

1E03 高エンタルピー流中の炭素系材料の質量損失速度の推算

○伊本篤司（群馬大院理工・院）， 舩津賢人， 中沢信明（群馬大院理工）

Estimations of Weight-loss Rates of Carbonaceous Materials in High-enthalpy Flows
Atsushi Imoto, Masato Funatsu, and Nobuaki Nakazawa
(Graduate School of Science and Technology, Gunma University)

Key Words : Weight-loss Rate, Ablation, Carbonaceous Material, Micro-air Plasma Freejet

Abstract

When a sample return capsule reenters the Earth’s atmosphere, it receives severe aerodynamic heating. An ablation method is one of the Thermal Protection System (TPS) that protects the capsule from the aerodynamic heating. It is important to estimate the weight-loss rates of thermal protection materials because they reduce heating by material loss mainly caused by pyrolysis reactions under aerodynamic heating. In our laboratory, we systematically estimated the weight-loss rates of carbonaceous materials in high-enthalpy flows. In this study, we constructed a measurement system to estimate weight-loss rates by the analyzed images using high-brightness LED (the wavelength is 850 nm). The weight-loss rates were estimated from the test-piece shape obtained from heating experiments.

1. はじめに

サンプルリターンカプセルが地球大気圏に再突入する際、カプセル前方には衝撃波が発生し、カプセルは著しい空力加熱を受ける。この空力加熱からカプセルを守る熱防御システム（Thermal Protection System ; TPS）の1つにアブレーション法がある⁽¹⁾。アブレーション法とは、アブレーターと呼ばれる熱防御材料の熱分解による吸熱反応や発生した熱分解ガスの境界層形成によりカプセルへの直接的な加熱を低減する方法である。今後のサンプルリターンミッションでは、カプセルの大型化が見込まれ、アブレーター重量の最適化が求められる⁽²⁾。そのため空力加熱によるアブレーターの損耗量を推定することが必要であり、すなわち単位時間あたりの損耗量を表す質量損失速度の評価が大変重要である。

本研究室では、空気プラズマフリージェットを用いた加熱試験を行い、高エンタルピー流中の炭素系材料の質量損失速度の推算を系統的に行っている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。以前の研究⁽⁵⁾では、加熱試験前後の試料の質量を測定し、その質量差から質量損失速度を推算した。地球大気圏に再突入するカプセル周りの加熱環境は時間とともに変化するため、アブレーターの質量損失速度も同様に時間変化することが予想できる。そのため、加熱試験時間全体にわたる質量損失速度の実時間計測を行う必要がある。しかし、実時間計測に必要な加熱試験中の試料の質量変化の算出はできていない。

本研究では、加熱試験中の試料形状の変化に着目し、画像処理を用いた質量損失速度を算出する計測

系の開発を行った。波長850 nmの高輝度LED照明を照射して、加熱試験中の試料形状を取得した。構築した計測系を用いて加熱試験を行い、得られた試料形状から質量損失速度の推算を行った。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。実験装置は大別して空気プラズマフリージェット発生装置部、観察部、制御システム部からなる。空気プラズマフリージェット発生装置部は、空気プラズマフリージェット発生装置、試料ホルダーで構成される。空気プラズマフリージェット発生装置部の一次ノズル部分は、内部に陰極を備えたトーチと出口直径0.7 mmの一次ノズル

