

## 熱防御システムの高信頼性評価に向けた 誘導加熱風洞の高精度気流検定

藤田和央, 水野雅仁, 石田清道, 藤井啓介 (宇宙航空研究開発機構), 長井遵正 (株式会社エーイーエス)

Accurate Flow Characterization of ICP Wind Tunnel for  
High-Integrity TPS Performance Evaluation

Kazuhisa FUJITA, Masahito MIZUNO, Kiyomichi ISHIDA, Keisuke FUJII (JAXA),  
and Jyunsei NAGAI (AES)

*Keywords : Spectrum fitting, Emission spectroscopy, High-enthalpy Flows, Flow diagnostics*

### Abstract

In order to offer the detailed information about test flows in a 110-kW inductively-coupled-plasma heater at Aerospace Research Center of Japan Aerospace Exploration Agency, radiation spectroscopy associated with the line-by-line spectrum analysis was conducted. Radial distributions of the temperature and the species concentration were obtained in the test section by the numerical spectrum fitting procedure in a wide range of the input electric power with air and nitrogen as the working gas. Contributions of emission from impurities were incorporated into numerical spectra, from which radial distribution of impurities was determined as well. In an attempt to eliminate such impurities from the nitrogen test flow, ambient gas in the test chamber was replaced with the nitrogen gas before ignition of the heater. As a result, considerable reduction of NO and O was accomplished.

### 1 はじめに

大気再突入機や惑星探査のための大気突入プローブなどの極超音速飛行を行なう機体の熱防御システム (thermal protection system; TPS) の開発においては、高エンタルピ風洞を用いた TPS 材料 (およびシステム) の試験が必須である。TPS は反応性の高エンタルピ気流と接触することで、気流からの熱伝導による加熱に加え、解離した原子の表面再結合 (触媒性再結合) による加熱や、反応性活性種と壁面そのものの化学反応による侵蝕・変性を受ける。従って TPS の性能を正確に評価するためには、本質的に試験気流の詳細な物理情報が必要であり、これにもとづいて気流との相互作用を考慮した総合的な解析を行うことで、試験結果の正しい評価が初めて可能となる。また、このような解析で正確な予測が可能となれば、その外挿として飛行環境での TPS 性能の予測が高信頼度で可能となる。

しかしながら現状では、アーク風洞や衝撃風洞など TPS の基本性能を評価する地上設備において、試験気流の情報が正確に得られているとは言い難く、特に分子の解離度にかかわる情報はほとんど得られていない。従って現状の評価技術では、気流エンタルピもしくは冷温壁加熱率に対する TPS の耐熱性、耐酸化性、および断熱性といったおおよその評価に留まっており、飛行環境での性能予測に不確実性が高い。このことは、実機設計における冗長設計につながり、TPS 重量低減のための障害の一要因となっている。

このような背景を受けて JAXA 研究開発本部では、より正確かつ高信頼度の TPS 性能評価試験を実現することを目的として、気流-TPS 連成解析技術の高度

Table 1: Tested flow conditions.

#	Gas species	flow rate (g/s)	Power (kW)	Pressure (kPa)
1	Simulated air	2.0	70.0	10
2	Simulated air	2.0	90.0	10
3	Simulated air	2.0	110.0	10
4	Nitrogen	2.0	70.0	10
5	Nitrogen	2.0	90.0	10
6	Nitrogen	2.0	110.0	10

化を図るとともに [1], 高エンタルピ風洞の総合的な気流検定プログラムを推進している。歴史的には、これまで国内外でもアーク風洞の気流検定の試みは盛んに行われてきたが、技術的な困難さから、未だにアーク風洞の気流は十分に解明されていない。そこで本研究では、まず技術的に比較的容易な誘導加熱プラズマ (inductively-coupled plasma; ICP) 風洞について総合的な気流検定を行い、TPS 試験を行うユーザーへ詳細な気流情報を提供する。

### 2 試験方法

本研究では JAXA 研究開発本部の 110-kW 級 ICP 風洞 [2] の試験部の気流検定を行い、ユーザーに提供している代表的な試験気流について気流情報を提供する。試験条件を Table 1 に示す。ここで Pressure とは試験部での雰囲気気圧である。本 ICP 風洞はノズルを有しておらず、試験部全域で低亜音速流であることに注意されたい。ICP ヒーターは内径 75 mm の放電室を有し、3 ターンのコイルに 1.78 MHz の高周波電流を印加する

