

アーク加熱風洞を用いた炭素系材料周りの プラズマ気流の分光診断

坪内啓晟（東海大学大学院工学研究科），古頭龍太（東海大学工学部），山田剛治（東海大学）
堀内翔馬，岡村駿太（鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科），坂本憲一，川添博光（鳥取大学）

Spectroscopic Diagnostics of Plasma Flows around Carbon-Based Materials in an Arc-Heated Wind Tunnel

Keisei TSUBOUCHI (Graduate School of Engineering, Tokai University), Ryuta KOTO (Mechanical Engineering, Tokai University), Gouji YAMADA (Tokai University),
Shouma HORIUCHI, Shunta OKAMURA (Graduate School of Sustainability Science, Tottori University),
Kennichi SAKAMOTO, Hiromitsu KAWAZOE (Tottori University)

Abstract

Arc heated wind tunnels are often used to simulate aerodynamic heating of re-entry flights. However, the plasma flow generated by an arc-heated wind tunnel is hard to characterize, as it is in thermal and chemical non-equilibrium states. Therefore, it is necessary to improve the knowledge of these flows in order to elucidate the airflow characteristics more accurately. The purpose of this research is to investigate characteristics of arc heated Air plasma flow with graphite ablation in the JAXA/ISAS arc-heated wind tunnel. To do this, spatial distribution and time variation of radiations in front of the specimen surface are measured using a multipoint spectroscopic measurement system.

1. はじめに

近年，JAXA の「はやぶさ2」や NASA の「OSIRIS-REx」のような小惑星探査機によるサンプルリターンプロジェクトが実施されている。このようなミッションにおいて回収カプセルが大気圏に再突入する際には10km/s を超える非常に速い速度となり，機体前方には強い衝撃波が発生する。このとき，カプセル前方の衝撃層内の温度は10000K を超える厳しい熱空力環境にさらされ，衝撃層内の気体分子は解離や電離といった現象が生じ，プラズマ流が生成される。このような過酷な空力加熱を耐熱可能な材料は存在しないため，今日まで PICA（フェノール含浸カーボンアブレタ）に代表されるようなアブレーション法による熱防御システム（TPS）が用いられてきた。TPS の開発には様々な高エンタルピー風洞を用いた耐熱試験が行われ，中でも再突入飛行時と同等の加熱率を長時間維持することが可能なアーク加熱風洞は，耐熱試験に適しているため多く使用されてきた。しかし，アーク加熱風洞によって生成されたプラズマ流は密度が低く緩和が進まないため，自由流自体が熱的・化学的非平衡性を持っている。更に放電による電極の損耗による気流汚染などもあり，複雑かつ実飛行と異なる現象を含む流れ場となっている。したがってアーク加熱プラズマ流の特性や現象の解明を行うことは，アーク加熱風洞による TPS 等の耐熱試験や大気突入模擬実験の精度向上のために必要である。

本実験では樹脂を含まないグラファイトおよび C/C コンポジットと Air プラズマ気流の反応過程に着目し，分光計測によって気流特性や現象の空間的，時間的変化を調査した。

2. 実験条件

2.1 実験装置

本研究で使用した ISAS/JAXA が所有する 1MW アーク加熱風洞（惑星大気突入環境模擬装置）を Fig.1 に示す。本風洞ははやぶさカプセルの熱防御システム開発にも用いられた。本実験における風洞の運転条件を Table 1. に示す。アーク電流 450 A，加熱器内圧 0.5 MPa とし，試験気体には空気を用いた。



Fig.1 1MW arc-heated wind tunnel (ISAS/JAXA)

Table 1. Experimental condition

Arc current [A]	450
Internal pressure [MPa]	0.5
Working gas	Air
Exhaust pressure [Torr]	0.95

2.2 供試体

Figure1 に本実験で使用した供試体を示す。熱防御システムに用いられる材料の反応を観測するため，グラファイトおよび C/C コンポジット製の供試体を用いる。本来の熱防御システムには炭化アブレタが用いられるが，本実験では樹脂の昇華による熱分解ガスの影響を除いた単純なモデルでの現象解明を目的とするため，樹脂を含まない炭素のみで構成されたグラファイトと，