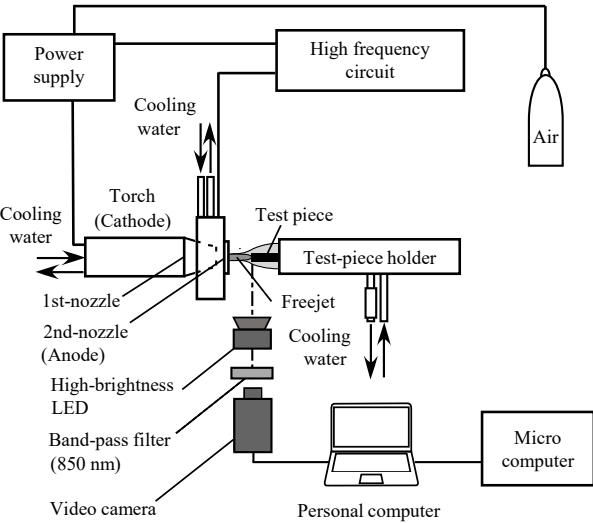


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

が一体となっている。また、外部に陽極を兼ねた出口直径2 mmの二次ノズルを設置した⁽⁶⁾。二次ノズルホルダーは内部に冷却水を流している。作動気体は空気（体積比率 $N_2 : O_2 = 79:21$ ）を使用した。一次ノズルと二次ノズルの距離は2.5 mmとし、このノズル間に発生させた極小プラズマ流を二次ノズル出口から噴出させることで、高温の空気プラズマフリージェットを得た。プラズマフリージェットの発生条件は、放電電流16 A、放電電圧 170 ± 2 V、貯気室圧力は絶対圧力で0.6 MPa、雰囲気圧力は大気圧（0.1 MPa）とした。試料ホルダーは三重円管構造であり、内部に冷却水を流している。図2に試験に用いた炭素試料の画像を示す。試料は一辺2 mmの正方形の断面形状を持つ炭素の角棒を用いた。

観察部は汎用ビデオカメラをジェット噴出方向に対して垂直に設置した。以前の研究⁽⁷⁾で、空気プラズマフリージェットの発光は短波長側で支配的であることがわかっている。そこで、赤外領域の波長850 nmをもつ高輝度LED（Light Emission Diode）照明を試料に対して垂直に設置し照射した。またこの波長に対応する850 nmの狭帯域フィルターを試料に対して垂直に設置し、これを介した汎用ビデオカメラで、加熱試験中の試料を撮影した。

制御システム部は汎用ビデオカメラ、PC上の制御プログラム、マイクロコンピュータから構成される。PC上の制御プログラムは、汎用ビデオカメラからPCに転送された画像に対して処理を行った。図3はPC上に表示される赤熱した試料を画像処理した画像である。画像左上を原点として、 x, y 方向にそれぞれ走査し、敷居値内のピクセル座標を取得した。ここで、加熱時の試料表面の赤熱の色をもとに敷居値を



Fig. 2 Test piece (carbon)

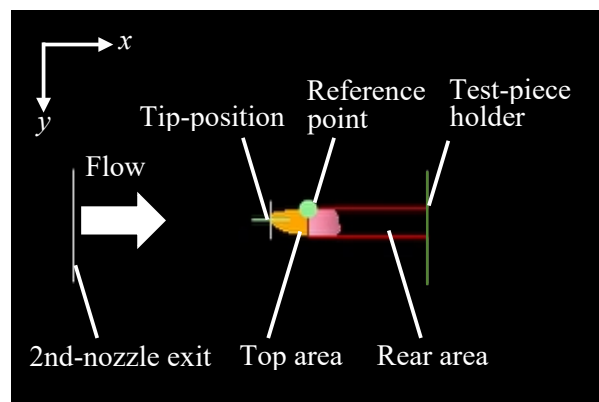


Fig. 3 Schematic view of analyzed image

設定した。これは形状が変化する試料形状を検知するためである。二次ノズル出口（白色の実線）から試料ホルダー（緑色の実線）までの間において、 x 座標が最小のピクセル、すなわち敷居値内のピクセルのうち一番左の x 座標を試料先端位置（緑色の十字線）とし、同領域内で y 座標が最大のピクセルの x 座標を基準として参照点（緑色の丸）とした。参照点は試料上部に示し、その前方の敷居値内の領域を試料先端（オレンジ色）とした。試料後方（赤枠）は形状変化していない試料とし、敷居値外のピクセルを黒色にした。赤枠内のピンク色の領域は試料先端を除いた敷居値内のピクセル、すなわち加熱試験中の試料表面の色である。また、白色の矢印はジェットの流れる方向を示している。敷居値内のピクセルの座標値より試料

