

アーク加熱風洞によるアブレーションを伴う 窒素プラズマ流の分光診断

野内昌平（東海大学大学院工学研究科），坪内啓晟（東海大学工学部），
安田銀次（東海大学工学部） 山田剛治（東海大学工学部）

Spectroscopic Diagnostics of Nitrogen Plasma Flow with Ablation in an Arc-heated Wind Tunnel

Shohei YANAI (Mechanical Engineering, Tokai University), Keisei TUBOUCHI (Mechanical Engineering, Tokai University), Ginji YASUDA (Mechanical Engineering, Tokai University), Gouji YAMADA (Mechanical Engineering, Tokai University)

Abstract

Recently, sample return missions attract attention around the world. In these missions, space vehicles receive extreme heat load when they re-enter the atmosphere. The ablation method is effective to protect space vehicles from aerothermal heating. The ablator used in this method has been tested by an arc-heated wind tunnel. However, the plasma flow generated by an arc-heated wind tunnel is known to be in thermal and chemical nonequilibrium states. Moreover, it becomes more complicated with ablation. The purpose of this research is to investigate characteristics of arc heated plasma flow with graphite ablation in the ISAS arc-heated wind tunnel. To do this, spatial distribution and time change of radiations in front of a test model surface are measured using a multipoint spectroscopic measurement system. In addition, the rotational and vibrational temperatures are estimated by the spectrum fitting method to the measured spectra of CN violet ($\Delta v = 0$) in the shock layer. The strong spectra related to carbon such as CN violet and C₂ are observed near the test model surface after 4 seconds. It is found from the result that carbons come out from the test model surface and react with nitrogen in the test gas. The result of temperature evaluation of CN violet shows that the rotational and vibrational temperatures are estimated to be about 5400K and 7400K after 4 seconds.

1. まえがき

1.1 背景・目的

近年、宇宙開発が注目されており、世界各国で様々な探査が計画・実行されている。中でも試料を地球に持ち帰るサンプルリターンミッションはより鮮明な調査が可能のため重要な探査の一つとされている。日本では「はやぶさ」が小惑星イトカワからサンプルを地球に持ち帰り、世界で初めてサンプルリターンミッションを成功させた。現在、その後継機である「はやぶさ2」が小惑星「りゅうぐう」の探査ミッションを遂行中であり、2020年に試料を地球に持ち帰る予定である。このような探査機が地球大気に再突入する際、深宇宙から地球大気に直接突入するため飛行速度は10km/sを超え、非常に高速となる。このような速い速度では機体前方に強い衝撃波が発生し、衝撃層内の温度は10000Kを超え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化学反応を生じ、プラズマ流が生成される。プラズマ流中では、内部エネルギーの励起や緩和及び化学反応が生じ、熱化学的に非平衡で複雑な流れ場となる。そのため、このような過酷な空力加熱環境から宇宙機を守るために熱防護システムの開発が必要となる。現在では耐熱性、

軽量性、低コスト性の観点からアブレーション法が有効とされている。アブレーション法はアブレータと呼ばれる炭素と樹脂の複合材が使用され、これらの相変化を利用して加熱から守る方法である。アブレータの開発にはアーク加熱風洞などの高エンタルピー風洞を用いた耐熱試験が行われている。実際、はやぶさカプセルの熱防護システムの開発にはJAXA宇宙科学研究所（ISAS）が所有するアーク加熱風洞が使用された。しかしながらアーク加熱風洞によって生成される試験気流は密度が低く緩和が進まないことから非平衡性が強く複雑な流れ場となる。さらに、アブレータ試験では熱分解ガスが発生し、より複雑な流れ場となる。そのため、アーク加熱プラズマ流の特性が十分解明されておらず、熱防護システムが過剰な安全率を設けて設計されているのが現状である。そこでアーク加熱風洞によって生成される気流特性を解明できれば耐熱試験の信頼性が向上し、高精度かつ低コストの熱防護システムの開発につながると考えられる。

