

アーク加熱風洞試験における炭素系材料周りの流れ場の特性調査

坪内啓晟, 古頭龍太 (東海大学大学院工学研究科),
山田剛治 (東海大学工学部)

Flowfield Characteristics around Carbonaceous Materials in an Arc-Heated Wind Tunnel Tests

Keisei TSUBOUCHI, Ryuta KOTO (Graduate School of Engineering, Tokai University),
Gouji YAMADA (Mechanical Engineering, Tokai 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 difficult to characterize, as it is in thermal and chemical non-equilibrium states. In particular, the airflow with thermochemical reactions in the vicinity of a specimen has not been measured and analyzed much. The purpose of this research is to investigate characteristics of arc heated air plasma flow around carbon-based materials in the ISAS/JAXA 1MW arc-heated wind tunnel. To do this, axial spatial distribution and time variation of radiations in front of the specimen surface are measured using a multipoint spectroscopic measurement system. As a result, spectroscopic data from the shock wave to the boundary layer of the specimen's surface were obtained. From the results, the reaction process between the airflow and the material was discussed and the vibrational temperature (T_v) and rotational temperature (T_r) of the chemical species in the airflow were determined.

1. まえがき

近年, JAXA の「はやぶさ 2」や NASA の「OSIRIS-REx」のように小惑星探査機によるサンプルリターンプロジェクトが注目されている。惑星サンプルの分析は、地球や宇宙の成り立ちに関わる多くの情報が得られるため、現在各国の宇宙機関で計画、実施されている。このようなミッションにおいてサンプル回収に使用されるカプセルは探査機の帰還時に、地球引力圏外から投下され、10 km/s を超える非常に速い速度で大気圏に再突入する。カプセル前面では強い衝撃波による空力加熱により気流温度が 10000 K を越える環境となる。このような空力加熱からカプセル内部を保護する熱防御システム (TPS) として、炭化型アブレータと呼ばれる複合材料が利用されている。アブレータは、空力加熱により材料を損耗し、樹脂の熱分解などによる吸熱反応に加え、生成される熱分解ガスや炭化層と呼ばれる材料表面の多孔質構造による断熱効果により、機体内部の温度上昇を抑えるものである¹⁾。

アブレータなどの TPS 開発のため、再突入環境を模擬する地上試験装置としては、再突入飛行時と同等の高加熱率環境を長時間維持可能であるアーク加熱風洞が広く使用されている。しかし、アーク加熱風洞は再突入飛行時のよどみ点における加熱率を再現するよう設計されたものであり、生成される試験気流は、アーク放電によるジュール加熱やノズルによる膨張加速によって熱化学的

非平衡性を伴う低密度高エンタルピー流となっており、実際の大気突入環境とは異なる気流特性となっている。そのため、試験精度向上に向けた気流特性の調査や、数値解析による現象予測などが長年にわたり行われてきた。近年では計測技術や数値解析技術の進歩により、加熱器内から自由流部までの気流特性を精度良く予測できる手法が開発されている²⁾。一方で、物体近傍の気流は強い衝撃波による電離や乖離、気流と材料との表面相互作用などによって複雑な熱化学的非平衡性を伴うため、計測や分析が難しく、厳密な反応過程や気流特性などが明確になっていない。そこで、本研究ではアーク加熱風洞試験によるアブレータを模した炭素系材料の加熱実験を行い、紫外可視光波長の発光分光計測により供試体近傍の熱化学反応を伴うプラズマ流の気流特性の調査を行った。得られた実験結果から、気流と材料との反応過程の考察や熱的非平衡性を考慮した気流中の化学種の振動温度 (T_v)、回転温度 (T_r) の定量評価を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

本研究では Fig.1 に示す、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) を使用した^{2,3)}。本実験における風洞の運転条件を Table 1 に示す。作動ガスには空気を用い、アーク電流は安定運転を優先して 450 A とした。ノズル出口から 75 mm の位置に直

径 50 の供試体を投入するため、よどみ点における熱流束は約 7.7 MW/m²。圧力は約 25.9 kPa となった。エネルギーバランス法により求めた気流エンタルピーは約 13.7 MJ/kg であった³⁾。実験時のチャンバー圧力 141 Pa は地球の標準大気で計算した場合、成層圏である高度約 14 km の圧力に相当する。

