

卒業論文要旨

大気圏突入環境模擬における はやぶさ型カプセル模型の輻射加熱率計測

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1250067 窪内 啓太

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高温になる。カプセル内部を保護するために熱防護材が使用される。実際にサンプルリターンカプセルの「はやぶさ」では機体重量の約 6 割が熱防護材として使用された⁽¹⁾。加熱率をより正確に計測することは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も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ひいては、加熱率予測精度の向上が可能である⁽²⁾。

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熱電対を搭載した。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⁽³⁾。また近年では火星大気における背面異常加熱についてだけでなく、Artemis 計画の一環として設計された Orion カプセルの地球大気圏再突入時においても背面加熱の議論が行われている⁽⁴⁾。この背面異常加熱の原因の一つとして、衝撃層内で解離した原子がカプセル背面に流れ、再結合反応によって壁面触媒反応を引き起こす影響が考えられているが詳細は未解明である。

そこで本研究では、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」の模型を用いて実験を行った。解離・電離反応が最も進行しているカプセルの淀み点および再結合反応が考えられる背面に分光計測の結果を示し、発光化学種を基に背面加熱の原因について議論する。

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にある宇宙科学研究所の 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パーと下流側の陰極チャンパーの間に通常 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⁽⁵⁾。その気流を供試体にあてることによって衝撃波が発生する。

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。また高温気流に吹き付けられることで供試体が溶けないように供試体の内部に水路を設計することで冷却を行った。

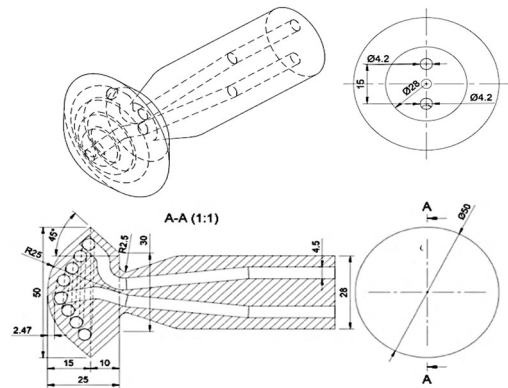


Fig. 1 Drawing of Hayabusa model test piece

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⁽⁶⁾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

光学系の模式図を図 2 に示す。ノズル出口から供試体前縁までの距離は 150mm とした。

チャンパ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作成した。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。また、測定点変更の際はレールを平行移動する。

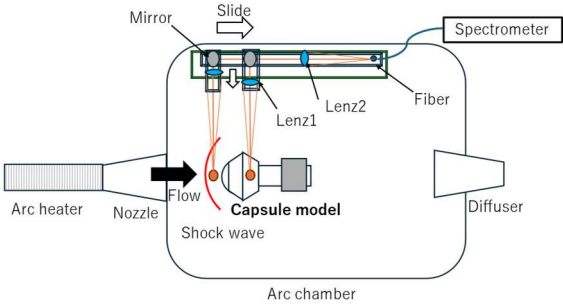


Fig.2 Schematic diagram of optics in the chamber

3. 分光データによる発光化学種診断

3.1 実験条件

アーク加熱風洞の作動は、作動ガスは窒素 80%，酸素 20% の乾燥空気、入力電圧を 450A、加熱器内圧を 0.5MPa とした。供試体の淀み点と背面における測定点の模式図を図 3 に示す。測定位置は淀み点では肩部から下 25mm、壁面から 0.8mm、背面は肩部から後ろ 5mm、壁面から 0.8mm の位置に設定した。

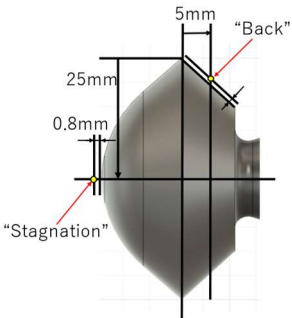


Fig. 3 Schematic diagram of measurement points

3.2 淀み点および背面における発光化学種の比較

実験で得たデータを強度校正したグラフを図 5 に示す。標準光源としてタングステンランプを用いて 400-900nm の範囲で強度へ補正した。絶対強度は淀み点のほうが高く、強い発光をしていたことがわかる。短波長側の輝線スペクトルの概形には変化が見られないが、700-900nm の範囲でそれぞれ異なる強度の輝線スペクトルが観測された。

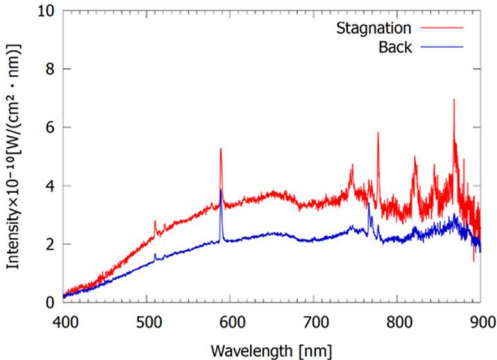


Fig. 5 Spectra of absolute intensity at stagnation and back

実験で得た輝線スペクトルを National Institute of Standards

and Technology⁽⁷⁾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化学種を同定し、表 1 に示す。特に淀み点の 746nm、777nm 位置で輝線が観測されたことに対し、背面では同じような強度の輝線は観測されなかった。この輝線スペクトルは酸素原子の輝線スペクトルであり、衝撃層内で酸素分子が解離した後、カプセル背面で酸素原子が再結合反応を起こし、酸素分子が形成されたことが示唆される。酸素原子の再結合反応では 5.16 eV のエネルギーが放出され、この再結合反応が背面で進行することにより、背面異常加熱が発生したと考えられる。

Table.1 Absolute Intensity of Emission Line Spectra and Emitting Chemical Species

Substance	Wavelength (nm)		
	NIST	Exp. (Stagnation)	Exp. (Back)
N II/Fe II/ Cu II	510.445/510.085/510.098	510.129	510.129
N II/Fe III/ Cu II	589.001/588.969/589.046	588.953	588.953
N I /Fe II	746.831/746.578	746.598	-
O II/Fe I/ N I	765.678/765.833/765.404	-	765.916
O I/Fe I/ Cu II	777.417/777.348/777.32	777.439	-
N I /Fe II	821.072/821.109	821.244	-
O I /Fe I	844.636/844.638	844.617	-
O II/N I /Fe I	868.609/868.34/868.126	868.2	-

4. 結言

大気圏突入カプセル模型の淀み点および背面における分光スペクトルデータを計測し、電離・解離反応が最も進行している淀み点と再結合反応が考えられる背面での発光化学種について議論した。輝線スペクトルの違いから背面での再結合反応が示唆された。今後は強度校正を行い、輻射による加熱率の評価も行っていく。また複数点での分光測定を同時に行い、淀み点から背面にかけた原子の流れを計測することで、背面異常加熱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計測を実現する。

謝辞

本実験は、宇宙科学研究所の惑星大気突入環境模擬装置を使用させていただきました。

文献

(1) 福田泰久, 「はやぶさ」 サンプルリターンカプセルの実験の背面加熱率推定, 航空宇宙技術, Vol.18, pp. 127-131, 2019

(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) Christopher O. Johnston, "Including Radiative Heating for the Design of the Orion Backshell for Artemis-1: A Narrative", AIAA 2025-0447

(5) Y. Takahashi et al., Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 32, No. 3, July–September 2018.

(6) Ocean Insight, "What is Spectrometer" (2024/1/22) <https://www.oceaninsight.jp/WhatIsSpectrometer.html>

(7) National Institute of Standards and Technology, "Basic Atomic Spectroscopic Data" (2024/1/30) <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>