そこで、本研究では窒素を試験気体としてアブレーションを伴うプラズマ流の特性解明を目的として分光計測及びスペクトルを利用した温度評価を行った。

1.2 アブレーション法

アブレーション法とは熱防御システムの一つであり、表面物質の熔融や昇華といった相変化を利用して熱防御を行うものである。アブレーション法は再使用が不可能だが、信頼性、耐熱性、軽量性、低コスト性の点で優れた熱防御方法である。アブレーション法はアブレータ（炭素繊維と樹脂の複合材）と呼ばれる樹脂で宇宙機をコーティングすることで熱防御を行う。炭素繊維に高分子樹脂を含浸させたものは炭化型アブレータと呼ばれ、再突入カプセル等に用いられる代表的なものである¹⁾。アブレータが加熱を受けると熱分解ガスが発生し境界層に放出されることで、空力加熱が宇宙機へ侵入するのを抑制する。さらに、樹脂自身の熱伝導性の悪さから宇宙機内部の温度上昇を抑制する。詳細なメカニズムを Fig.1 に示す。

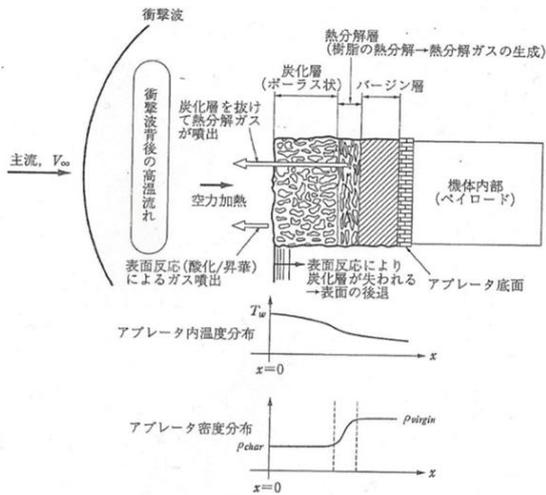


Fig. 1 Schematic of ablation

2. 実験の概要

2.1 実験装置

本研究では、ISAS が所有する 1 MW アーク加熱風洞を用いる (Fig.2)。アーク加熱風洞は大電力のアーク放電により、高エンタルピの超音速気流を長



Fig. 2 1MW arc-heated wind tunnel (ISAS)

時間持続することができる。本アーク加熱風洞は、主設備となる加熱装置、試験室、及びその付帯設備として電力供給設備、作動ガス供給設備、ガス排気設備、冷却水設備、計測設備から構成されている²⁾。加熱装置はセグメント型であり、約 80 枚の独立したドーナツ状の無酸素銅製のディスクから構成されている。加熱装置内部に流入した作動ガスにアーク電流によるジュール加熱を与えプラズマ化させ、ノズルを通して膨張加速し高エンタルピ超音速流を得る仕組みである。本研究では運転条件として、出力電流 450A、加熱器内圧 0.5 MPa、質量流量 18g/s、試験気体を N₂とした。

2.2 計測システム

計測システムの概要を Fig.3 に示す。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流線方向に対して真横から分光計測を行うため斜め上方に設置されている観測部を利用した。本研究で用いた分光システムは凸レンズ (f=300mm)、光ファイバ、分光器 (MK-300, BUNKOUKEIKI)、ICCD カメラ (DH334T, ANDOR)、デスクトップ PC によって構成されている。気流と衝撃層を含む像を分光器に取り付けた光ファイバの先端に凸レンズを用いて集光し、ICCD カメラによって 2 次元のイメージデータとして取得を行った。光ファイバは 7 本のファイバが 2mm 間隔で束になっているバンドルファイバを用いることで 7 点同時計測が可能である。計測位置の詳細を Fig.4 に示す。供試体前方から凸レンズまでの距離と、凸レンズからファイバ先端までの距離を 2 : 1 にすることで、4mm 間隔で計測できるよう配置した。供試体表面近傍を 0mm とし、流線方向に 4mm 間隔で 24mm まで、7 点での流線方向の空間分布を計測した。さらに、加熱直後から終了まで 1 秒間隔で計測を行い、時間変化も同時に取得した。