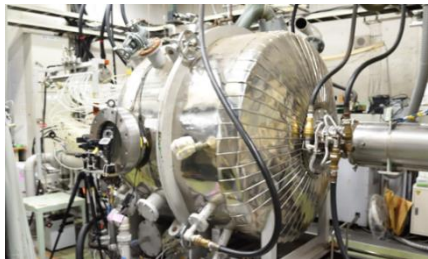


Fig.1 1MW arc-heated wind tunnel (ISAS/JAXA)

Table 1. Experimental condition	
Working gas	Air
Arc current [A]	450
Arc heater voltage [V]	1470
Air flow rate [L/min]	840
Chamber pressure [Pa]	141.0
Bulk enthalpy [MJ/kg]	13.7

2.2 供試体

Fig.2 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炭化アブレータ表面の炭素と気流の反応に着目し、現象の単純化をするため、炭素のみで構成されるグラファイトを使用した。また、炭化型アブレータの構造に近い C/C コンポジット供試体を用いた。更に、炭素を含まないモデルとして、銅製の供試体を比較のため用いた。供試体は全て直径 50 mm の円柱型とし、アーク加熱気流への暴露部の厚さはグラファイト、C/C コンポジット供試体を 15 mm、銅製供試体は 10 mm とした。各供試体の気流への投入時間は、グラファイトおよび C/C コンポジット供試体を 20-30 秒間とし、銅製供試体は表面の融解が生じないよう 3 秒間とした。

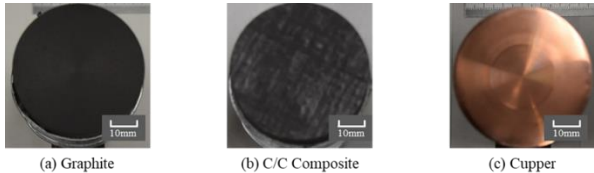


Fig.2 Specimens

2.3 計測システム

供試体前方の流れ場に対し紫外可視光波長の発光分光計測を行った。Fig.3 に実験装置及び計測システムの概略図を示す。計測システムはバンドルファイバ(FS15-35301, 三菱電線工業), 光学レンズ(f= 300 mm), 分光器(MK-300, BUNKOUKEIKI), ICCD カメラ(DH334T-18F-E, ANDOR)

で構成される。光学レンズ及びファイバは観測窓部に光学レールを取り付けて固定する。ファイバは 2 mm 間隔で 7 本が束になっている。よどみ点から光学レンズ、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、24 mm の範囲を 4 mm 間隔で 7 点を定点計測する。Fig.4 に計測点の詳細を示す。計測点は供試体表面から約 0.5 mm の位置を基準の「0 mm 点」として上流方向へ 24 mm までの空間分布スペクトルを定点計測した。また 0 mm, 4 mm 位置において径方向にも同様に空間分布の計測を行った。

計測は供試体投入中、0.5 秒毎に撮影を行い、アブレーションの進行による気流の変化を計測した。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 420 nm と 700 nm, 格子定数 1200 の回折格子を用いて中心波長 380 nm で計測を行った。

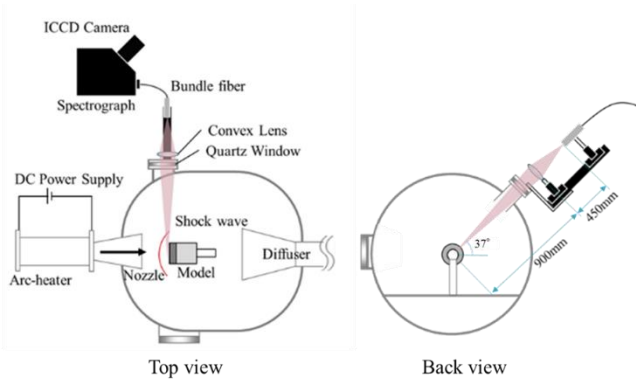


Fig.3 Spectral measurement system

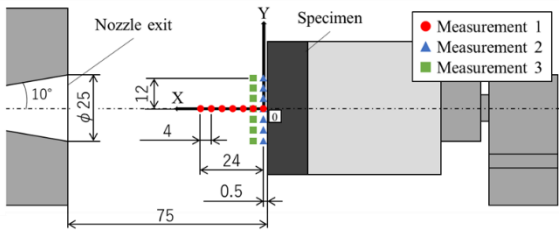


Fig.4 Measurement points

Table 2. Measurement condition			
Center wavelength [nm]	420	700	380
Grating [line/mm]	150	150	1200
Accumulate cycle time [s]	0.50	0.50	0.50

