

画像処理に基づいた高粘性一液推進剤の微粒化現象の時空間分解

伊東山 登^{*1}, 佐藤 寛^{*2}, 伊藤 尚義^{*3}, 勝身 俊之^{*3}, 松岡 健^{*2}, 笠原 次郎^{*1}

Time-Space Resolution of the Atomization phenomena of Viscous Monopropellant Based on Image Processing

ITOUYAMA Noboru^{*1}, SATO Tomoki^{*2}, ITO Hisayoshi^{*3}, KATSUMI Toshiyuki^{*3}, MATSUOKA Ken^{*2} and KASAHARA Jiro^{*1}

ABSTRACT

The atomization of monopropellants is an essential factor to attain their reliable and rapid ignition. High energetic material-based monopropellants have higher viscosity than conventional one, hydrazine. The property affects to the difficulty of effective atomization. Focusing on SHP163, a high energy monopropellant, our group has experimentally investigated the atomization mechanism based on high-speed camera observation and the image processing. The present study would like to introduce the outline of our activity, the methodology of the image and considerations obtained through such activities.

Keywords: green monopropellant, hydroxylammonium nitrate, atomization, image processing

1. はじめに

高エネルギー物質を用いた一液推進剤 (High Energetic Green propellants, HEGPs と表記) は、低毒性・高密度比推力が期待されることから 1~20 N 級を中心に、小型スラスタシステムへの適用が広く検討されてきた¹⁾。中でも HEGPs の点火・着火はスラスタの応答遅れに直結するため、スラスタが搭載される衛星のミッション精度に影響を与える。このような背景から、HEGPs に限らず一液推進剤の点火・着火はスラスタ設計における重要な技術の一つである。

一液スラスタで最も広く使用される点火器としては触媒点火器である。これは推進剤と触媒との物理的接触を起点に、推進剤が触媒表面上で発熱分解や燃焼反応を起こすことで、高温高压のガスを発生させる機構になる。応答性が良く、再現性の高い HEGPs の点火を達成するには、推進剤が触媒上で効率よく熱分解・燃焼することが重要となる。そのためには、推進剤を噴霧・微粒化し、比表面積を向上させることで、熱伝導や対流熱伝達を促進させることが欠かせない。

前述する HEGPs は少量の水に高エネルギー物質を溶かしたようなものが多く、従来の一液推進剤と比較してエネルギー密度 (≒熱分解で放出するエネルギー量と液密度の積) が高い特徴がある一方、粘性が 10 倍以上高いことが知られている。そのため、慣性力と粘性力 (≒レイノルズ数)、慣性力と表面張力 (≒ウェーバー数)、粘性力と表面張力 (≒オーネゾルゲ数) の比といった、微粒化を支配する無次元パラメータが変化するため、精度かつ効率の良い微粒化の達成には微粒化を支配する要素の体系的整理が求められる。

以上の背景より、筆者らのグループでは、HEGPs の一つである SHP163 の効率的微粒化を支配する物理的パラメータの洗い出しを目的に、旋回流式インジェクタを用いた SHP163 の噴霧を行い、ハイスピードカメラを用いた観察を実施してきた^{2),3)}。当該研究では噴霧広がり角や液柱の破壊距離 (break-up point) 等に注目し、噴霧環境圧や SHP163 への揮発性物質の添加、供給圧と噴霧環境圧の差 (pressure drop) がこれらパラメータに与える影響について実験的に整理した。しかしながら、当該研究³⁾における結果・考察では簡易的な取扱として、ある時点での画像を用いた。これらの値の妥当

* 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

^{*1} 名古屋大学 未来材料・システム研究所
(Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University)

^{*2} 名古屋大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
(Department of Aerospace Engineering, Nagoya University)

^{*3} 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻
(Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

性を裏付けるには、ハイスピードカメラ記録時間中、少なくとも定常に推進剤噴霧がなされていた時間での平均値で議論する必要がある。また、ハイスピードカメラの記録から、噴霧体の一定周期で脈動する様子が観察された。この脈動は流体的不安定性に起因し、微粒化を特徴づける可能性がある。つまり、微粒化現象の時空間分解が有効である。

