

高温プラズマ流中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定

橋本 真, 船津賢人 (群馬大学大学院),
半田圭佑, 根岸修平 (群馬大学), 矢島颯大 (群馬大学大学院)

Radiation Measurements around Si-based Heat-resistant Materials in High-temperature Plasma Jets

Makoto HASHIMOTO, Masato FUNATSU,
Keiyu HANDA, Shuhei NEGISHI, and Sota YAJIMA (Gunma Univ.)

Abstract

When a space vehicle reenters into the Earth's atmosphere, it receives severe aerodynamic heating. In general, in order to protect the space vehicle from the heating, ablation method is used. Carbonaceous heat-resistant materials are mainly used for ablation materials, and silicon-based heat-resistant materials are expected as a new-generation ablation materials. We focus on silicon carbide as a silicon-based heat-resistant material and perform ablation experiments of silicon carbide in air plasma freejets systematically. In previous study, the test piece was fed at a constant speed to keep the heat flux. In this study, an automatic position control system is constructed and is applied to the ablation experiments of the silicon carbide. Wide dynamic range (WDR) camera is also used to capture both bright radiation on the test-piece surface and dark radiation around the test piece, simultaneously. As a result, the position of test piece was kept by the automatic position control system. Both of the radiation around / on the test piece were obtained.

1. はじめに

宇宙往還機が大気圏再突入する際、前方には強い衝撃波が発生し、機体は著しい空力加熱を受ける。この加熱から機体を守る熱防衛法の1つにアブレーション法がある。アブレーション法とは、機体表面の熱防衛材料の相変化による吸熱反応と、その相変化で発生した気体により機体への流入熱量を低減させるものである¹⁾。現在、熱防衛材料としては炭素系材料が広く用いられている。また、ケイ素系材料は高密度かつ耐摩耗性があり、放射加熱から機体を守る効果が高く、次世代の耐熱性材料として注目されている²⁾。

本研究室では、ケイ素系耐熱材料として炭化ケイ素に着目し、空気プラズマフリーゼットを用いたアブレーション試験を系統的に行っている^{3)~5)}。空気プラズマフリーゼットの熱流束はジェット噴出口からの距離に依存する。試験中試料が融け先端位置が後退すると同じ加熱環境下で加熱できないため、試料と二次ノズルの距離を一定に保つことが重要になる。以前の研究⁶⁾では試験中の加熱率を一定に保つために一定速度で試料を送り、試料表面の放射を撮影し、放射強度から試料表面の温度を推定した⁷⁾。一定速度で送る場合、加熱率条件が一定になるまである程度の時間を要す。また今後、加熱環境を変化させる試験を行う場合、送り速度を調整する必要がある。そこで、試料先端を一定の位置に制御するシステムの構築を行った⁵⁾。

本研究では、位置制御システムを用い、試料の表面の発光と熔融により生成される気体の観察を目的とした炭化ケイ素のアブレーション試験を行った。試料表面は著しく強く発光するのに対し、試料周囲に生成されるガスの放射は微弱なため汎用ビデオカメラを用いると同時に撮影できない。そこで著しく強い発光と微弱な放射を同時に撮影できるワイドダイナミックレンジ (WDR) カメラで撮影し考察した。