2.4 内部エネルギー評価方法

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⁴⁾。スペクトルフィッティング法は温度を変数として計算した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もの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 Tr，振動温度，電子励起温度及び電子温度を等しいとして Tv とする 2 温度モデルの仮定で行う．エラー評価は，SPRADIAN2 に含まれる誤差に加え，理論スペクトルと計測スペクトルの残差の 10% 以内の残差値を取る理論スペクトルの温度を誤差としている^{4,5)}．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	1022	557

3. 実験結果及び考察

3.1 計測スペクトル

Fig.5 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．画像より衝撃波面は供試体前方 8–12 mm 付近で生じていると考えられる．

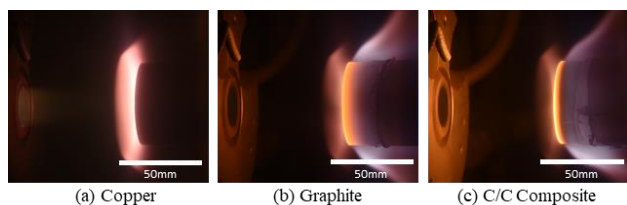


Fig.5 Photographs of each specimen at experiment.

グラファイト供試体投入後 10 秒に取得した 0 mm，4 mm 位置における 270 – 870 nm の範囲のスペクトルを Fig.6, 7 に示す．Fig.6 に示した 0 mm 位置のスペクトルでは，350 – 450nm 付近には CN violet ($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+ \Delta v = 1, 0, -1$) のスペクトルが観測された．これは気流中の窒素を含む化学種と供試体表面の炭素が反応して CN が生成されたものと考えられる⁶⁾．500 nm 付近から長波長側のスペクトルは供試体表面の黒体輻射が重なり，気流中の化学種のスペクトルは判別不能であった．Fig.7 に示した 4 mm 位置においては，窒素分子のバンドスペクトルや窒素，酸素，炭素原子の輝線スペクトルが確認された．これらの化学種のスペクトルは試験気流中の N₂, O₂, CO₂ などの化学種が，衝撃波面での励起・解離・電離により生じたと考えられる．また，所々に見られる銅の原子線は，アーク加熱器の電極の損耗によって生じるコンタミネーションである．衝撃波面より前方の 16, 20, 24 mm の発光は衝撃層内，境界層の発光と比較し微弱であり，化学種の判別が不能であった．

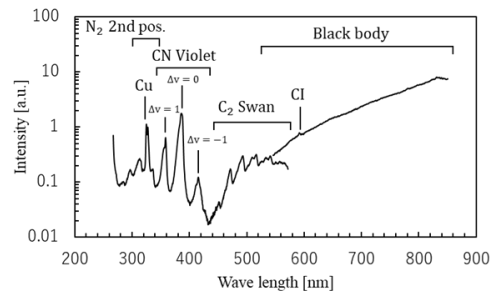


Fig.6 Measured spectra at 0mm point

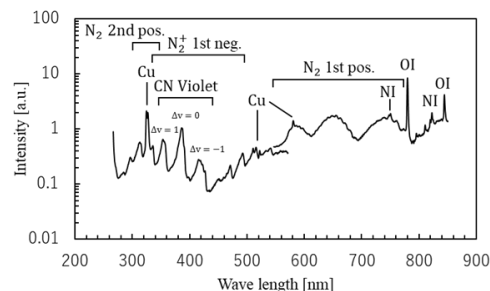
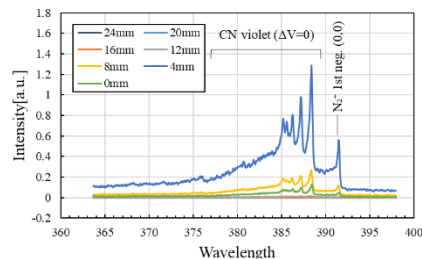