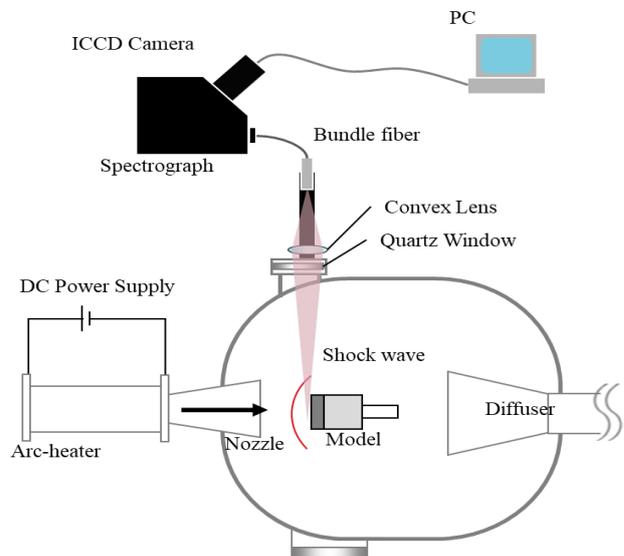


Fig. 3 Outline of experimental facility

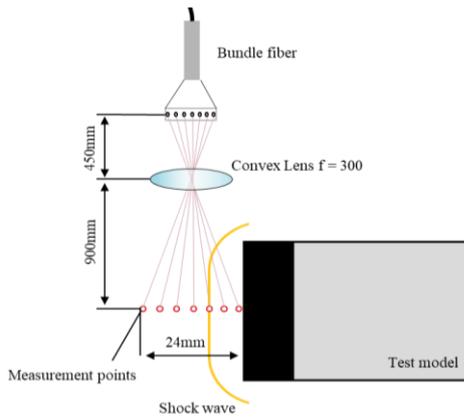


Fig. 4 Detail of measurement points

2.3 供試体

本来の耐熱試験では炭化アブレータが使用されるが、加熱を受けることで樹脂が昇華し、熱分解ガスが発生するため現象が非常に複雑になってしまう。そこで、本研究では、現象の単純化を謀るため熱分解ガスが発生しない純粋なグラファイトを使用した。形状は直径 50mm の円柱型とした。グラファイト側面への加熱を防ぐため、ベークライト製のホルダに耐熱用接着剤セラマボンド 569（オーデックス社、耐熱温度 1670℃）を用いて接着し、ガラスクロスで被覆した。供試体取り付け位置はノズル出口から 75mm の位置に設置した。供試体の設置状況を Fig.5 に示す。

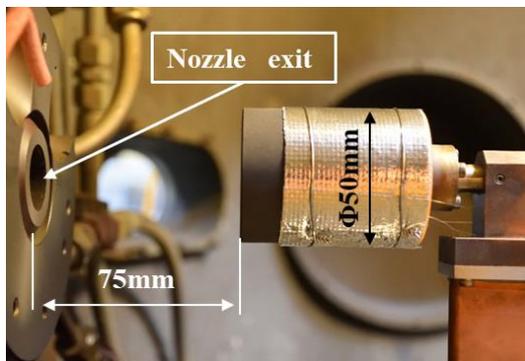


Fig. 5 Graphite test model

2.4 解析方法

発光スペクトルの形状が温度（回転温度、振動温度）に依存しているためスペクトル形状を見ることで温度を推定することが出来る。そこで本研究では理論スペクトルを計測スペクトルに重ね合わせるスペクトルフィッティング法を用いて温度評価を行った³⁾。理論スペクトルの計算には輻射解析コード SPRADIAN2 用い、温度（並進温度、回転温度、振動温度、電子励起温度、電子温度）をパラメータとし、他に化学種、波長範囲、数密度を与えることで導出する。

今回行った解析条件を Table1 に示す。波長範囲は計測スペクトルと同一とした。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 、振動温度と電子励起温度及び電子温度を等しいとして T_v とした。これは 2 温度モデルの仮定である。Table 1 に示す条件を用いて SPRADIAN2 により、CN、 N_2 及び N_2^+ の理論スペクトルを温度を変化させそれぞれ計算し、理論スペクトルのデータベースを作成した。実験スペクトルは、375~395nm の範囲では CN と N_2^+ 、600~790nm の範囲では N_2 と N_2^+ のスペクトルの重ね合わせであると仮定し、最小二乗法により、計測スペクトルに最適な理論スペクトルの組み合わせを決定した。エラー評価では、理論スペクトルと計測スペクトルのずれ、及び SPRADIAN2 に含まれる 10% の誤差を考慮している⁴⁾。

