

大気圏突入模擬環境における高解像度/広波長域分光系を用いた プローブヘッドオン分光計測

Probe-Head-on Spectroscopic Measurement Using a High-Resolution and Wide-Range Spectrometer in an Atmospheric Re-entry Simulated Environment

航空宇宙工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1275042 橋爪 見奈

1. 諸言

宇宙飛行士たちが地球に帰還する際に用いられるカプセルは、非常に高速で大気圏に突入するため、前方に衝撃波を形成する。衝撃層内の空気は対流加熱と輻射加熱により非常に高温となり、カプセルは過酷な加熱に晒される。月軌道からの帰還では地球低軌道からの帰還よりも大気圏突入速度がより速くなるため、輻射加熱の影響が大きくなる。

本研究では、一度に広波長域かつ高分解能での測定を可能にした Andor 社の Mechelle5000 分光器を用いてアーク加熱風洞における分光計測を行い、輻射加熱の実測を行うことで、より正確な加熱率予測を目指す。また、供試体に光学系を搭載するプローブヘッドオン分光を用い、供試体壁面に入射する輻射加熱を直接計測するとともに、気流軸に対して角度を持たせることにより、加熱器内部の発光を避け、衝撃層のみの発光を取得する。

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し、とり得るエネルギー準位が離散的であるため、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電磁波を吸収して電離・解離する遷移を指す。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電磁波を放出する。

2.2 アーク加熱風洞

今回実験に使用したのは宇宙科学研究所 (ISAS) のアーク加熱風洞 (惑星大気突入環境模擬装置) である。作動ガスはアーク電流によりプラズマ化され、ノズルによって膨張加速し、超音速流となる⁽¹⁾。

2.3 分光法

ME5000 に用いられているエッセル分光法は、光を縦方向と横方向の二方向に分散させることで、高分解能と広波長域を同時に実現する⁽²⁾。光は CCD 上に二次元イメージとして出力され、ソフトウェア上で次数を繋ぎ合わせることで連続スペクトルとする。

2.4 スペクトル強度校正方法

分光器や光ファイバーなどの光学機器は、波長ごとに光の吸収率が異なるため、連続的な絶対強度が既知である標準光源を用いたスペクトル校正を行う必要がある。本研究では、Optronic Laboratories 社のタングステンランプ OL220M を標準光源として校正係数を求めた。

3. アークプラズマ気流内の供試体前方衝撃層内の 分光計測

図1に供試体の断面図を示す。冷却水配管や光学系搭載により内部構造が複雑であるため、金属 3D プリンターによる造形を行った。(坂本技研様作成)

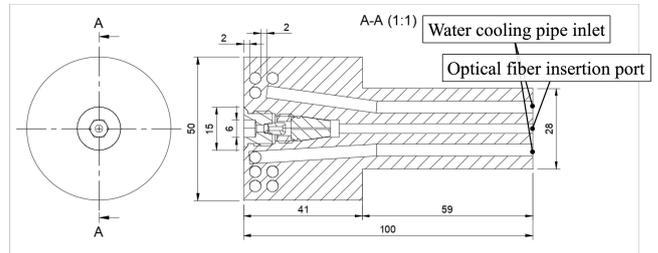


Fig. 1 Cross section of the specimen

供試体に搭載する平凸レンズ (Edmund Optics 社 70885) の角度は、先端キャップを取り替えることにより、気流軸に対して水平のもの (CY0) と、6 度見上げるもの (CY6) で取り換え可能である。6 度方向に傾けることで加熱機内部からの発光を避け、衝撃層内のみの発光を捉えることが可能となる。図2に CY0 および CY6 の光学部の断面図を示す。

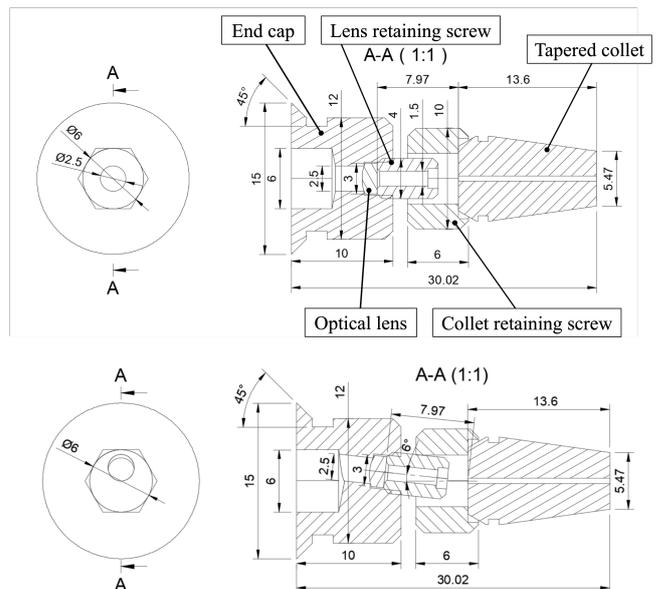


Fig. 2 Optical structure of CY0(upper) and CY6(lower)

3.1 分光系

分光計測に使用した機器は Andor 社の Mechelle5000(分光器) + iKon-M(CCD カメラ)(波長範囲：200-1025nm, 分解能：0.01-0.11nm), および Ocean Insight 社の FLAME-T-XR1-ES(波長範囲：200-975nm, 分解能：1.75nm) である。

3.2 アライメントと分光計測位置

分光測定はプローブオン (CY0 および CY6) と, 気流軸垂直方向から (Side) の3つの方法で行った。Side では, 2つのアクロマティックレンズ (Thorlabs 社 AC-508-400AB/AC-508-500AB) とミラー (Thorlabs 社 PF20-03-G01) を用いたリレーレンズ方式を採用している。図3にそれぞれの光学系配置の模式図を示す。