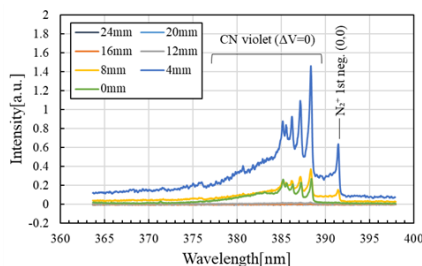
Fig.7 Measured spectra at 4mm point

計測した広範囲のスペクトルから，十分な発光強度があり，他の種類のスペクトルとの重複が少ない CN Violet ($\Delta v = 0$) のスペクトルを対象とし，360 – 400 nm の範囲の計測を行った．分子の振動・回転遷移によるスペクトルの詳細な形状を得るため，より分解能の高い Grating 1200 line/mm の回折格子を用いて計測を行った．Fig.8 (a) に銅供試体投入 1.5 秒後のスペクトルを示し，Fig.8 (b), (c) にグラファイト及び C/C コンポジット供試体投入 19 秒後に計測したスペクトルの空間分布を示す．作動ガスに窒素を用いた実験⁶⁾では，CN の分子スペクトルは主に供試体表面から 0 mm の計測点でのみ観測され，4, 8 mm 点では殆ど検出されなかった．対して作動ガスが空気である本実験では，CN のスペクトルは衝撃層内である 4, 8 mm 点でも明確に検出されており，12 mm 点でも微弱に検出されている．また供試体に炭素原子を含まない銅の供試体でも同様の位置で CN のスペクトルが観測されている．以上のことから作動ガスに空気をを用いた場合，衝撃波面付近から後方では供試体の材質問わず CN 分子が生成されることがわかる．この CN 分子は気流中の窒素を含む化学種と CO₂ などの炭素を含む化学種が衝撃波面で分解，結合することで生成されたものであると考えられる．CN の生成及び分解の化学反応は発熱反応であり^{7,8)}，実際に TPS として使用される炭化型アブレータにおいては，樹脂の熱分解や炭素の昇華による冷却効果を阻害する要素として知られている¹⁾．

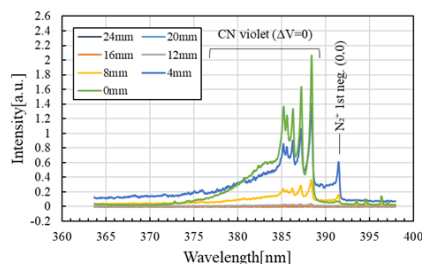
16 – 24 mm の計測点では，気流の発光が弱いため CN 分子や N₂⁺ のスペクトルの形状は S/N 比が低く特定が困難である．これらの自由流部分では，衝撃層内よりも低密度であり，発光を生じる脱励起反応も少ないため発光が弱く，現状の計測システムでは計測が困難である．



(a) Copper specimen



(b) Graphite specimen

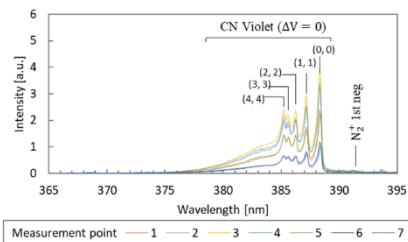


(c) C/C composite specimen

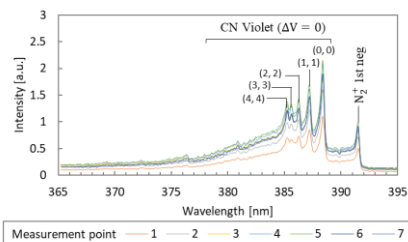
Fig.8 Spatial distribution of flow direction spectra 364 – 398 nm

グラファイト供試体投入 10 秒後の径方向空間分布結果を Fig.9 (a), (b)に示す. 0 mm 位置では CN の発光強度が 4 mm 位置より 2 倍程度強く, N_2^+ の発光は弱くなった. このことから供試体表面において CN の数密度が増加していることが分かり, 窒素を含む化学種が表面での CN の生成に消費されることにより, N_2^+ の量が減少し, 発光量が低下したと考えられる.

Fig.10 (a), (b)に供試体表面から 0 mm, 4 mm 位置の CN Violet ($\Delta v = 0$)の振動遷移(0, 0)の発光強度時間変化を示す. どちらも中心軸上がもっとも発光が強い傾向が見られた. これは圧力が高いよどみ点付近において反応を生じる粒子数が増加しているためと考えられる. 4 mm 位置における径方向の発光強度はおおよそ軸対象の分布を持ち, 時間的にほぼ一定の値であった. 一方で 0 mm 位置の発光強度は時間の経過により上昇する傾向があり, 計測点によって変動に大きなばらつきが見られた. 時間経過による発光強度の増加は供試体表面の温度上昇によるものであると考えられる. また, 発光強度の変動のばらつきから, 表面の反応で生成される CN の量は定常的ではないことが分かる.

