

卒業論文要旨

大気圏突入環境を模擬した高温空気プラズマの発光分光計測

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1230127 橋爪 見奈

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、非常に高速で大気圏に突入するため、その前方に強い衝撃波が発生し、カプセル前方の空気は非常に高温となる。その熱からカプセル内部を保護するために熱防護材が使用される。加熱率を正確に予測することで安全性を確保しながらも防護材の使用削減を可能とし、ペイロードが減ることでロケット打ち上げコストの削減に繋げることができる。

アーク加熱風洞は、高速・高エンタルピー気流を供試体に吹き付けることで供試体前方に衝撃波を形成し、大気圏突入環境を模擬する。衝撃層内の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し、その放射スペクトルを分光計測することで輻射加熱の実測が可能である。今まで行われてきたアーク加熱風洞における分光計測では、一度で広波長域の計測を行っている例があまり見られなかった。

そこで本研究では、エッセル分光によって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 Mechelle 5000 (ME5000) 分光器を用いて分光計測を行い、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。

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電磁波を吸収して電離・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航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) の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⁽¹⁾。

2.3 分光法

図1に本実験で使用した ME5000 の内部構造を示す。エッセル分光器は、二つのグレーティングまたは二つのプリズム、もしくはその一つずつを使用し、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。

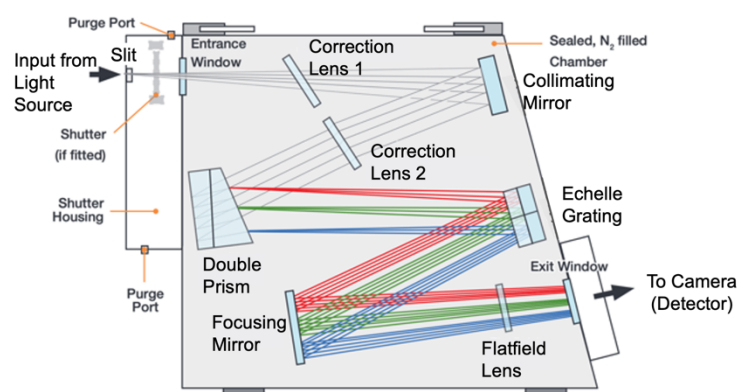


Fig.1 Internal components of the ME5000.⁽³⁾

2.4 スペクトル強度較正方法

実験で得たスペクトルは、光学系の波長特性の影響を受けるため、標準光源を用いたスペクトル較正を行う必要がある。本研究では、ハロゲンランプを使用し、390nm 以降での強度較正を行なった。補正係数 Cf は、ハロゲンランプの絶対強度を “Source”, ME5000 によるハロゲンランプの測定値を “Reference”, ハロゲンランプ測定時の背景放射を “Background” として求めると、次式となる。

$$Cf = \frac{Source}{Reference - Background} \quad (1)$$

この値と実験値の積を波長点ごとに求めることによって、実験値を絶対強度に修正することが可能となる。

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

3.1 供試体

供試体の材質は無酸素銅 (C1020) で、前面は $\phi 40\text{mm}$ 、後面は $\phi 55\text{mm}$ である。この供試体をアーク風洞のノズル出口から 150mm の位置に設置した。

3.2 分光系

分光計測に使用した機器は Andor 社の ME5000(分光器)と iKon-M(CCD カメラ), 光ファイバーは Ocean Insight 社の P400-5-UV-VIS(チャンパー外)と THORLABS 社の NA0.22Glass-Clad Silica High-OH(チャンパー内)を接続した⁽⁴⁾. ME5000 の諸元を表 1 に示す. ME5000 と iKon-M を組み合わせることによる波長分解能は 0.01-0.11nm である.

Table 1 Specification of ME5000 ⁽³⁾.

Wavelength range	200-975nm
Focal length	195nm
Slit width	50×50μm
Spectral resolution ($\lambda/\Delta\lambda$)	5000 (3 pixels FWHM)
FWHM	

3.3 実験条件

主流軸上の供試体壁面より 6mm の位置の分光計測を行い, 供試体のアーク気流中への全投入回数は 8 回, 各投入時間は 5 秒であった. アーク風洞の作動条件は, 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・山田の論文⁽¹⁾によると同条件の場合, 熱流束は約 1.8MW/m², 澱点圧力約 5kPa であるが, ガードンゲージ径と本実験の供試体前面の径は異なっている⁽¹⁾.

3.4 計測スペクトルによる気流特性診断

図 2 に, 気流吹き付け時の供試体前方に衝撃波が形成されている様子と分光計測位置(赤点)を示す.