構造が炭化アブレータに近い C/C コンポジットを用いた。またアーク気流に対して反応を生じにくい銅 (C1020) の供試体を比較のため用いた。供試体は全て直径 50 mm の円柱型である。

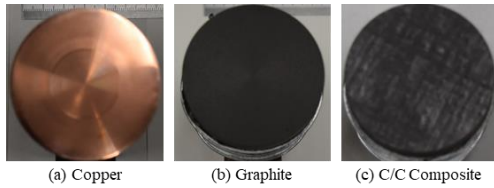


Fig.2 Specimens

2.3 計測装置

Figures 3,4 に実験装置及び計測システムの概略図を示す。供試体をノズル出口から 75mm の位置に取り付け、供試体前方に発生した衝撃波付近のプラズマ流の発光を真横から分光計測を行う。観測窓部に光学ベンチを取り付けることで光学レンズ及びファイバを固定する。分光システムは分光器 (MK-300, BUNKOUKEIKI), ICCD カメラ (DH334T-18F-E, ANDOR), バンドルファイバ, 光学レンズ (f=300mm) で構成される。ファイバは 2 mm 間隔で 7 本が束になっている。Figure2 に計測点の詳細を示す。よどみ点流線から光学レンズ, 光学レンズからファイバ先端までの距離が 2 : 1 になるように配置した。これにより計測は 4mm 間隔で 7 点分の流線方向の空間分布スペクトルを取得することができる。中央の計測点は供試体前方 12mm の位置になるよう配置した。

計測条件を Table 2. に示す。計測は格子定数 150 の回折格子を用いて中心波長 420nm と 700nm, 格子定数 1200 の回折格子を用いて中心波長 380nm で計測を行った。銅の供試体は表面の融解がおきないように, 気流への投入時間は 2 秒間とした。グラファイトおよび C/C コンポジットの供試体は 20 秒間投入し, その間 0.5 秒毎に分光データを取り, アブレーションの進行による気流の変化を計測した。

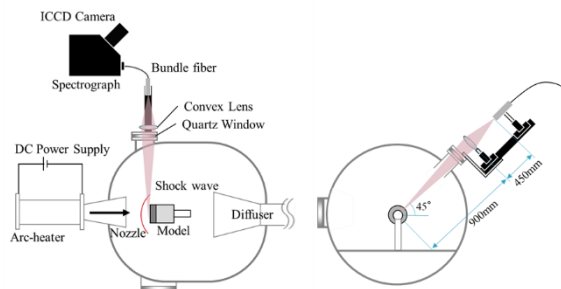


Fig.3 Measurement system

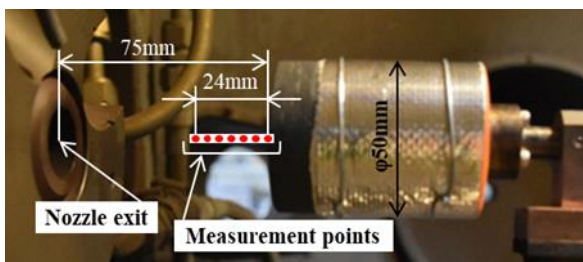


Fig.4 Detail of measurement point

Table 2. Measurement condition

Center wavelength [nm]	380	700	380
Grating [line/mm]	150	150	1200
Accumulate cycle time [s]	0.50	0.50	0.50

3. 解析手法

発光スペクトルの形状がプラズマ中の各化学種の内部エネルギー状態により変化する特性を利用し, 実験で得たスペクトルから温度評価を行う。本研究ではスペクトルフィッティング法を用いる⁽¹⁾。スペクトルフィッティング法は温度をパラメータとして計算した複数の理論スペクトルの中から最小二乗法を用いて最も実験スペクトルに合う一つを特定することで回転温度と振動温度の推定を行う手法である。理論スペクトルは輻射解析コード SPRADIAN2 に化学種, 波長範囲, 温度 (並進温度, 回転温度, 振動温度, 電子励起温度, 電子温度), 数密度を与えることで導出する。温度については, 並進温度と回転温度を等しいとして T_r , 振動温度, 電子励起温度及び電子温度を等しいとして T_v とする 2 温度モデルの仮定で行う。本研究での解析条件を Table 3. に示す。