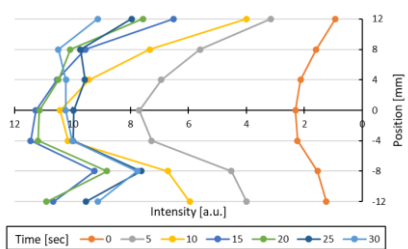


(a) 0mm point

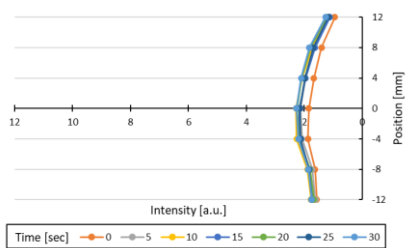


(b) 4mm point

Fig.9 Spatial distribution of radial direction spectra 364 – 398 nm



(a) 0mm point



(b) 4mm point

Fig.10 Time variation of luminescence intensity
CN Violet $\Delta v = 0$ (0, 0)

3.2 スペクトルフィッティングによる温度評価

内部エネルギーの分析は CN Violet ($\Delta v = 0$)のスペクトルを含む 364 – 398 nm の範囲と N_2^+ 1st positive band を含む 608 – 775 nm の範囲で行った(4). フィッティング結果の一例として Fig.11 に供試体投入後 19 秒の 4 mm 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算出できている. しかし, 364 – 398 nm の解析では準位の高い(3,3), (4,4)において理論スペクトルの大きな差異がみられる. この現象は先行研究⁶⁾においても見られ, 衝撃層内の CN 分子は, 理論スペクトルで仮定されるボルツマン分布に比

べ、高い振動準位間の遷移を伴う粒子が多く存在している事を示している。分子の温度評価としては振動準位の高い粒子に比べ低い準位の粒子数の方が支配的であるため、本結果のように低い振動準位のバンドが良好に一致していれば算出結果は妥当であると言える。同様の解析を銅、グラファイト、C/C コンポジット供試体を用いた計測の結果のうち、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、内部エネルギー状態の空間分布と時間変化についてまとめた。

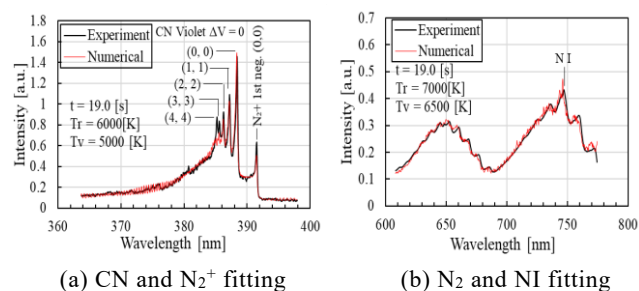
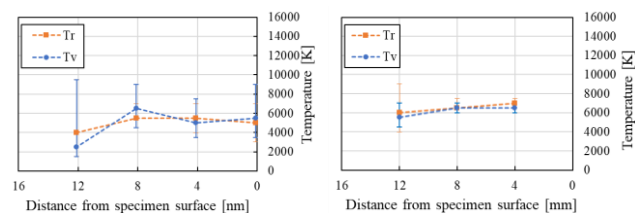


Fig.11 Example of spectral fitting results

Fig.12, 13, 14 にそれぞれ銅、グラファイト、C/C コンポジット供試体を用いた実験の衝撃層内の発光からスペクトルフィッティングにより求めた回転温度 Tr, 振動温度 Tv の空間分布を示す。Fig.12, 13, 14 (a)に示す CN の温度評価結果から、12 – 4 mm 点の温度はどの供試体でも似た変動の傾向が見られるが、0 mm 位置においては銅と炭素系材料で大きく異なる傾向となった。銅は壁面の効果により Tr, Tv が一致する平衡状態となっているが、グラファイト、C/C コンポジットの Tv が急激に上昇し熱的非平衡性が強くなっている。この現象は先行研究⁶⁾においても同様の結果が得られており、供試体表面での炭素と窒素による CN の生成による反応が分子の振動運動に影響を与え、結果のような熱的非平衡性が生じると考えられる。炭素を含む反応はその多くが強い輻射を生じるため、これらの輻射や材料の黒体輻射が生成した分子の振動を励起していることも考えられる。また、電子衝突が分子の振動を励起することが報告されており、材料表面において電子密度が高く、生成される分子が電子衝突の影響を受けていることも考えられる。