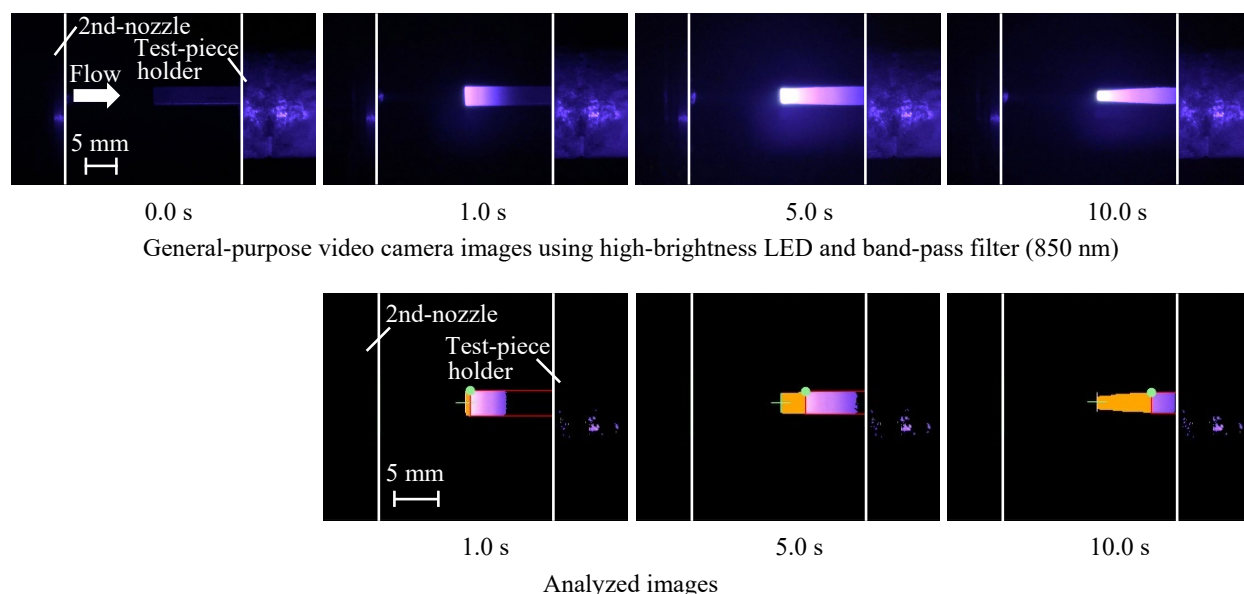


Fig. 4 Images of ablation experiment with high-brightness LED

の体積を求め、質量損失速度を推算した。

3. 実験結果および考察

3-1 加熱試験中の試料損耗挙動

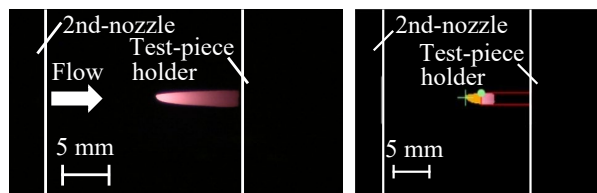
図4に高輝度LED照明を照射し撮影した試験時間10秒の炭素加熱試験の汎用ビデオカメラ画像を示す。図は動画から切り出した静止画像である。上段はビデオカメラ画像、下段はPC上に表示される画像処理を行った画像である。ビデオカメラ画像は高輝度LED照明を照射し、850 nmの狭帯域フィルターを介して撮影した。図中の左の白色の実線は二次ノズル、右の白色の実線は試料ホルダー端面、白色の矢印はジェットの流れる方向を示している。上下段の画像下の時間は加熱開始からの経過時間である。

図4上段より、加熱試験中の試料は徐々に先細な形状に変化していることがわかる。加熱開始0.0秒に着目すると、加熱開始前から二次ノズル、炭素試料、試料ホルダーが確認できる。加熱開始1.0秒に着目すると、試料先端は赤熱しているが試料後方は赤熱していない。また、試料周りに微弱な発光がみられる。加熱開始10.0秒に着目すると、試料先端から後方へかけて形状変化がみられ、試料の赤熱がみられた。汎用ビデオカメラ画像を画像処理した図4下段より、加熱開始1.0秒に着目すると、試料先端位置を検出し、試料の概形をとらえることができている。また試料ホルダーより右側で敷居値内のピクセルがみられるが、走査した範囲より外のピクセルであるため、オレンジの領域から除外されていることがわかる。加熱開始10.0秒に着目すると、図の上段でみられた試料後方までの形状変化を検出できていることがわかる。

図5に以前までと同じ高輝度LED照明を照射せず撮影した加熱試験時間10.0秒での炭素加熱試験のビデオカメラ画像を示す。図は動画から切り出した静止画像である。左はビデオカメラ画像、右はPC上に表示される画像処理を行った画像である。試料からの著しい発光を減光フィルター（O.D.=5.0）で減光し、試料に対して垂直に設置し撮影した。図中の白線、白色の矢印および画像下の時間は図4と同様である。図5左より、試料は先細な形状になっており、先端から後方まで形状が変化していることがわかる。しかし、図5右より、形状変化する試料後方まで概形を取得できていないことがわかる。図4下段の加熱開始10.0秒では、形状変化する試料後方まで試料を検出できており、形状変化する試料先端をより広い範囲で検出できている。

3-2 質量損失速度の推算

高輝度LED照明を用いた加熱試験の静止画像から、加熱試験時間10.0秒での質量損失速度を推算する。



General-purpose video camera (O.D. = 5.0) Analyzed image
Fig. 5 Images of ablation experiment with ND filter