Table 3. Analysis condition

Wavelength[nm]	364-398	608-775
Chemical species	CN, N ₂ ⁺	N ₂ , N ₂ ⁺
Temperature range[K]	2000-16000	2000-16000
Temperature interval[K]	500	500
Fitting point	1021	557

4. 結果および考察

4.1 計測結果

Figure5 にアーク気流中に投入した各供試体の様子を示す。供試体正面の離脱衝撃波の内側に主に橙の強い発光が見られる。また炭素を含む供試体は側面にも青紫色の発光が確認された。この画像から供試体直径を基準に求めた計測点の位置を Fig.6 に示す。この図から衝撃波面は供試体前方 8-12mm 付近であると考えられる。

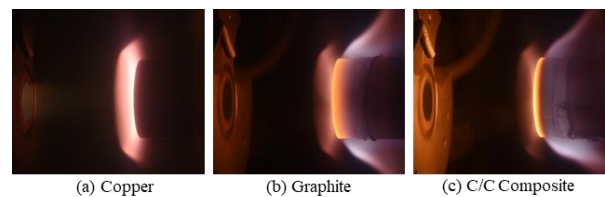


Fig.5 Photographs of each specimen at experiment.

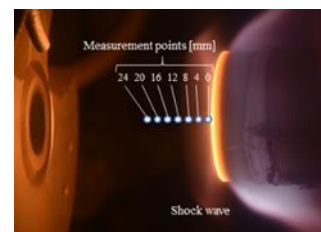


Fig.6 View of the measurement points

グラファイト供試体投入 19 秒後に取得した 270nm-850nm の範囲のスペクトル Fig7,8 に示す。供試体表面から 0mm 点において, CN および C₂ と思われる発光のバンドスペクトルが計測された。500nm から長波長側は供試体表面の黒体放射により, 化学種毎の発光スペクトルは埋もれてしまっている。4mm 点においては

0mm 点より弱い CN および C2 のスペクトルが確認された他、長波長域の N2 のバンドスペクトルや窒素や酸素原子の輝線スペクトルも確認された。また電極の成分である銅による試験気流の汚染も確認できる。