2. 実験装置および方法

2-1 実験装置概略

実験装置概略を図1、図2に示す。図1は汎用ビデオ

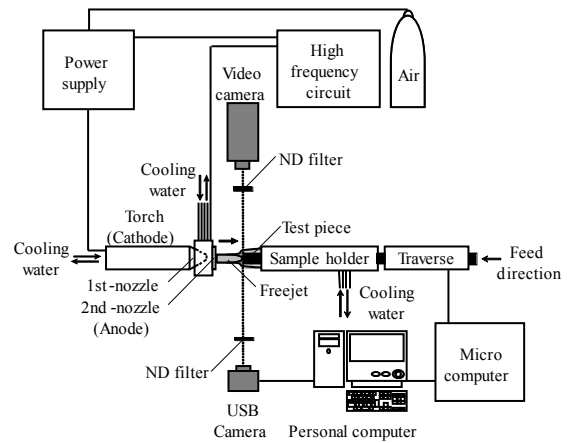


Fig. 1 Schematic view of experimental setup with video camera

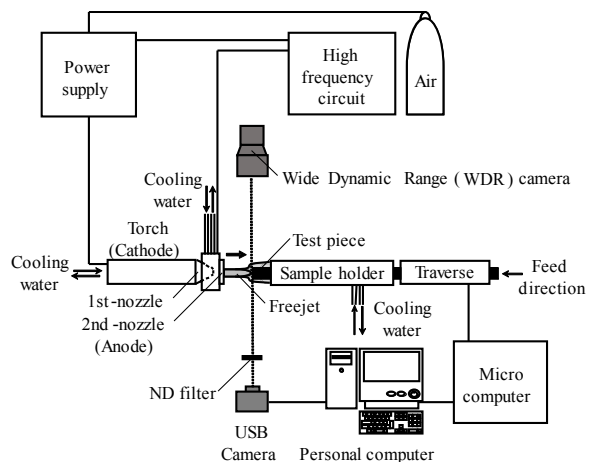


Fig. 2 Schematic view of experimental setup with WDR camera

カメラ、図2はワイドダイナミックレンジ(WDR)カメラを用い観察部だけが異なる。実験装置は大別してプラズマフリージェット発生装置、位置制御システム部、および観察部からなる。プラズマフリージェット発生装置は、内部に陰極をもつトーチと出口直径0.7mmの一次ノズルが一体となっており、外部に陽極を兼ねた二次ノズルが設置されている。作動気体には空気(体積比率 $N_2 : O_2 = 79 : 21$)を使用した。一次-二次ノズル間の距離は2.5mmとし、この間に発生させた極小空気プラズマジェットを二次ノズル出口から噴出させることにより、高温の空気プラズマフリージェットを得た。

空気プラズマフリージェットの発生条件は、放電電流15A、放電電圧 $180 \pm 2V$ 、貯気室圧力は0.6MPa(Abs.)、雰囲気圧力は大気圧(0.1MPa)とした。試料ホルダーは三重円管構造になっており、内部に水を流して冷却した。試料には直径2.0mmの断面形状を持つ炭化ケイ素の丸棒を用いた。

位置制御システム部は試料送り装置とUSBカメラ、位置制御プログラム、マイクロコンピュータから構成される。試験中の試料からは著しく強い発光があるため、O.D. = 5.0のNDフィルターを用いて減光した。ここでO.D. = 5.0は光学濃度が5.0であり、透過率が $1/10^5$ であることを意味する。USBカメラで撮影した映像と制御プログラムから試料先端位置を追尾し制御した。

観察部では、汎用ビデオカメラをジェットの流れに対して垂直方向に設置し、アブレーション試験中の試料の様子を撮影した。また、WDRカメラを用いて同様の撮影を行った。WDRカメラは、汎用ビデオカメラよりも広いダイナミックレンジをもち、著しく明るい対象と暗い対象を同時に撮影することで、汎用ビデオカメラが2台必要な撮影もWDRカメラは1台で可能である。

2-2 試料先端位置の制御方法

試験中の試料先端位置の制御はUSBカメラで撮影した映像をもとに行う。USBカメラの映像から切り出した映像を図3に示す。図3(a)のように試料を設置し、アブレーション試験を行った。試験中の試料の色をRGBの数値であらわし、色取得を行いプログラムが認識した領域が図3(b)である。取得した値は経過時間によらず同値と仮定し、同値の空間領域を試料加熱領域とする。図3(b)を二値化した映像を図3(c)に示す。画像中の白い領域は試料加熱領域であり、青い点は領域の重心、緑の十字中心は試料先端位置に対応する。これにより、試料先端位置を検出し、制御する。

プログラムの動作設定を図4に示す。試料が二次ノズル出口に近づく向きを正方向、二次ノズル出口から遠ざかる向きを負方向とした。ノズル出口からの距離を x とし、 $x=10\text{mm}$ (熱流束 4.25MW/m^2)を目標位置とした。そして、二次ノズル出口から試料先端の距離に