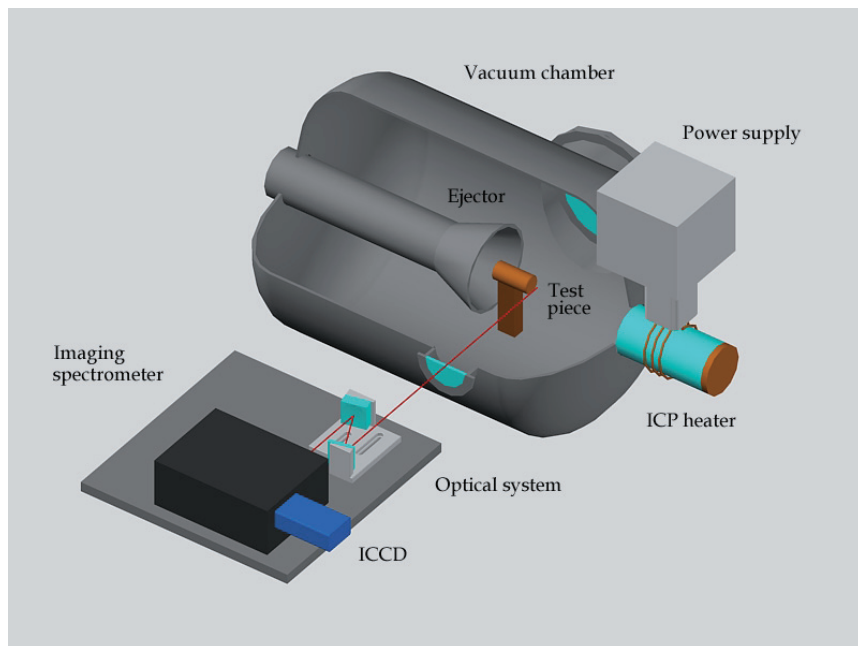


Fig. 1 : Schematic view of experimental setup.

ことで放電室に誘導加熱プラズマを発生する。ICP ヒーターは風洞の試験チャンバーに水平にマウントされており、試験部にコア直径 100 mm 程度の弱電離プラズマ気流を発生する。その概念図を Fig. 1 に示す。本研究では、試験部試験面（カロリメータによる冷温壁加熱率評価面）より 5 mm 上流のコア流れからの発光を分光測定し、スペクトルフィット法により温度と化学種の組成を決定する。

分光システムは収差フリーの反射光学系により構成され、コア流の半径方向イメージを分光器スリットに投影し、これをイメージ分光器 (Acton SpectraPro 500i) によりイメージ分光することで、半径方向のスペクトルを同時に取得することが可能となっている。検出器には ANDOR DH520 ICCD を用いた。SN 比を向上させるために、ICCD の空間方向 7 pixel を積算したマルチバンドイメージを取得している。これにより試験気流位置での 1.4 mm の空間解像度を実現している。光学システムを含めた分光システムは、あらかじめ紫外/可視の標準光源を用いて正確に校正されている。分光は 230 nm から 900 nm までの波長範囲で行った。一度に全ての波長範囲のスペクトルを得ることはできないので、波長範囲を 8 分割し、これを接続することで全波長スペクトルを取得した。スペクトルは再現性を確認した上で各波長範囲で 5 回ずつ取得して平均をとり、各波長点でアーベル逆変換を行うことで、半径方向の放射係数の分布に変換した。当該試験環境では試験気体は光学的に「薄い」ため、吸収を考慮する必要はない。また、試験気流は非常に安定なため、スペクトルの再現性も良好であった。なお、試験方法の詳細は文献 [3] を参照されたい。