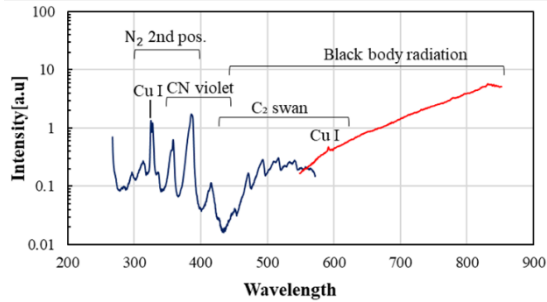


Fig.7 Measured spectrum at 0mm point

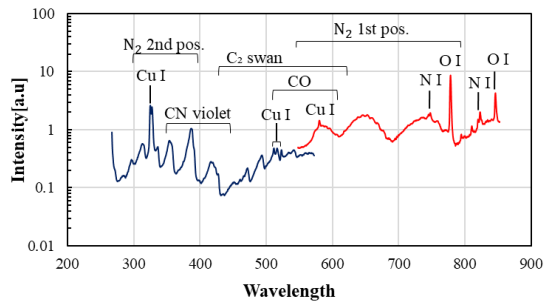


Fig.8 Measured spectrum at 4mm point

他のスペクトルとの混ざりが少なく、詳細な解析が見込める CN Violet バンドの 360-400nm の分解能を上げ、計測を行った。Figures9 に銅供試体投入後 1.5 秒のスペクトルを示し、Figures10, 11 にグラファイト及び C/C コンポジット供試体投入 19 秒後に取得したスペクトルの空間分布を示す。先行研究において試験気流に N2 を用いた実験を行った際は、CN のスペクトルは主に供試体表面から 0mm の計測点でのみ観測され、4mm, 8mm 点ではほぼ検出されなかった。対して試験気体に空気をを用いた本実験では、CN のスペクトルは 4mm, 8mm 点でも検出されている。また供試体に炭素原子を含まない銅の供試体でも同様に衝撃波層内において CN のスペクトルが観測される。以上のことから 4mm, 8mm 点の CN は空気に含まれる N2 や CO2 の炭素化合物が衝撃波面で分解、結合することで生成されたものと考えられる。

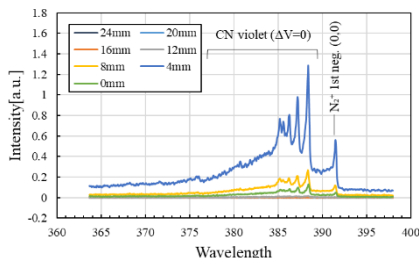


Fig.9 Copper

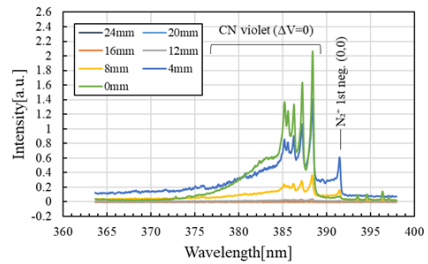


Fig.10 GP

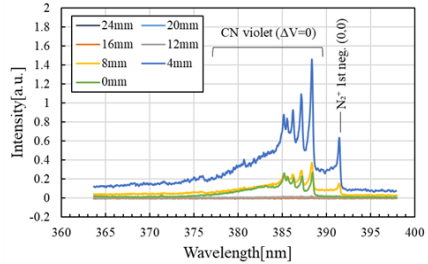


Fig.11 C/C

Figure12, 13 にグラファイト、C/C コンポジットを用いた計測におけるバンドヘッド CN Violet (0,0) の強度の時間変化を示す。先行研究である試験気体に N2 を用いた実験では、グラファイト表面近傍において、供試体に含まれる炭素と気流の反応によって生成する CN の発光強度に、山なりの増減が見られた。Figure12 より、供試体表面から 0mm の計測点においては、計測点のずれにより供試体本体が影となって発光を計測できていないことが考えられる。また Fig.7 のように供試体本体の黒体放射が顕著にみられることから、計測点が供試体に被っていることが考えられる。グラファイトでの計測において、15 秒以降は 0mm 点でも CN の発光が検出され始めるが、これはアブレーションによる供試体表面のリセッションによるものと考えられる。また Figure13 では、スペクトルの増減が見られたが、先行研究の結果とは異なる結果となった。4mm, 8mm 点の発光に関しては時間的にほぼ一定であるが、Fig.12 の 11-13 秒や Fig.13 の 10-12 秒のように小さな変動がある。

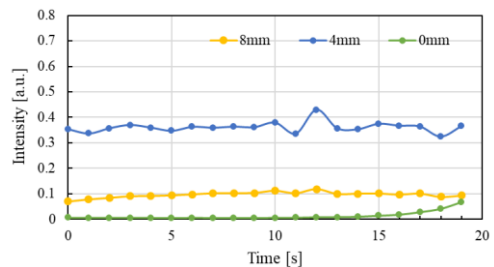


Fig.12 Time variations of CN in graphite specimen

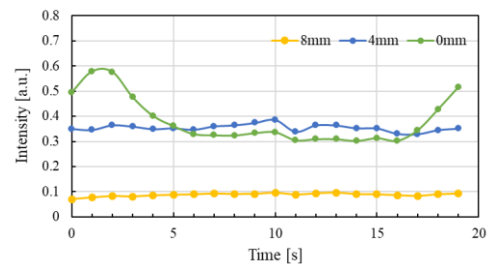


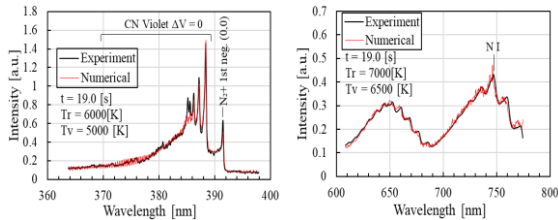
Fig.13 Time variations of CN in C/C composite specimen