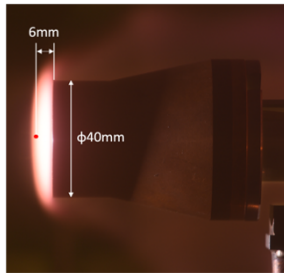


Fig.2 Bow shock in front of the specimen.

図 3 は, 露光時間 5 秒, 読み出し速度 50kHz, ゲイン 4 倍の条件で取得したスペクトルを補正係数で校正したグラフである. 補正係数を求めた際の計測条件は露光 1 秒, ゲイン 1 倍だったので, 強度は露光とゲインで割っている. 輝線スペクトルを National Institute of Standards and Technology (NIST)の原子の発光スペクトルデータ⁽⁵⁾と比較したところ, O, N, N⁺, Cu 原子による輝線スペクトルを特定できた. 表 2 に, 輝線スペクトルの波長と, それぞれの化学種, 特定の根拠となった NIST の波長, そして実験値の強度を示した. O 原子の輝線強度は $5 \times 10^{-2} \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}$ 程度であったのに対し N 原子は $5 \times 10^{-3} \mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}$ 程度と, O 原子の強度の約十分の一の強度であった. 発光強度は密度に比例するため窒素の強度が強くなると予想していたが, 相反する結果となった.

Cu の発光は電極に使用されている銅が溶け出しているものと考えられ, 実際の突入問題では現れない事象であるため, Cu スペクトルを除いたものを図 2 に示した. 強度が 0 以下の値を切り捨て, 台形公式を利用した数値積分によって加熱率を計算した. 波長点 λ における強度を $Intensity(\lambda)$, 波長点間の距離を $\Delta\lambda$ とすると微小面積は

$$\frac{Intensity(\lambda) + Intensity(\lambda + \Delta\lambda)}{2} \times \Delta\lambda, \quad (2)$$

によって求められ, 400-975nm における約 14,000 点の値を合計すると, 加熱率は $0.8384 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ と求めることができた.

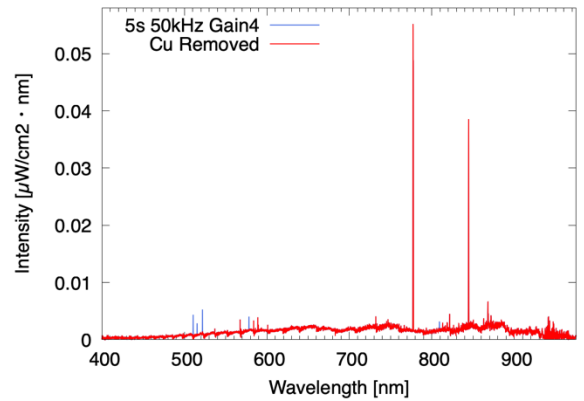


Fig.3 Before and after removing Cu spectra (Correction applied).

Table 2 Wavelength and intensity of identified line spectra.

Substance	Wavelength (nm)		Intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}$)
	NIST	Exp.	
Cu I	510.554	510.595	4.35721×10^{-3}
Cu I	515.324	515.357	2.85977×10^{-3}
Cu I	521.820	521.880	5.27940×10^{-3}
N II	567.602	567.508	3.53123×10^{-3}
Cu I	578.213	578.289	4.03557×10^{-3}
O I	777.194	777.272	5.51810×10^{-2}
O I	777.417/ 777.539	777.502	4.88393×10^{-2}
Cu I	809.263	809.279	3.18207×10^{-3}
N I	818.487/ 818.802	818.652	3.05325×10^{-3}
N I	821.634	821.667	4.52170×10^{-3}
O I	844.625/ 844.636/ 844.676	844.715	3.85578×10^{-2}
N I	862.924	863.012	3.74365×10^{-3}
N I	868.028/ 868.340/ 868.615	868.143	6.58965×10^{-3}
N I	871.883	871.894	4.23394×10^{-3}

4 結言

ME5000 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, 輝線スペクトルの特定と 400-975nm における輻射加熱率の算出を行った. 今後はチャンパー内の鏡やレンズによる減衰も考慮して校正を行った上で, ノイズが少ないスペクトル取得方法を調査し, 加熱率計算の高精度化を目指したい.

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) Andor, *Overview of Echelle Spectrograph Flexible Spectroscopy Tool*, Oxford Instrument.
- (3) Andor, *Mechelle User Guide*(2020), Oxford Instrument.
- (4) 楠汐里, 他, “電離促進剤を用いた MHD 衝撃層強制拡大法の開発とアーク加熱風洞での多点発光分光による検証,” 2022 年度衝撃波シンポジウム, 3A1-3, (2023).
- (5) National Institute of Standards and Technology, Basic Atomic Spectroscopic Data, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/findinglist.html> (参照日 2023 年 1 月 28 日).