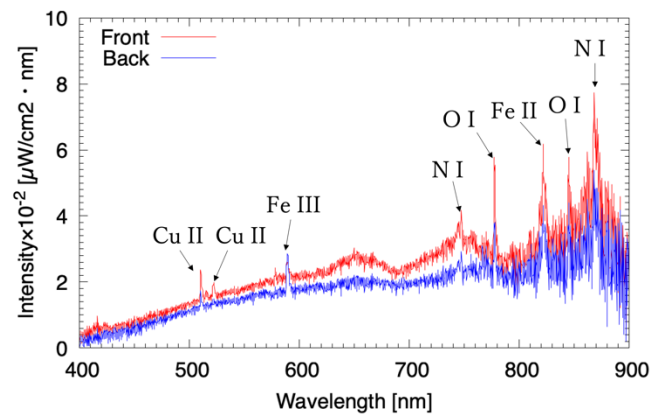


Fig. 4 Spectra and chemical species

4. 結言

大気圏突入カプセル模型の前背面における分光スペクトルデータを計測し、加熱率と反応過程について議論した。今後は 400nm 以下の波長域でも強度較正が行えるよう、紫外域の減衰が小さいミラー、レンズ等の光学素子を用いて短波長側の補正係数を取得することに加えて、供試体投入時間や露光時間を長めにとること、ノズル出口から供試体までの距離を短くすることで十分な光量を得られるようにし、輻射加熱が支配的な流れ場における、より正確な加熱率の評価や化学種の同定を目的としたスペクトル解析の実現を期待したい。

文献

- (1) 安部翔太, 高知工科大学卒業論文, 2020.
- (2) Karl T. Edquist et al., *AIAA paper* 2022-0553, 2022.
- (3) 下田孝幸, 他, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 63, No. 10, pp. 315-320, 2015.
- (4) Y. Takahashi et al., *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 32, No. 3, July–September 2018.
- (5) Ocean Insight, “What is Spectrometer” (2024/1/22) <https://www.oceaninsight.jp/WhatIsSpectrometer.html>
- (6) National Institute of Standards and Technology, “Basic Atomic Spectroscopic Data” (2024/1/30) <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>