4.2 スペクトルフィッティング

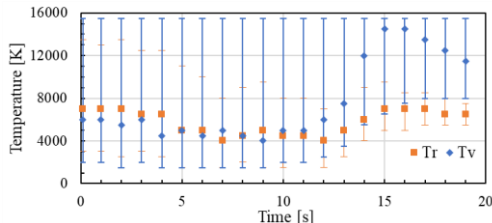
解析は CN Violet $\Delta v = 0$ を含む 364-398nm の範囲と N2 1st positive を含む 608-775nm の範囲で行った⁽³⁾.

フィッティング結果の一例として Fig.14 に供試体投入 19 秒後の 4mm 点のスペクトルの解析結果を示す. どちらの範囲においても計測スペクトルに近い理論スペクトルを導いているが, 370-395nm の解析では, 準位の高い(3.3), (4.4)においてずれがみられる. この現象は先行研究でも見られ, 実験における衝撃層内の CN 粒子は, 理論スペクトルで仮定されるボルツマン分布に比べ, 高い準位の粒子が多く存在している事を示している. 低準位と高準位の粒子数の差は多きため, 低い準位のバンドが一致していれば, 温度評価への影響は小さいと考えられる.

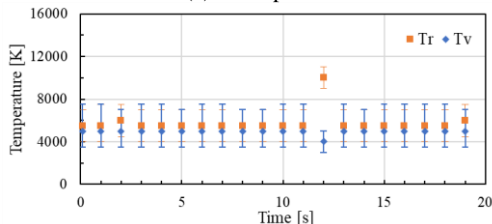
同様の解析をグラファイトおよび C/C コンポジットの計測で CN および N2 のスペクトルが明確に見られた結果に対し行い, 内部エネルギーの変化を空間的かつ時間的に求めた.



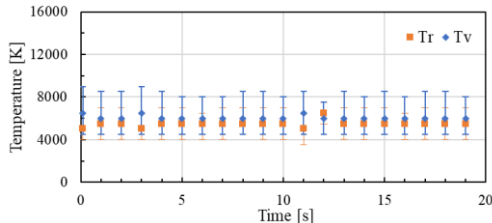
(a) CN and N2+ (b) N2 and NI
Fig.14 Fitting results of experiments with graphite specimens



(a) 0mm point

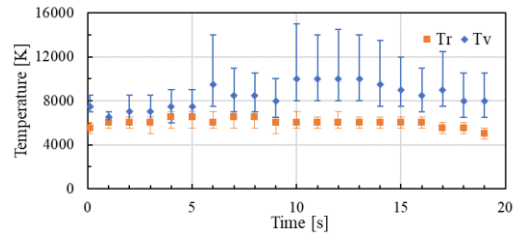


(b) 4mm point

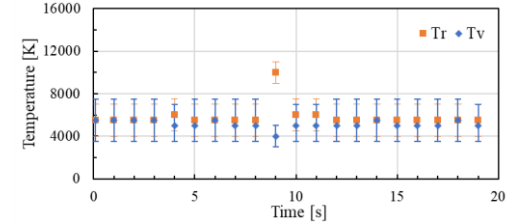


(c) 8mm point

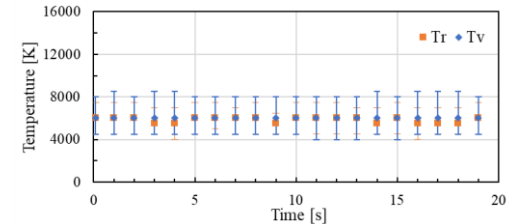
Fig.15 Time variation of CN temperatures in graphite specimen surface from 0mm to 8mm