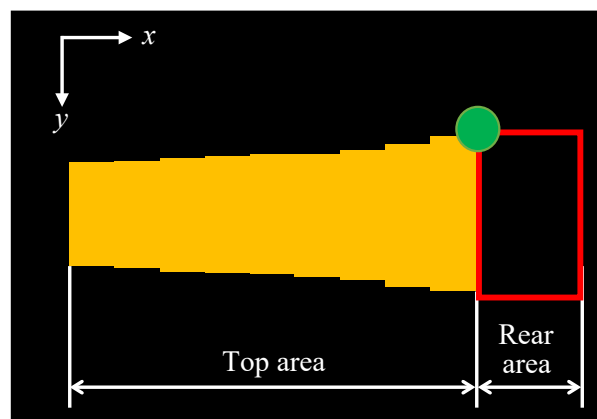


Fig. 6 Image of volume calculation method

試料は形状変化する試料先端部と形状変化しない試料後方部に分けてとらえ、それぞれの試料形状から体積を推算した。図6に体積算出方法のイメージを示す。試料先端部の体積は円柱の組み合わせと仮定し、ピクセルごとに分割して体積算出を行った。試料後方部の体積は角棒形状として体積算出をした。それぞれで求めた試料の体積と炭素のかさ密度 $1.84 \times 10^{-2} \text{ g/mm}^3$ から質量 $W_{\text{after}} [\text{g}]$ を推算した。さらに、加熱開始時の質量 $W_{\text{before}} [\text{g}]$ と推算した質量の差（質量損失量）を加熱時間 $t [\text{s}]$ で割ることで、質量損失速度を得た。質量損失速度 $\dot{W}_{\text{loss}} [\text{g/s}]$ は式(1)で与えられる。

$$\dot{W}_{\text{loss}} = (W_{\text{before}} - W_{\text{after}}) / t \quad \cdots(1)$$

以上より、加熱試験開始前と加熱試験後の試料の質量の差から、形状変化する試料の質量損失速度を得た。式(1)をもとに画像処理した画像から推算した加熱開始から加熱時間10.0秒における質量損失速度は $3.66 \times 10^{-3} \text{ g/s}$ であった。

4. まとめ

本研究では、加熱試験中の試料形状の変化に着目し、画像処理を用いた質量損失速度を算出する計測系の開発を行った。波長850 nmの高輝度LED照明を照射して、加熱試験中の試料形状を取得した。構築した計測系を用いて加熱試験を行い、得られた試料形状

から質量損失速度の推算を行った。以下に主な結果を示す。

- (1) 高輝度LEDを照射することで、加熱開始から終了まで試料全体の概形を撮影することができた。
また、画像処理を行った画像でも形状変化する試料形状をとらえることができた。
- (2) 推算した質量損失速度は 3.66×10^{-3} g/sであった。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K04915, JP24K07880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,” *J. Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 7, No. 3, pp. 385-398, (1993).
- (2) 山田和彦, 「将来の太陽系探査にむけたサンプルリターンカプセルの研究開発」, 日本機械学会2018年度年次大会講演論文集, F191006, 5 pages, (2018).
- (3) Matsuoka, Y., Oya, Y., and Funatsu, M., “Ablation Experiments of Porous Carbon-based Heat-resistant Materials in High-enthalpy Air Plasma Freejets,” *Proc. 33rd Int’l Sympo. Space Technology and Science*, 2022-e-03.pdf, 6 pages, (2022).
- (4) 矢島颯太, 大屋祐輝, 半田圭佑, 船津賢人, 「異なる加熱率条件下におけるケイ素系耐熱材料のアブレーション試験」, 2020年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1-B1-3.pdf, 4 pages, (2021).
- (5) 小澤正裕, 船津賢人, 白井紘行, 高草本文雄, 「プラズマフリージェットによる炭化ケイ素系材料のアブレーション試験ーアブレーション材料の微視的観察ー」, 平成20年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 17-C-2-2, pp.127-130, (2009).
- (6) Kaneda, T., Funatsu, M., Uoya, K., and Shiraishi, S., “Heating Experiments of Resin-impregnated Porous-carbon Materials under High Heating-rate Conditions,” *J. Evolving Space Activities*, Vol. 2, No. 144, pp. 1-6, (2024).
- (7) 久保田聖, 船津賢人, 白井紘行, 田部井勝稲, 「大気圧空気マイクロプラズマフリージェットの分光学的測定」, 日本機械学会論文集 (B編), 71巻, 707号, pp. 1,806-1,812, (2005).