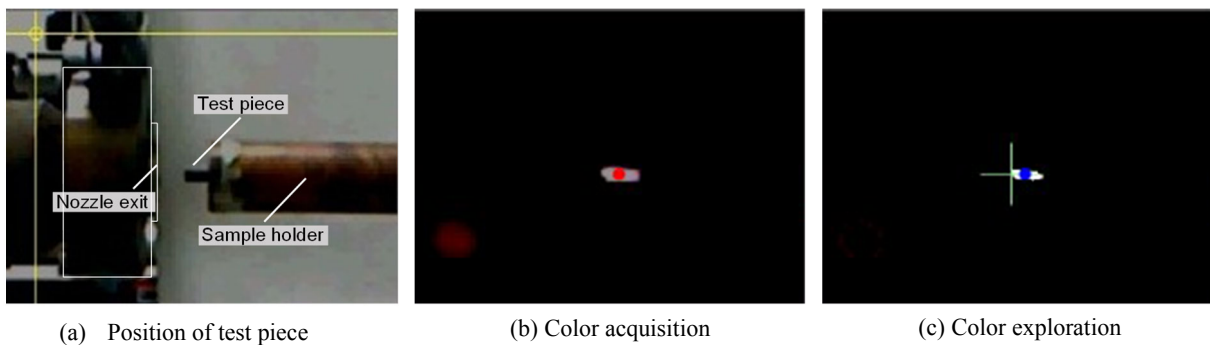


Fig. 3 Images of ablation experiments

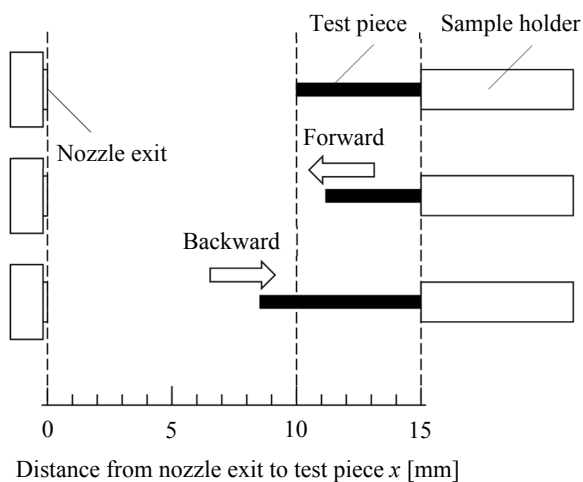


Fig. 4 Operating setting

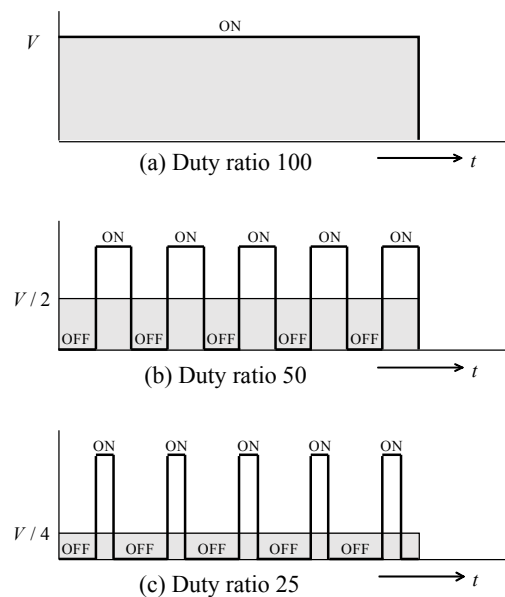


Fig. 5 PWM control method

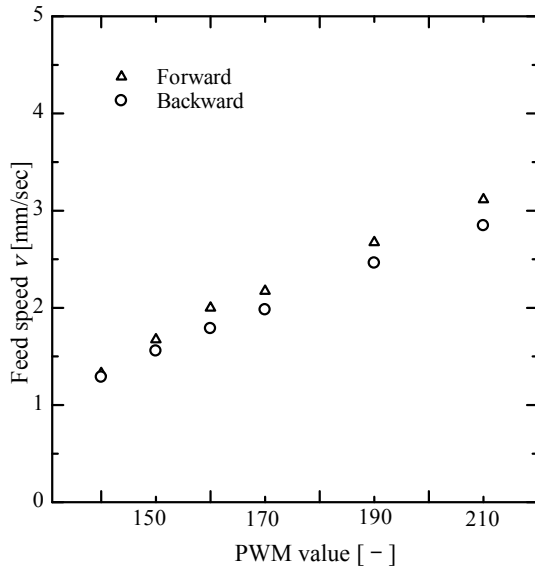


Fig. 6 Relationship between PWM value and feed speed

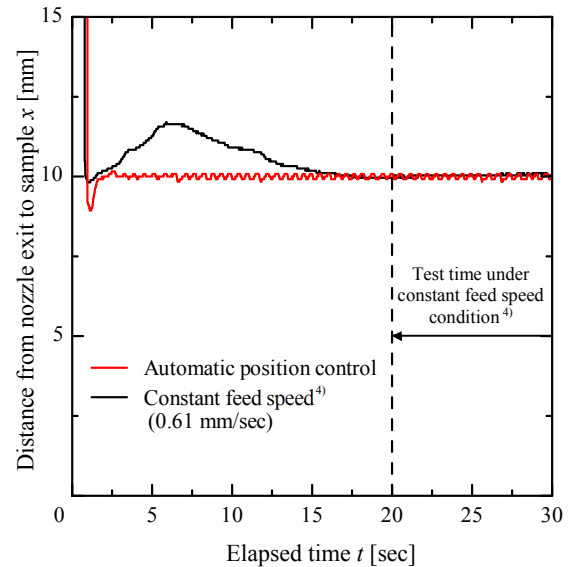


Fig. 7 Position change profile of test piece

Table 1 Operating setting of PWM value

Distance from nozzle exit to test piece x [mm]	PWM value [-]
$15.00 < x$	160 (Forward)
$11.00 < x \leq 15.00$	210 (Forward)
$10.25 < x \leq 11.00$	160 (Forward)
$10.01 < x \leq 10.25$	150 (Forward)
$9.75 < x \leq 10.01$	0
$9.55 < x \leq 9.75$	140 (Backward)
$9.35 < x \leq 9.55$	155 (Backward)
$x \leq 9.35$	210 (Backward)

応じて送り速度を調整した。送り速度の調整にはPWM (Pulse Width Modulation) 制御を用いた。PWM制御では、図5のようにデューティー比(電圧のON/OFFの割合)を変化させ、モーターに印加される平均電圧をコントロールする。デューティー比はマイクロコンピュータにより、256階調で表現されるPWM値を用いて変更する。例えば、PWM値が255の場合では、デューティー比が100となり、電源電圧がそのままモーターに印加される。また、PWM値が128の場合では、デューティー比が50となり、電源電圧の約半分の電圧がモーターに印加される。