Table 1 Analysis condition

	Short wavelength	Long wavelength
Chemical species	CN, N_2^+	N_2 , N_2^+
Wavelength[nm]	375~395	600~790
Temperature[K]	2000~16000	3000~13000
Fitting point	621	635

3. 実験結果および考察

3.1 計測スペクトル

計測したスペクトルの一例として加熱開始から 9 秒後の供試体近傍の計測点で計測したスペクトルを Fig.6 に示す。Grating 3000/mm で中心波長を 420nm、700nm と変化させ計測し、つなげたものである。350nm 以下、550nm 以上の波長範囲では試験気体による窒素分子によるスペクトル及び窒素の原子線が観測された。350~450nm 付近には CN violet ($\Delta v = 0, \pm 1$) のスペクトルが観測された。これは

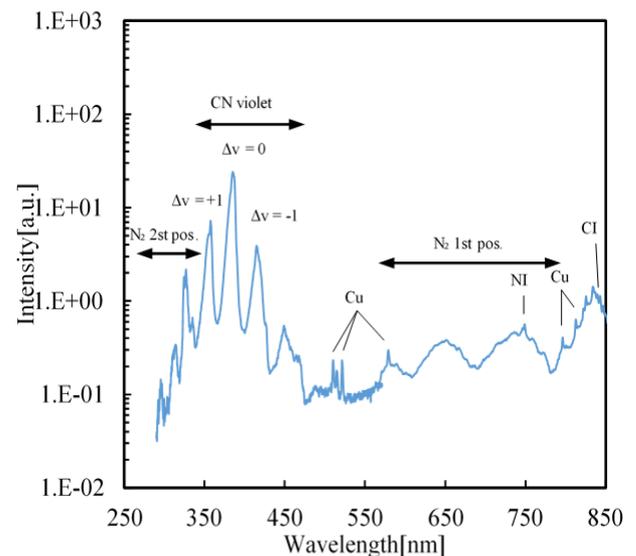
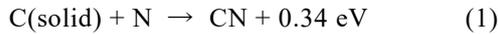


Fig. 6 Measured spectrum

試験気体から解離した N と供試体から噴き出した C が反応して CN が生成されたことが要因だと考えられる。840nm 付近に炭素の原子線も観測された。CN と C のそれぞれの生成過程を式(1), (2)に示す。また、ところどころ見られる銅の原子線は、本研究で使用したアーク加熱器の電極に銅を使用しているため不純物として観測されたものだと考えられる。



次に 7 点同時計測した流線方向のスペクトル空間分布を Fig.7 に示す。短波長側は発光の強い CN violet ($\Delta v = 0$)のスペクトルを Grating1200 ℓ /mm で計測したものであり、長波長側は Grating 150 ℓ /mm で広い範囲で計測したものである。どちらも供試体表面から 0mm の位置において炭素に関するスペクトルである CN 及び CI が見られるが、8mm の位置ではほとんど観測されていない。したがって、上述した CN 及び CI の生成は供試体表面近傍でのみ起きている反応であると考えられる。また、370~395nm では 0mm 地点での CN の発光が非常に強く、0mm 以外の計測点でのスペクトルは S/N 比が低くスペクトル形状が特定できない。550~850nm においても、自由流と考えられる 12mm 以降の計測点ではスペクトルの明確な形状は特定できない。衝撃層内と自由流では発光強度に大きな差があり、現状の計測システムでは同時に計測することは困難である。

Fig.8, Fig.9 に供試体表面から 0mm の位置における CN violet (0.0), N_2^+ 1st neg. (0.0) 及び、CI (833.4nm), NI (748.6nm) の発光強度の時間変化を示す。CN, CI どちらの発光も 4 秒以降に急激に強くなっており、11 秒でピークをむかえ、以降は弱まっている。加熱開始から 4 秒後に反応が始まり CN, CI が活発に生成されるが、11 秒以降は反応が収まってきていることがわかる。CN, CI の粒子数は時間変化による違いがあることがわかった。 N_2^+ 1st neg. (0.0) 及び NI の発光に関してはほとんど一定の値をとっており、時間変化による変動は見られなかった。