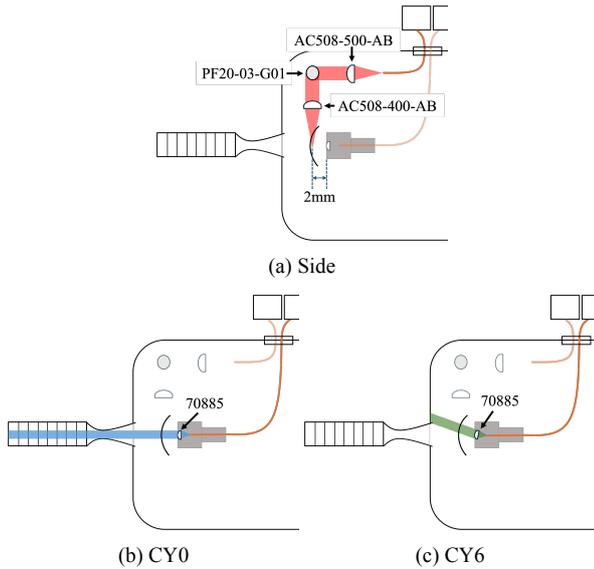


Fig. 3 Schematic diagram of the alignment and light collection rays for the Side, CY0, and CY6

3.3 実験条件

アーク風洞の気流条件は, 作動気体：Air, ノズル出口から供試体までの距離：150mm, 投入電流：450A, 加熱器内圧：0.5MPa である。供試体と同じ径 ($\phi 50\text{mm}$) の熱流束計を各ラン毎に投入したところ, 計測結果はいずれも約 $2\text{MW}/\text{m}^2$ であった

3.4 計測スペクトルによる気流特性診断

図4に, 気流投入中の供試体の写真を示す。写真の pixel 数の比より, 衝撃層の発光幅は $8\sim 9\text{mm}$ であった。

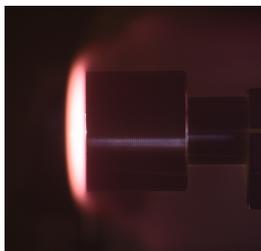


Fig. 4 Bow shock in front of the specimen

校正した取得スペクトルを図5に示す。Flame-T の CY0 は, 供試体が気流から離脱する瞬間のスペクトルである。Mechelle と Flame-T を比較すると, 分解能が低い Flame-T によるスペクトルの方が強度が高くなっている。これは, 分解能が低くなることで近隣のデータのスペクトル広がり

響を受けるためであると考えられる。よって, 高分解能な分光器を用いることで加熱率の過剰評価を防ぐことができることがわかる。

Side, CY0, CY6 の分光結果は, 強度やスペクトル形状が異なっており, 供試体壁面に入射する衝撃層のみの発光を評価するには, CY6 のプローブオン計測が非常に有用であると考えられる。

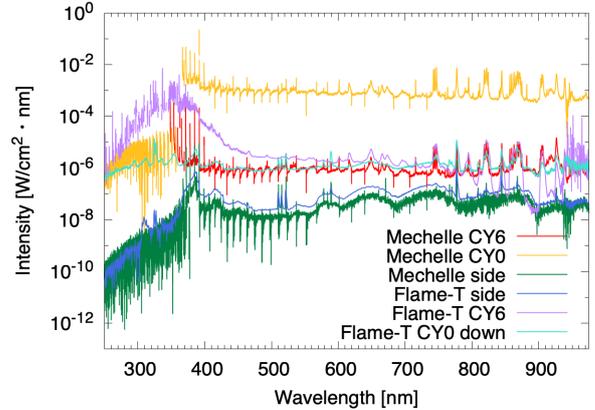


Fig. 5 Comparison of the spectra obtained from CY0, CY6, and Side using the Mechelle and Flame-T spectrometers

波長範囲 250-975nm において, 波長幅に強度をかけた矩形による波長積分を行った結果を表1に示す。波長幅が広い分, Flame-T の方が Mechelle よりも加熱率が高くなっている。

Table 1 Radiative heat flux calculation by wavelength integration

Side/CY0/CY6	Spectrometer	Radiative heat flux (W/cm^2)
CY0	Mechelle	5.85×10^{-1}
CY6	Mechelle	9.08×10^{-4}
CY6	Flame-T	4.98×10^{10}
CY0 (detaching)	Flame-T	1.20×10^{-3}
Side	Mechelle	2.92×10^{-5}
Side	Flame-T	6.92×10^{-5}

4. 結言

本研究では, 輻射加熱の実測を高精度に行うために, プローブオン分光によって一度に広波長域/高分解能で測定可能な Mechelle5000 分光器を用いてアーク風洞における発光分光計測を行い, Flame-T 分光器での測定結果とスペクトルの比較及び輻射加熱率の比較を行った。スペクトル強度および輻射加熱の波長積分値の結果より, 高分解能な Mechelle を用いて分光計測を行うことの有用性を確認することができた。供試体壁面に入射した衝撃層のみの発光を評価するためには, CY6 供試体が非常に有用であると推察できる。

謝辞

本研究で実施された風洞実験は, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が大学共同利用設備として提供する惑星大気突入環境模擬装置にて行われました。

文献

- (1) 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, 2015, pp. 315-320.
- (2) “Overview of Echelle Spectrograph Flexible Spectroscopy Tool,” Tech. rep., Oxford Instrument.