

プラズマ加熱による炭素系材料の耐熱試験

Heat-resistance Experiments of Carbon-based Materials by Plasma Heating

群馬大理工・学 Nurul Malisa
群馬大院理工・院 橋本 真
群馬大院理工・院 戸叶 和宏
群馬大工・学 福田 健吾
群馬大院理工 船津 賢人

Abstract

In our laboratory, ablation experiments of carbon-based materials have been performed systematically in air plasma freejets in order to investigate the behavior of the materials during ablation. In previous study, weight loss rates were measured when the carbon-based material, namely carbon, was heated by inserting constantly toward the plasma freejets. In this study, the ablation experiments were conducted while the position of the carbon was controlled during its ablations. The carbon ablations were also observed by a video camera with neutral density filters. As a result, it was found that the tip-position of the carbon was almost kept a target position during the ablation experiment.

1. はじめに

地球大気圏に再突入する宇宙往還機は、その前方に強い衝撃波が発生し、著しい空力加熱を受ける。このような加熱から機体を守る熱防御法の一つにアブレーション法がある。現在のアブレーション材料は炭素系材料が主流であるが、炭素系材料のアブレーション時の挙動や特性に関しては不明な点が多く、これらに関する研究は、航空宇宙分野において大変重要である。

本研究室では、空気プラズマフリージェットを用いた炭素系材料のアブレーション試験を系統的に行っている^{1), 2)}。以前の研究では、炭素系材料を空気プラズマフリージェット中に一定の送り速度で挿入し、質量損失量や質量損失速度を測定した¹⁾。しかし、加熱開始直後においては、試料形状が著しく変化するため一定の加熱条件でアブレーション試験を行うことが困難である。

そこで、本研究では、定常的に試料先端を一定位置に自動的に制御するシステムを構築し、炭素のアブレーション試験に適用した。また、試料の損耗挙動を汎用ビデオカメラを用いて観察し、以前の研究¹⁾と比較検討した。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。実験装置は、空気プラズマフリージェット発生装置、熱流束計、位置制御システムを適用した試料送り装置から構成される。空気プラズマフリージェット発生装置は内部に陰極を有するトーチと、出口直径0.7mmの一次ノズルが一体となっている。トーチ外部に陽極を兼ねた二次ノズルを設置し、一次-二次ノズル間の距離を3.0mmに設定した。この間に発生させた極小空気プラズマジェットを直径2.0mmの二次ノズル出口から噴出させることにより、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10A、放電電圧180~185V、貯気室圧力0.6MPa [絶対圧力]、雰囲気圧力は大気圧 (0.1MPa [絶対圧力]) とした。熱流束計は試料ホルダーとしての機能も兼ねており、その中に挿入した試料の先端と二次ノズル出口の距離 x を5.0mmとした。 $x = 5.0\text{mm}$ における熱流束値は 4.56MW/m^2 である¹⁾。アブレーション中の試料の観察では、ジェットの流れに