これにより電源電圧を変更することなく、マイクロコンピュータで送り速度の調整を簡便に行うことができる。PWM値と送り速度の関係を図6に示す。図6よりPWM値を高くするに従い、送り速度が速くなることがわかる。この関係をもとにプログラムの設定を行った。プログラムにおけるPWM値の設定を表1に示す。目標位置に対して試料先端位置が離れるに従い、PWM値を大きく設定することで送り速度を速くし、目標位置に到達するまでの時間を短くした。

3. 実験結果および考察

3-1 位置制御と一定速度の比較

アブレーション試験中の試料先端位置と経過時間の関係を図7に示す。横軸は経過時間、縦軸は二次ノズル出口から試料先端までの距離である。図中の赤の実線は試料先端位置を制御した結果を示し、黒の実線は、試料を一定速度(0.61mm/sec)で送った結果である。両実線に見られる加熱開始直後の下降は、加熱してから試料が赤熱するまで取得した色を探査できず時間がかかることが原因である。一定速度の場合、試験開始後は目標位置から大きく離れているが15秒経過したあたりから近づいている。それに対し制御プログラムを用いた場合は開始直後から高精度で目標位置付近に試料先端を制御できていることがわかる。

3-2 汎用ビデオカメラでの撮影

アブレーション試験中の試料の様子を図8に示す。図の上段が一定速度(0.61mm/sec)で送った場合の画像、下段が試料先端を制御した際のアブレーション試験中の試料の様子である。各画像中の左の白線が二次ノズル出口、右の白線が試料ホルダーの位置を表しており、点線が試料を送る目標位置であり二次ノズル出口から10mmである。加熱開始からの経過時間を各図の下に表記する。試験中ジェットは左側から右側に向けて噴いている。一定速度で送った場合試験開始後10秒までは目標位置よりも先端が試料ホルダー側に位置して、20秒以降は10mmに維持できていることがわかる。試料の形状変化を見ると20秒を境に先端が丸みを帯びた状態から先細な形状に変化していることが見られる。一方、位置制御システムを適用した場合、試料先端位置を定常的に目標位置10mmに維持できた。試料の形状を見ると5秒あたりから先細になっていき10秒以降はあまり変化が見られず同形状を保っていた。先端位置を制御した場合の方が一定速度で送った場合よりも先細な形状になるまでに要する時間が短かった。これは制御により先端位置が一定に維持され、高い加熱率を保ち加熱されたためだと考えられる。

