

卒業論文要旨

プローブヘッドオン分光計測を用いた円筒型模型に入射する輻射の直接計測

Direct Measurement of Incident Radiation on a Cylindrical Model Using Probe-Head-on Spectroscopic Measurement

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 尾々野 敦

1. 諸言

サンプルリターンミッションや有人宇宙探査などの宇宙ミッションでは大気圏突入を伴う際、飛行体前方に衝撃波が発生することによって過酷な空力加熱環境が形成される。高温衝撃層に包まれることによる対流加熱と、衝撃層内気体の発光による輻射加熱である。飛行体内部のペイロードを加熱から保護するために適切な熱防御設計が必要となるが、これには数値解析や高エンタルピー風洞を用いた加熱率の予測と評価が重要なものとなる。

アーク加熱風洞は、加熱器内部のアーク放電により高エンタルピーとなった作動ガスを、真空引きされた試験室にノズルを介して膨張加速し、供試体に吹き付けることによって、大気圏突入時の空力加熱環境を模擬することのできる高エンタルピー風洞の一つである。供試体前方で発光する衝撃層を分光計測することによって、輻射加熱率の計測が可能となる。

これまで、アーク加熱風洞により模擬した空力加熱環境下において、分光計測により輻射加熱率の評価を行う試みが国内外でなされてきたが、衝撃層から供試体に直接入射する輻射を計測している研究例は稀であり、特に波長 200nm 付近の紫外領域における分光計測に成功しているものはまだない。

本研究では、広波長域 (200nm–975nm) を高分解能 (0.01nm–0.11nm) で測定可能である、Andor 社製の Mechelle5000 (ME5000) 分光器を用いることで、衝撃層の輻射を直接計測し、加熱率を評価することを目的とする。

2. 理論輻射スペクトルと実験手法

2.1 理論輻射スペクトル

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⁽¹⁾。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、に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

本研究では、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所のアーク加熱風洞⁽²⁾を使用した。加熱器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と下流側の陰極チャンバの間に通常 1500V の電圧が印加され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多数の小さな穴から加熱器内部に流入し、アーク電流によってジュール加熱を受けプラズマ化され、加熱器の内圧と真空引きされた試験室の圧力差、およびノズルによって膨張加速し、超音速流となる。供試体に入射する加熱率はノズルとの距離によって変更することが可能である。

2.3 分光法

本研究で使用した ME5000 の内部構造を図 1 に示す。ME5000 はエッセル型分光器であり、グレーティングやプリズムなどの 2 つの分散素子を用いてスリットより入射した光を縦横の 2 方向に分散させることで、高分解能と高波長帯域を同時に実現することが可能である。光は CCD カメラ (本研究では Andor 社製 iKon-M を使用した) 上で 2 次元イメージとして出力され、ソフトウェア (Andor Solis) 上で次数をつなぎ合わせることで分光スペクトルを出力する。

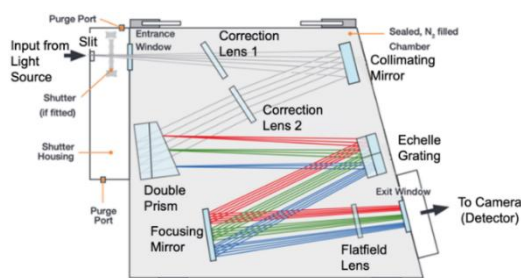


Fig. 1 Internal components of the ME5000⁽³⁾.

2.4 スペクトル強度校正方法

計測により取得したスペクトルは、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の強度校正を行う必要がある。本研究では、実験時に使用した光学系を再現し、Optronic Laboratories 社製のタングステンランプ (OL220M) を分光計測することで校正係数 $C_f(\lambda)$ を取得したのち、実験値に乘じることで強度校正を行った。校正係数 $C_f(\lambda)$ は、タングステンランプの既知である絶対強度値を $S_{nom}(\lambda)$ 、計測により取得した値を $S_{sig}(\lambda)$ 、暗電流を $D(\lambda)$ とすると、次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$C_f(\lambda) = \frac{S_{nom}(\lambda)}{S_{sig}(\lambda) - D(\lambda)} \quad (1)$$

3 衝撃層輻射の直接分光計測と加熱率評価

3.1 供試体

図2に供試体の全体像を示す。材質は無酸素銅 (C1020) であり、加熱を受ける面の径はφ50mmとなっている。また、アーク加熱風洞において加熱器内部ではアーク電流による強い発光が起きていることから、衝撃層の輻射のみを計測するために、気流軸より24°傾けた光ファイバを内部に搭載している。供試体は溶融を防ぐために水冷機構を有しており、内部に気流が侵入することを防ぐために、開口部はサファイアウィンドウを用いて密閉した。

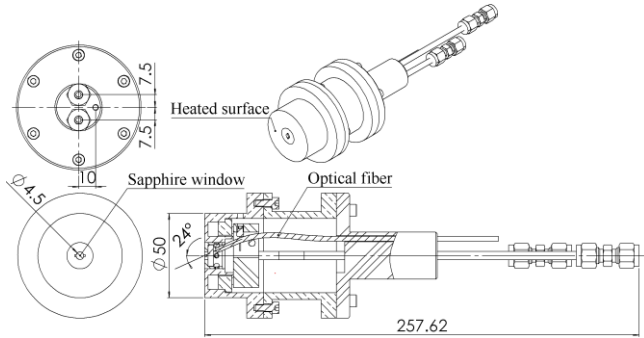


Fig. 2 Overall image of a model.