得られた各半径位置での全波長スペクトルから温度を決定するために、本研究では SPRADIAN2<sup>[4]</sup> を用い

たスペクトルフィッティング法を用いた。試験気流として simulated air および N<sub>2</sub> を用いているが、後述するように試験気流には不純物が含まれており、強い発光が観測される。そこで化学種および電子遷移として、原子の線スペクトルとして H, C, N, O, C<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, O<sup>+</sup> を考慮し、分子のバンドスペクトルとしては C<sub>2</sub> ( $A \leftrightarrow X$ ,  $C \leftrightarrow A$ ,  $D \leftrightarrow X$ ,  $E \leftrightarrow A$ ,  $b \leftrightarrow a$ ,  $d \leftrightarrow a$ ,  $e \leftrightarrow a$ ), N<sub>2</sub> ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow A$ ,  $C \leftrightarrow B$ ,  $a \leftrightarrow X$ ,  $b \leftrightarrow X$ ,  $b' \leftrightarrow X$ ), O<sub>2</sub> ( $B \leftrightarrow X$ ), N<sub>2</sub><sup>+</sup> ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow X$ ,  $C \leftrightarrow X$ ), CH ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow X$ ), NH ( $A \leftrightarrow X$ ,  $c \leftrightarrow a$ ,  $c \leftrightarrow b$ ), OH ( $A \leftrightarrow X$ ), CN ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow X$ ), CO ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow A$ ,  $B \leftrightarrow X$ ,  $C \leftrightarrow X$ ,  $b \leftrightarrow a$ ), および NO ( $A \leftrightarrow X$ ,  $B \leftrightarrow X$ ,  $C \leftrightarrow X$ ,  $D \leftrightarrow X$ ) を考慮し、原子の自由-束縛遷移については  $C + h\nu \leftrightarrow C^+ + e$ ,  $N + h\nu \leftrightarrow N^+ + e$ ,  $O + h\nu \leftrightarrow O^+ + e$ , および  $O^- + h\nu \leftrightarrow O + e$  を考慮し、電子の自由-自由遷移については電子加速粒子として N<sub>2</sub>, N, O, およびイオンを考慮した。

### 3 試験結果

90 kW 運転時に得られた代表的なスペクトルを Figs. 2a および b に、試験気流をそれぞれ N<sub>2</sub> および simulated air とした場合について示す。Simulated air を用いた場合、もっとも強いスペクトルは紫外領域に広がる NO のバンドスペクトルであり、近赤外の N<sub>2</sub> (1+) もはっきりとした発光を示している。しかし一方で、CN, OH, NH など本来試験気流には含まれないはずの不純物からの強い発光が見受けられ、特に OH については外周部でもっとも強い発光を生じている。一方、N<sub>2</sub> 気流については、N<sub>2</sub> や N<sub>2</sub><sup>+</sup> の発光が支配的であるが、不純物として雰囲気ガスに含まれる酸素や水に由来する O 原子線の発光や、NO および OH バンドスペクトルの発光も見られる。

不純物中の H や C は壁面に吸着した水分子や炭素

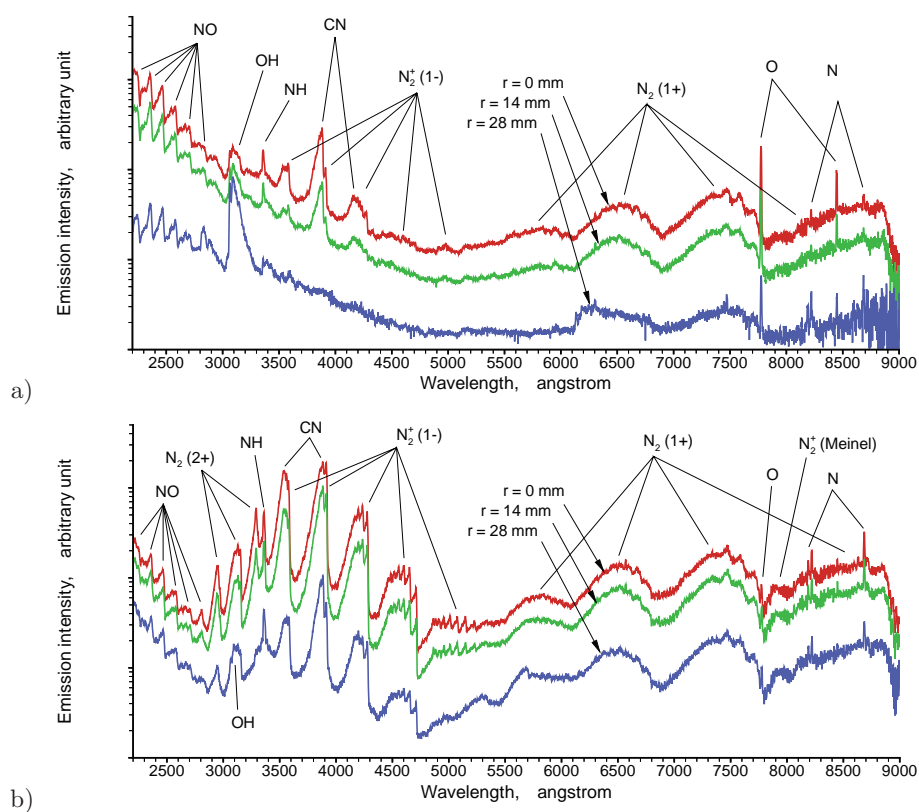


Fig. 2 : Overall spectra of emission intensity obtained in a) simulated air and b) nitrogen test flows.