位置制御システムを適用することで試料先端を一定の位置、すなわち一定の加熱率条件で試験を行うこと

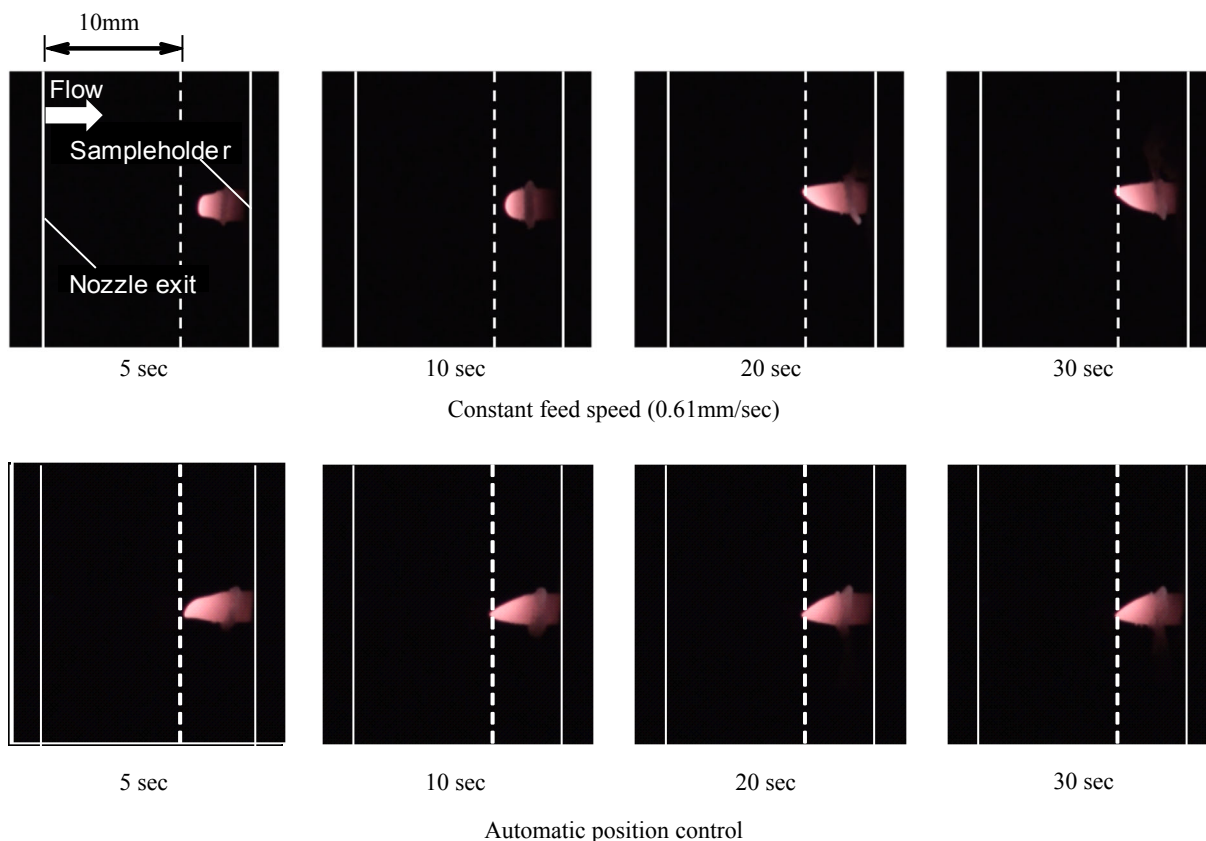


Fig. 8 Video camera images of silicon carbide ablations

ができた。今後は制御する目標位置を試験中に変更することで加熱率を変え、実際の地球大気圏再突入体の時のような非定常な加熱環境下で試験を行う予定である。

3-3 WDRカメラでの撮影

アブレーション試験中の試料の様子をWDRカメラで撮影した画像を図9、汎用ビデオカメラで撮影した試料の様子を図10に示す。図9(a)は、WDRカメラで撮影した画像、(b)は、輝度の閾値を調整した画像である。また、図10の(a)はO.D.=5.0、(b)はO.D.=3.0のNDフィルターを用い減光し撮影した。図9(a)は図10(a)と同様に試料表面の発光を飽和せずに取得できている。図9(a)では試料周囲の微弱な発光も取得できているが見えづらいため図9(b)では放射強度の閾値を調整し、試料周囲の発光を強調した。図9(b)では図10(b)で見える試料周囲の発光が確認できる。このように、WDRカメラを用いることで汎用ビデオカメラ2台を用いて撮影していた試料表面の強い放射と試料周囲の微弱な放射を1台のカメラで撮影することができる。