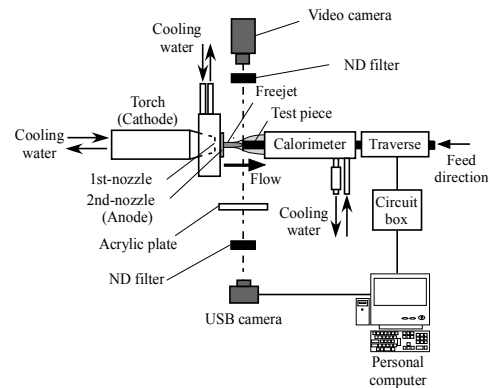


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

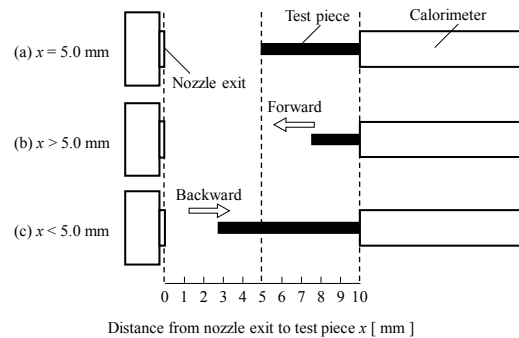


Fig. 2 Operation setting

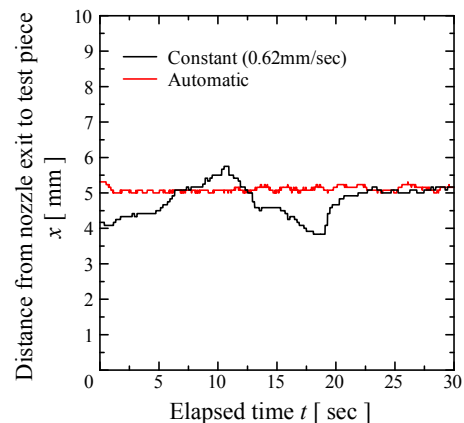


Fig. 3 Profile of distance from nozzle exit to test piece

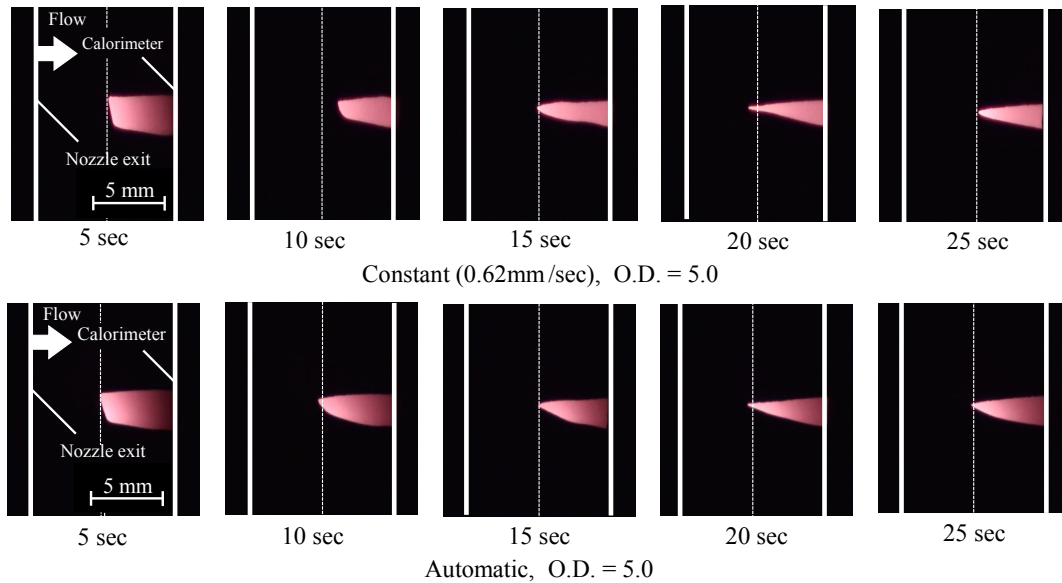


Fig. 4 Video camera images of carbon ablations

対して垂直に設置したビデオカメラを用いて撮影した。試験中の試料の発光は著しく強いため、O.D.

(Optical Density) 値が5.0のND (Neutral Density) フィルターを用いて減光した。試料は2.0mm×2.0mmの正方形断面の長さ100mmの炭素棒を用いた。位置制御システムは、試料送り装置、マイクロコンピューター、位置制御プログラムとUSBカメラから構成される。試料の観察と同様に、ジェットの流れに対して垂直に設置したUSBカメラにより取得した試料映像とパーソナルコンピューター上のプログラムから試料先端位置を捉え、試料送り装置のモーター電圧をPWM (Pulse Width Modulation) 制御により変化させ、すなわち送り速度を変化させ、試料先端位置を制御した。

本プログラムの動作設定を図2に示す。試料が二次ノズル出口側に進む向きを正方向、熱流束計側に進む向きを逆方向とし、ノズル出口から試料先端位置までの距離 $x = 5\text{mm}$ を目標位置とした。 x が5.0mmより大きい場合には正方向に、 x が5.0mm未満の場合には逆方向に試料を送るように設定した。また、 $x = 5\text{mm}$ の時にはモーターが停止するように設定した。目標位置に対して試料先端位置が離れるにしたがいPWM値を大きく設定した。これより、送り速度を制御した。

3. 実験結果および考察

図3にデータ取得開始からの経過時間と試料先端位置の関係を示す。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を示している。図中の黒の実線は送り速度を一定 (0.62mm/sec) とした場合の実験結果¹⁾であり、比較的変動が大きい代表例である。赤の実線は自動位置制御システムにより試料先端位置を制御した場合の実験結果を示している。送り速度を一定とした場合では経過時間0秒から25秒において試料先端位置が大きく変動していることがわかる。これは、試料先端位置が二次ノズル出口から離れるにしたがいプラズマフリージェットによる加熱量 (熱流束値) が変化するためと考えてい

る。一方、位置制御システムにより、送り速度を制御した場合、経過時間に関係なく目標位置付近に試料先端位置を制御できていることがわかる。

図4に加熱開始からの経過時間によるアブレーション中の試料の様子を示す。上段は試料を一定速度で送った場合、下段は試料先端位置を制御した場合の撮影画像を示している。各画像において、左の白線が二次ノズル出口、右の白線が試料ホルダー、中央の破線が $x = 5\text{mm}$ の位置、矢印はプラズマジェットの流れ方向を示している。上段の画像より、加熱開始から15秒で、試料先端部が先細な形状となることがわかる。また、試料先端位置が目標位置から変動していることもわかる。一方、下段の画像より、加熱開始から10秒で、試料先端部が先細な形状となることがわかる。また、試料先端部の形状変化が少なくなることもわかる。これは、試料先端位置をほぼ一定位置に制御できたことによるものと考えている。

4. 結論

- (1) 位置制御システムを適用することにより、プラズマ加熱により損耗する試料先端をほぼ一定位置に制御することができた。
- (2) 試料先端部はプラズマ加熱により経過時間とともに損耗し、先細な形状となる。
- (3) 試料をほぼ一定位置に制御することで、試料先端形状の変化が少なくなった。

参考文献

- 1) 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).
- 2) Funatsu, M., Konishi, K., Kawada, M., Osaza, 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).