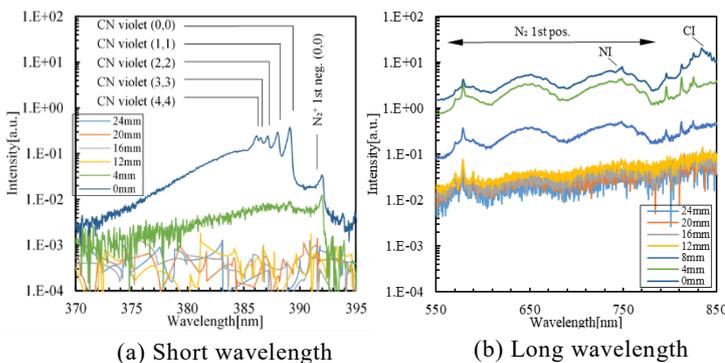


Fig. 7 Spatial distribution of spectra

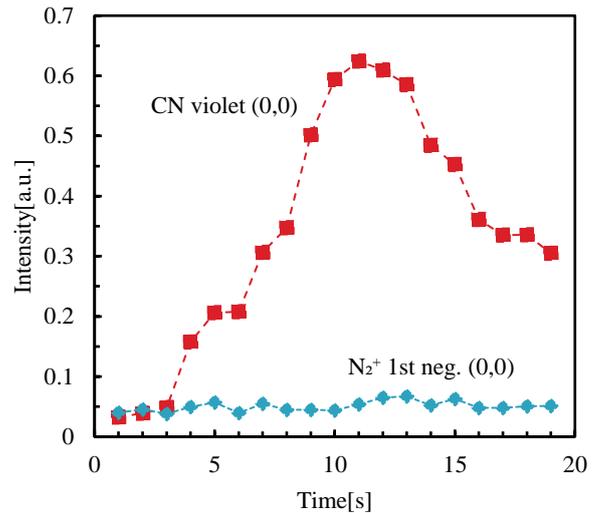


Fig. 8 Time change of CN violet (0.0) and N_2^+ 1st neg. (0.0)

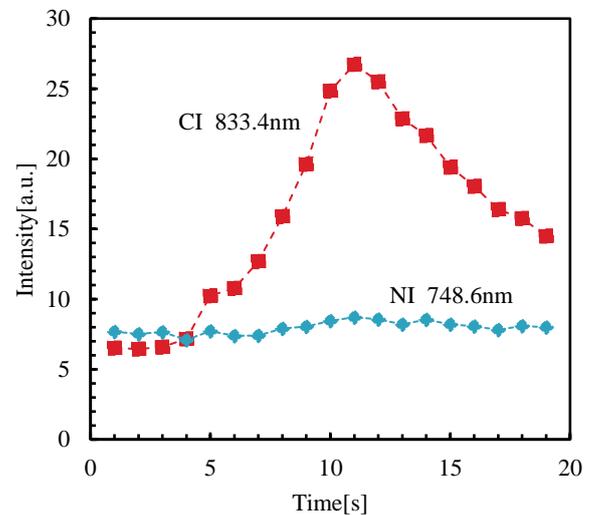


Fig. 9 Time change of CI (833.4nm) and NI (748.6nm)

3.2 スペクトルフィッティングによる温度評価

供試体表面から 0mm の計測点における CN violet ($\Delta v = 0$)が支配的な 370~395nm の範囲と、 N_2 1st pos. が支配的な 600~790nm の範囲のスペクトルに対してスペクトルフィッティング法を適用し時間変化に対する CN 及び N_2 の温度評価を行った。Fig.10 に 19 秒後のフィッティング結果を示す。どちらも計測スペクトルと理論スペクトルが比較的良い一致を示しているが、370~395nm の範囲では、準位の高い(3.3), (4.4)においてずれがみられる。これは、理論スペクトルの計算に使用した SPRADIAN2 はボルツマン分布を仮定しているのに対し、アークプラズマ流中では準位の高い粒子が多く存在しておりボルツマン分布に従わないため、準位の高い(3.3), (4.4)のバンドヘッドにずれが生じたと考えられる。フィッティングの結果より、CN の回転温度は 5800K, 振動温度は 7400K, N_2 の回転温度は 6600K, 振動温度は 6400K と推定される。同様に 1 秒

からすべてのスペクトルに対し温度評価を行った結果を Fig.11 に示す. CN の温度評価結果のグラフを見ると 1 秒から 3 秒において, 回転温度は振動温度より高く, 4 秒以降は逆転している. フィッティングする際, 計測スペクトルが CN と N_2^+ の重ね合わせであると仮定しているが, 1 秒から 3 秒では Fig.8 からわかるように CN 分子がほとんど存在していない. そのためフィッティングによる温度評価がうまく行われていないと考えられる. CN の生成が始まる 4 秒以降では回転温度, 振動温度がそれぞれ約 5400K, 約 7400K で一定となり熱的非平衡状態にある. Fig.8 では 11 秒以降発光が弱くなっているが, 回転温度, 振動温度に変化は見られなかった. したがって, 時間変化によって CN 分子の粒子数は増減するが, 温度状態は変わらないと考えられる.