3.2 実験条件

実験条件を表1にしめす。作動ガスは空気であり、入力電流は450 A、加熱器内圧は0.5 MPaとした。熱流束とよどみ点圧力は、φ50 mmのガードゲージおよび圧力プローブによって測定された値である⁽⁵⁾。また、真空チャンバ内における供試体の配置は図3のようになっており、作動ガスは加熱器内部で高エンタルピーのプラズマとなりノズルによって膨張加速され供試体前方でプラズマの層を形成したあとディフューザから排出される。供試体はノズル出口から80mmの位置に設置し、光ファイバはフィードスルーを介して真空チャンバ外の分光器へと接続した。気流投入は2秒間を2回行った。

Tabel 1 Facility settings

Operating gas	Air
Arc current	450 A
Heater Pressure	0.5 MPa
Chamber Pressure	24 Pa
Heat flux	6 MW/m ²
Stagnation pressure	20 kPa
Nozzle distance	80 mm

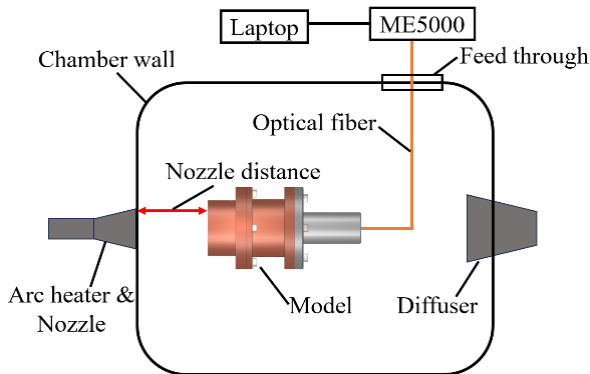


Fig. 3 Spectroscopic setup in a vacuum chamber.

3.3 計測結果

図4に350-975 nmの波長範囲における強度校正後のスペクトルを示す。熱平衡状態に近いならば短波長領域の輻射強度が高くなるが860 nm付近で極大をとる全域の連続スペクトルが加算された形状となった。ウィーンの変位則より、860 nmで極大をとる黒体の温度は式(2)で与えられる。また気流投入後、供試体に搭載したサファイアウィンドウが破損しており、供試体の溶融は確認されなかったことから、連続スペクトルは供試体内部に流入した高温の空気によるものであると考えられる。

$$T = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{8.6 \times 10^{-7}} \approx 3370 \text{ [K]} \quad (2)$$

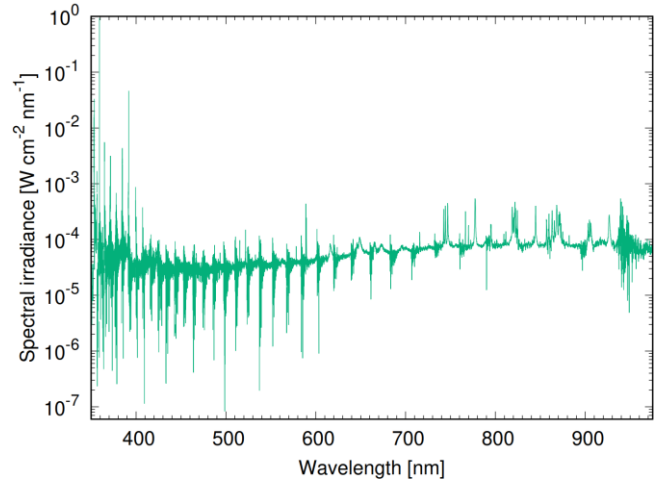


Fig. 4 Calibrated spectra (350-975 nm).

破損したサファイアウィンドウは中心部から放射状にひび割れており、溶融はしなかった。局所加熱された中心部と無酸素銅接した外縁部の応力差や4点支持による荷重の集中が破損原因としてあげられる。

4 結言

光ファイバを気流軸から24°傾けて搭載し、水冷構造と熱伝導性の高い無酸素銅 (C1020) を使用した供試体を作製することによって、衝撃層からの輻射を直接計測した。

今後は、開口を小さくしウィンドウを面支持により固定することでウィンドウが破損しない供試体の作製を行う。

文献

- (1) 安部翔太, “極超音速流れの新たな非平衡モデル構築へ向けた発光スペクトル同定,” 高知工科大学卒業論文, 2020.
- (2) T. Yamada and Y. Inatani, “Arc Heating Facility and Test Technique for Planetary Entry Missions”, Departmental Bulletin Paper, ISAS, No. 17 (2003), pp. 148-152.
- (3) Andor, Mechelle User Guide (2020), Oxford Instrument.
- (4) 橋爪見奈, “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”, 高知工科大学大学院修士学位論文, 2024.
- (5) 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.