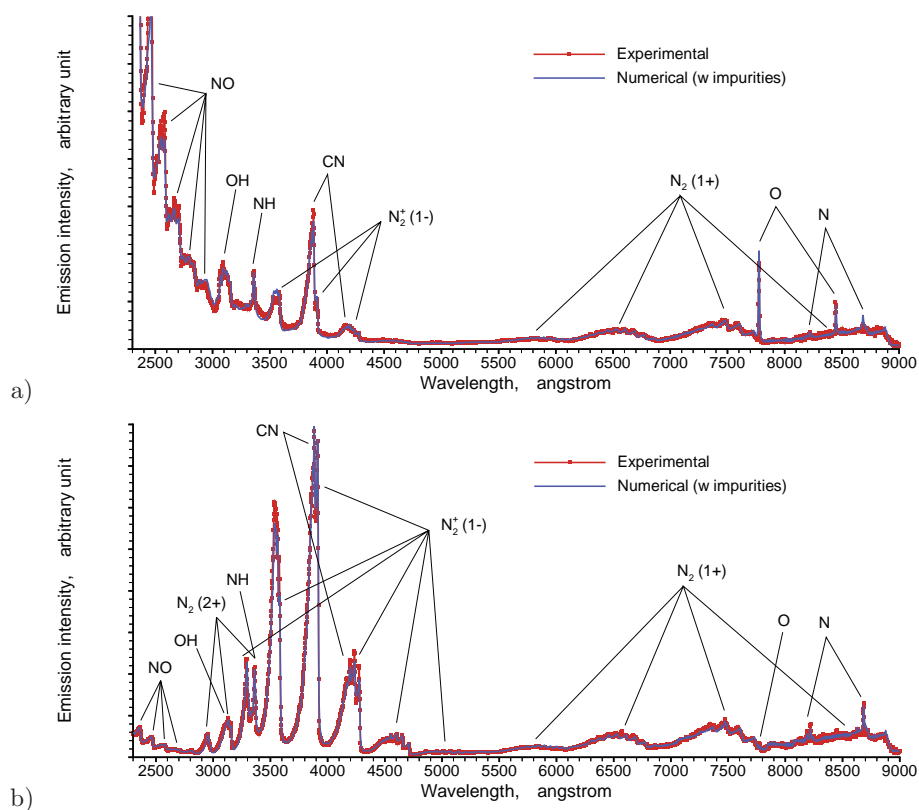


Fig. 3 : Comparison between numerical and calculated emission intensity at the center of a) simulated air and b) nitrogen test flow at 90 kW. Estimated temperature is a)  $5,600 \pm 100$  K and b)  $5,800 \pm 100$  K, respectively.

化合物のコンタミネーションに由来し、 $N_2$  中での O は上記水分子や、雰囲気ガスに残留している酸素分子に由来するものと考えられる。 $N_2$  気流を用いた試験の場合、試験直前にテストチャンバーの排気と  $N_2$  ガスでの置換が不十分なためである。この解決方法は後述するとして、ここで重要な点は、これら不純物の寄与が大きいため、不純物を考慮した密度、温度推定を行い、これに基づいたスペクトル予測、そしてスペクトルフィッティングを行わないと、逆問題として気流の温度、密度の予測ができないということである。逆に、これらの推定を完全に行うことで、主たる化学種の密度のみならず不純物の密度まで予測できるといえる。

#### 4 気流評価結果

得られたスペクトルに対しスペクトルフィッティング法により、密度と化学種の組成を以下に決定した。ICP 風洞が全域低亜音速であることと、雰囲気圧が 10 kPa と比較的高いことから、試験部で気流は局所平衡であることが推定されている。そこでまず気流の温度を仮定し、これに基づいた平衡組成を計算し、主要化学種からのスペクトルを計算する。もっとも観測スペクトルを再現できるものが物理的に正しい予測と考えられるため、気流の温度、主要化学種の組成がほぼ予測できる。しかし観測されるスペクトルは不純物からの発光を含むため、候補となるそれぞれのスペクトルについて、不純物の組成を仮定して不純物のスペクトルの寄与を付加し、観測されるスペクトルがもっとも良く再現されるように不純物の組成を変えて、最適のスペクトルを構成する。最終的に、もっとも観測スペクトルを再現できるスペクトルが得られると、温度、主要化学種の組成とともに、不純物の組成も決定される。