N_2 の温度評価では 6 秒まで回転温度, 振動温度ともに 6600K で熱的平衡状態だが, 7 秒以降に回転温度が上昇し振動温度は低下, 13 秒以降に再び近づき熱的平衡状態に戻るといった結果となった. これはフィッティングの際に考慮した N_2 , N_2^+ 以外の化学種がこの時間帯に 600~790nm の範囲に存在したことが影響したと考えられる. 7 秒から 12 秒にかけては CN, CI の発光強度も強くなる時間帯であり, 炭素由来の化学種が影響したと考えられる.

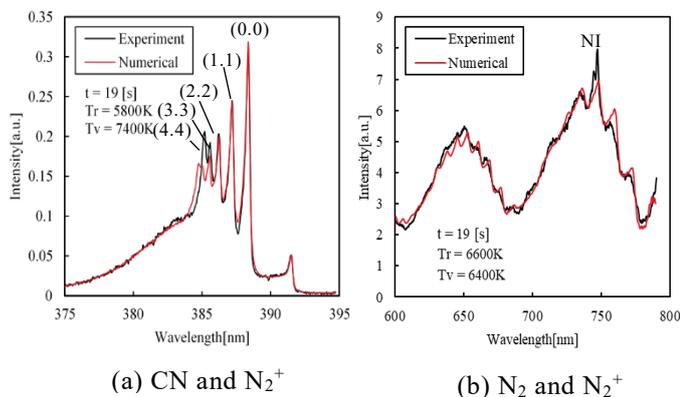


Fig. 10 Fitting result at 19 seconds

4. まとめ

本研究ではアーク加熱風洞によるアブレーションを伴う窒素プラズマ流の気流特性解明を目的とし, 供試体前面に生じる衝撃層及び自由流の発光を, 分光計測を用いて流線方向の空間分布と時間変化の同時計測を行った. また, 供試体近傍で計測したスペクトルに対してスペクトルフィッティング法を適用し温度評価を行った. 結果を下記に示す.

- 1)加熱開始から 4 秒以降に, 供試体表面近傍でのみ気流の窒素と供試体由来の炭素の反応が始まり CN, CI が生成され, 11 秒以降に反応が収まってくる.
- 2) CN の温度は加熱開始から 4 秒以降, 回転温度は 5400K, 振動温度は 7400K で一定値であり, 熱的非平衡状態である.
- 3) N_2 の温度に関して, 11 秒付近で回転温度は上昇し, 振動温度は低下するが, 基本的にどちらも 6600K で一定の値をとり熱的平衡状態である.
- 4)炭素に関する CN や CI の粒子数は時間変化によって変動がみられたが, 温度状態に関連性は見られない.

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).
- [4] 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] 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).
- [4] 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, pp685-694 (2008).

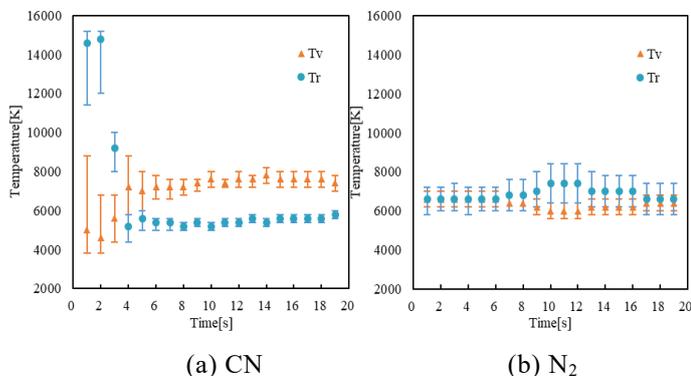


Fig. 11 Time change of temperatures in front of the test model surface