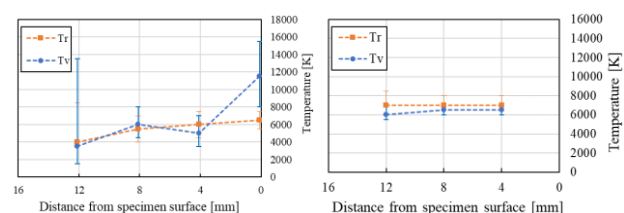
Fig.12, 13, 14 (b)に N₂ の温度の空間分布を示す。0mm 点の N₂ のスペクトルは供試体表面の黒体放射によって解析が行えないため除いている。12 – 4 mm 点において銅の供試体を用いた実験では温度は約 6000K でおおよそ平衡であるが、グラファイトでは Tr が Tv より 500 – 1000 K 程度高い非平衡状態となった。更に C/C コンポジットでは Tr が Tv より 1000 – 2500 K 高く、明確な非平衡性が見られる。一般に衝撃波面において、分子温度は振動温度より並進温度は短時間で上昇し、その後分子同士の衝突のより内部エネルギーは緩和し平衡となる¹⁾。結果から材料毎の表面の反応の差異が衝撃層内の気流の

熱緩和過程に影響を与えることが考えられるが、どのような影響によるものかは、現時点では不明である。



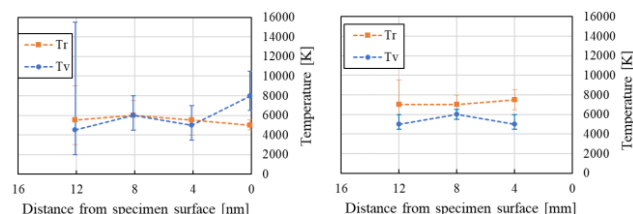
(a) CN Violet ($\Delta v = 0$) (b) N₂ 1st pos.

Fig.12 Spatial distribution of temperature in tests with copper specimen



(a) CN Violet ($\Delta v = 0$) (b) N₂ 1st pos.

Fig.13 Spatial distribution of temperature in tests with graphite specimen



(a) CN Violet ($\Delta v = 0$) (b) N₂ 1st pos.

Fig.14 Spatial distribution of temperature in tests with C/C composite specimen

Fig.15, 16 にグラファイト、C/C コンポジット供試体を用いた実験の 0 – 8 mm 点の温度の時間分布を示す。4mm, 8mm 位置では Tr, Tv はどちらも約 6000 K の平衡に近い値であり、定常的であった。Fig.15(a)に示すグラファイト供試体の 0mm 点では Tr が 4000 K, Tv が 7000 – 8000 K の振動非平衡であるが、内部エネルギー状態の時間的な変動は殆どなく、定常的であると言える。Fig. 10 で得られた CN の発光強度の変動と合わせると、表面近傍における CN 分子は時間経過により粒子数は増減するが、それらの内部エネルギー状態は一定であるという結果が得られた。

一方で Fig.16 (a)に示される C/C コンポジットの 0 mm 点の CN 分子の温度は時間的に増減していることが分かる。この要因としては複合材である C/C コンポジットの炭素繊維と母材の構造が表面の反応を非定常化していることが考えられる。

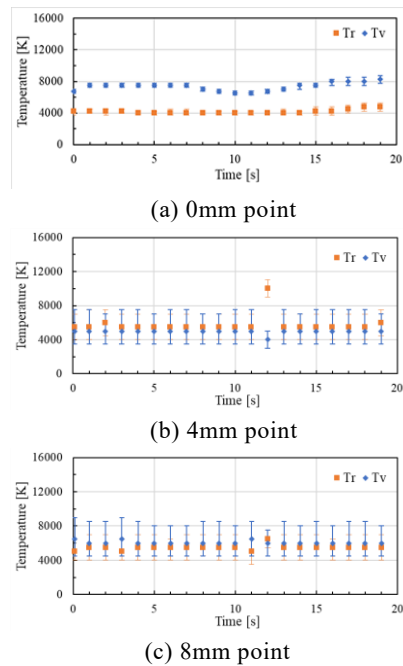


Fig.15 Time variation of CN temperatures in graphite specimen surface from 0mm to 8mm