(a) 0mm point

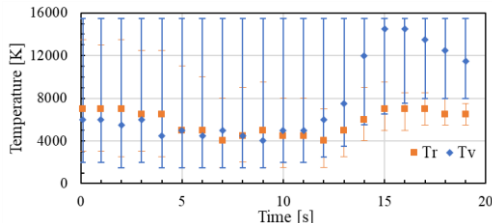


(b) 4mm point

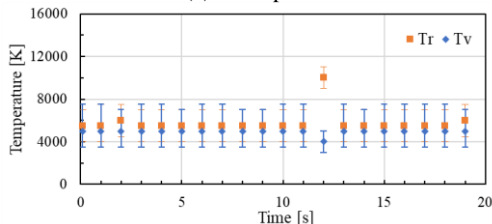


(c) 8mm point

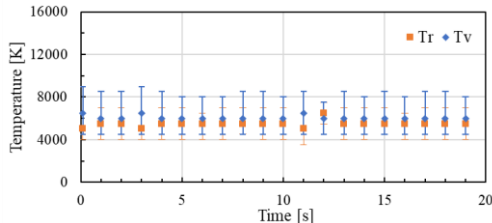
Fig.16 Time variation of CN temperatures in C/C composite specimen surface from 0mm to 8mm



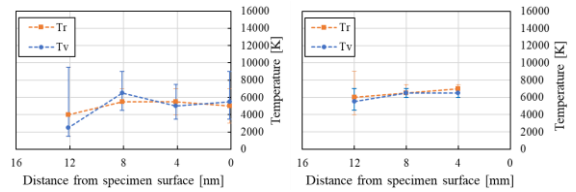
(a) 0mm point



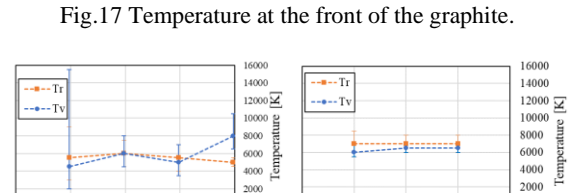
(b) 4mm point



(c) 8mm point

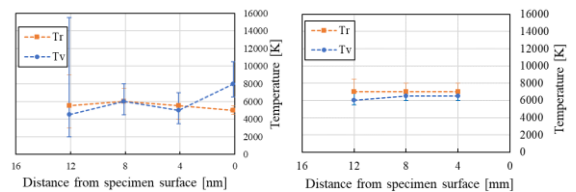


(a) CN

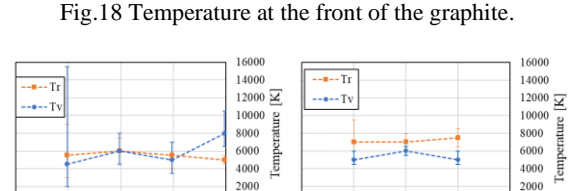


(b) N2

Fig.17 Temperature at the front of the graphite.



(a) CN



(b) N2

Fig.18 Temperature at the front of the graphite.

Fig.19 Temperature at the front of the C/C composite.

5. 結言

参考文献

- (1) Gouji Y., Singo O., Takashi M., Hiromitsu K.: Temperature Measurements of CO₂ and CO₂ – N₂ Plasma Flows around a Blunt Body in an Arc-Heated Wind Tunnel, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan Vol. 11, pp. 87-91, 2013
- (2) Steven W. L., Richard G. M., Timothy J. M.: Expansion Tunnel Experiments of Earth Reentry Flow with Surface Ablation, JOURNAL OF SPACERAFT AND ROCKETS Vol. 53, No.5, September-October 2016
- (3) 船津賢人, 渡辺泰夫, 白井紘行, 伊藤健, 石田清道, N₂⁺ First Negative および CN Violet バンドを用いた高エンタルピーアーク加熱風洞流の温度計測, 日本機械学会論文集(B), 70(694), No.03 -1054, 2004