得られた数値スペクトルの一例を Fig. 3 に示す。Simulated air および  $N_2$  試験気流それぞれの場合について、不純物のスペクトルも含めて非常に良好に観測スペクトルが再現されていることが見て取れる。このようなスペクトルフィッティングを Table 1 の気流条件について行い、半径方向の各点について温度（および密度）分布を決定した。結果を Fig. 4 に示す。図でエンタルピーは、各温度と雰囲気圧 10 kPa で推定される気流エンタルピーである。試験気流は低亜音速であり運動エネルギーは無視できることから、推定されるエンタルピーは気流の全エンタルピーに等しいと考えてよい。また Fig 5 に  $N_2$  気流中の不純物を含めた組成を示す。不純物は雰囲気ガスの置換により低減されることが示されているが[4]、ここではその結果は割愛した。以上のように、現在 ICP 風洞では、試験気流の状態がほぼ完全に把握され、試験結果のより詳細な評価が可能となっている。

#### 参考文献

- [1] Suzuki, T., Sakai, T., and Yamada, T., *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.21, No.2, 2007, pp.257-266.
- [2] Ito, T., Kurotaki, T., Sumi, T., Fujita, K., Mizuno, M. and Ishida, K., AIAA Paper 2005-0189.

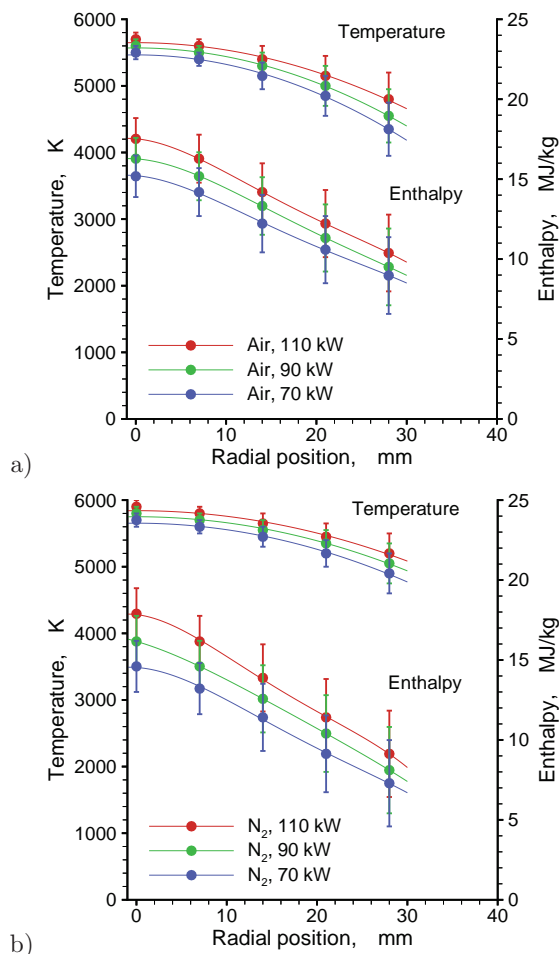


Fig. 4 : Radial distribution of temperature and gas enthalpy in a) simulated air and b) nitrogen test flows.

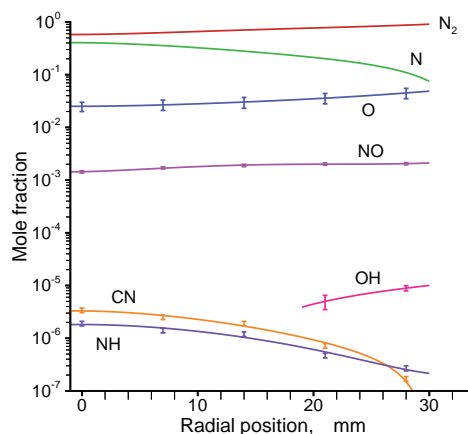


Fig. 5 : Radial distribution of chemical components including impurities in nitrogen test flow at 90 kW (without replacement of ambient gas by nitrogen).

- [3] Fujita, K., Suzuki, T., Mizuno, M., and Fujii, K., AIAA Paper 2008-1254.
- [4] Fujita, K., Mizuno, M., Ishida, K., and Ito, T., AIAA Paper 2005-0173.