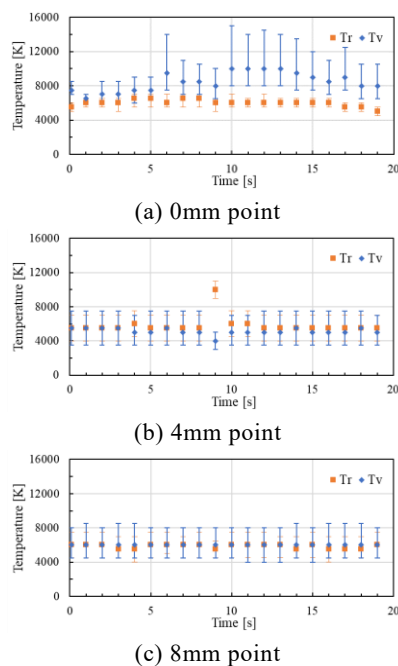


Fig.16 Time variation of CN temperatures in C/C composite specimen surface from 0mm to 8mm

4. 結言

本研究ではアーク加熱風洞における炭素系材料周辺の空気プラズマ流の気流特性について、分光計測を用いて衝撃層内の化学種の空間分布と時間変化を取得した。更に、供試体近傍で計測したスペクトルに対してフィッティング法を適用し、CN 及び N_2 分子の内部エネルギー評価を行った。得られた結果を下記に示す。

- 1) グラファイト、C/C コンポジット、銅供試体を用いた計測結果を比較し、衝撃波面に置いて生成される CN 分子と炭素系材料と気流の反応により生じる CN 分子の差異が明らかとなった。
- 2) グラファイト供試体正面 0 mm 位置と 4 mm 位置の径方向の分布を取得した。4 mm 位置での CN の発光は定常的かつ軸対象の分布を持つことが分かり、0 mm 位置においては空間的、時間的にばらつきが見られたため、気流と表面の反応は非定常であると言える。
- 3) 供試体の炭素の有無により壁面近傍での内部エネルギー状態が異なり、炭素系材料では表面の熱化学反応の影響によると考えられる、振動非平衡状態となることが明かとなった。
- 4) 壁面近傍の非平衡状態はグラファイトの場合時間的にはほぼ一定となるが、C/C コンポジットの場合、複合材料の構造に起因すると考えられる反応の変動が生じる。

5. 参考文献

- [1] 久保田弘敏, 鈴木宏二郎, 綿貫忠晴: 宇宙飛行体の熱気体力学, 東京大学出版社 (2002).
- [2] 下田孝之, 山田和彦: JAXA/ISAS におけるアーク加熱風洞の現状と展開, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 63, No.10, pp.315-320 (2015).
- [3] M. Hinada, Y. Inatani, T Yamada, K. Hiraki: An Arc-Heated High Enthalpy Test Facility for Thermal Protection Studies, The Institute of Space and Astronautical Science Report, No. 664 (1996).
- [4] G. Yamada, S. Otsuka, T. Matsuno, H. Kawazoe, Temperature Measurements of $CO_2 - N_2$ Plasma Flow around a Blunt Body in an Arc-Heated Wind Tunnel, Journal of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 11, pp87-91 (2013).
- [5] K. Fujita, M. Mizuno, K. Ishida, T. Ito: Spectroscopic Flow Evaluation in Inductively Coupled Plasma Wind Tunnel, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol.22, No.4, pp.685-694 (2008).
- [6] K. Tsubouchi, S. Yanai, G. Yasuda, G. Yamada, Multipoint Spectroscopic Diagnostics of Plasma Flows with Graphite Ablation in an Arc-Heated Wind Tunnel, APISAT 2019 Conference Paper 1240-1249 (2019)
- [7] C. Park, R. L. Jaffe, H. Partridge, Chemical-Kinetic Parameters of Hyperbolic Earth Entry, Journal of Thermophysics and Heat Transfer Vol. 15, No. 1, pp.76-90 (2001)
- [8] Steven, W. L. and Richard, G. M., and Timothy, J. M., Expansion tunnel Experiments of Earth Re-entry Flow with Surface Ablation, Journal of spacecraft and Rockets, Vol. 53, No. 5, pp887-899 (2016)