4. まとめ

本研究では、位置制御システムを用い、試料の表面の発光と熔融により生成される気体の観察を目的とした炭化ケイ素のアブレーション試験を行った。試料表面は著しく強く発光するのに対し、試料周囲に生成されるガスの放射は微弱なため汎用ビデオカメラを用いると同時に撮影できない。そこで著しく強い発光と微弱な放射を同時に撮影できるワイドダイ

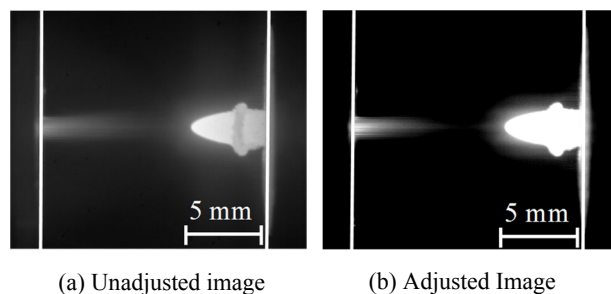


Fig. 9 Images by WDR camera

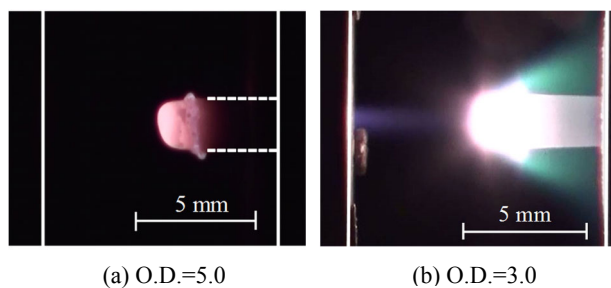


Fig. 10 Images by general-purpose video camera

ナミックレンジ (WDR) カメラで撮影し考察した。以下に主な結果を示す。

- (1) 位置制御システムの適用により、試料先端位置を経過時間によらず一定位置に制御でき、加熱率一定で試験を行えた。これにより試料先端形状は安定した。
- (2) WDR カメラを用いて炭化ケイ素アブレーションの撮影を行い、試料表面の強い放射と試料周囲の微弱な放射を同時に撮影することができた。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP25420847, JP17K06941の助成を受けた。

参考文献

- 1) Park, C., "Review of Chemical-Kinetic Problems of Future NASA Missions, I: Earth Entries," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 7, No. 3, pp. 385-398, (1993).
- 2) Tran, H. K. and Sawako P. M., "Thermal Degradation Study of Silicon Carbide Threads Developed for Advanced Flexible Thermal Protection Systems," *NASA-TM-103952*, pp. 1-11, (1992).
- 3) Funatsu, M., Ozawa, R., Shirai, H., and Takakusagi, F., "Experimental Study of Ablation Processes of SiC-based Materials in Air Plasma Freejets," *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 8, No. ists27, pp. Pe_41-Pe_46, (2010).
- 4) Funatsu, M., Konishi, K., Kawada, M., Ozawa, M., and Takakusagi, F., "Visualizations of SiC ablations in Air Plasma Freejets," *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 11, No. ists29, pp. Po_2_45-Po_2_50, (2014).
- 5) Nurul MALISA, 橋本真, 戸叶和宏, 福田健吾, 船津賢人, 「プラズマ加熱による炭素系材料の耐熱試験」, 平成28年度宇宙航行の力学シンポジウム, URI: <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/802341> (参照日 2019年10月21日), 2pages, (2016).
- 6) 矢島颯大, Nurul MALISA, 橋本真, 中里一優, 船津賢人, 「プラズマ加熱によるケイ素系耐熱材料のアブレーション試験」, 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム, URI: <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/891837> (参照日 2019年10月21日), 4pages, (2017).
- 7) Hashimoto, M., Funatsu, M., Malisa, N., Morioka, G., and Ozawa, M., "Temperature Estimations of SiC Ablations with Several Kinds of Narrow Band-pass Filters," *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 17, No. 5, pp. 561-567, (2019).