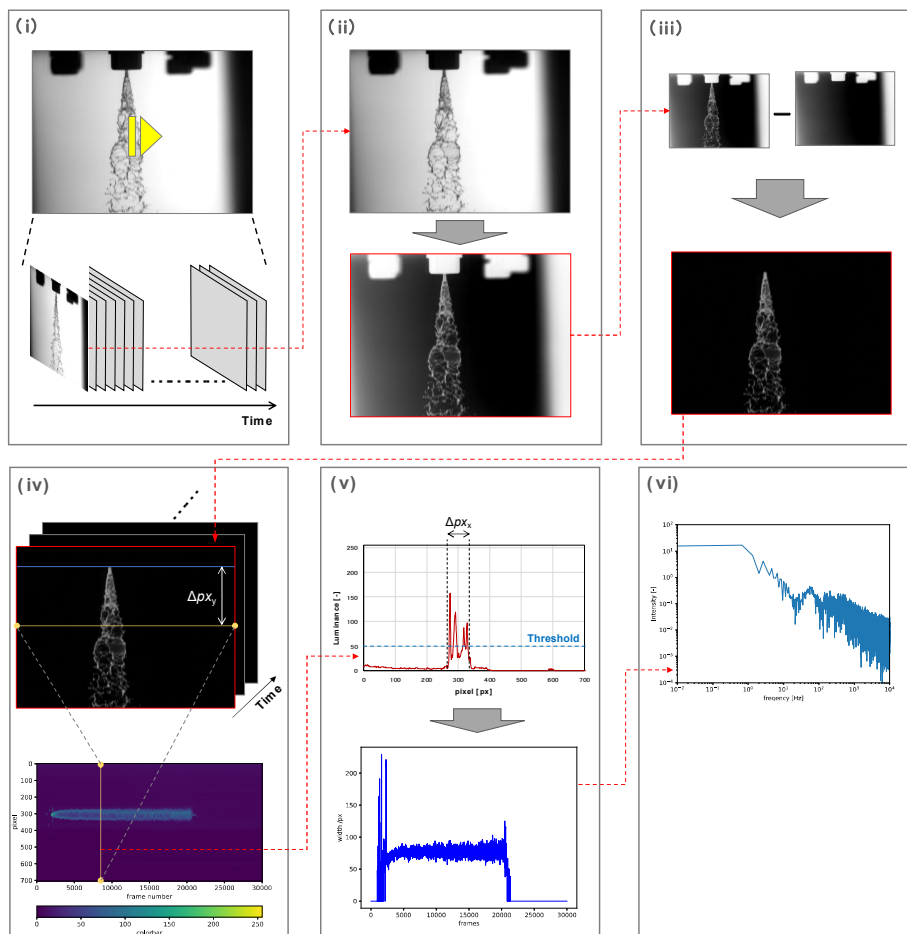
本研究グループでは、既報のハイスピードカメラの観察結果に対して画像解析手法を導入することで、噴霧体の脈動をはじめとする微粒化特性に対する考察を現在進めている。本稿ではその手法や結果、現在までの考察などを紹介する。

2. 実験系と解析手法

本実験の詳細については既報³⁾を参照いただきたい。本実験では推進剤押し圧と環境圧（噴霧先の初期圧力）の差分から計算される Pressure drop を 0.7MPa に固定し、バックライトとハイスピードカメラ（SA5, Photron, 20,000fps, 704×520 pixel）を用いて、環境圧を複数変更した場合の SHP163 の噴霧状態を観察した。インジェクタには旋回流式インジェクタ（B1/8HH-SS1 SUS303, Spraying Systems Co.）を用いた。

ハイスピードカメラから得られた記録動画に対して、以下に示す 6 ステップの画像解析を実施し、微粒化状態の時空間分解を図った。図 1 に実際の処理流れの概略図をまとめる。なお一連の画像処理には、python 3.9.1, OpenCV 4.5.5, Numpy 1.21.4, Scipy 1.7.3 を用いた。噴霧幅の同定には、ヒストグラム閾値を 50 に設定した。

- (i). 動画の画像連続化
- (ii). 画像の白黒反転
- (iii). 処理(ii)で得られた画像のバックグラウンド補正
- (iv). 処理(iii)で得られた画像群に対する特定の画像 y 位置における画像 x 方向のヒストグラム取得、および時間-ピクセルヒストグラムのコンター図の作成
- (v). 閾値判定に基づいた噴霧幅の同定、および時間-噴霧幅の時間履歴図の作成。（(iv)で指定した y 位置がインジェクタ～検出部の距離になるため、三角関数を用いて広がり角の導出が可能）
- (vi). 時間-噴霧広がり角プロットに対して、高速フーリエ変換を行い、振幅スペクトルを導出。



第 1 図. 画像処理のフロー図.

3. 結果および考察

図2に環境圧 100 kPa.abs および 20 kPa.abs における SHP163 の噴霧試験の解析結果を示す。(i)の噴霧開始後 0.5 s 自転の画像を比較すると、環境圧の違いにより噴霧の状態が異なることがわかる。また、噴霧体の外側部に注目すると、100 kPa.abs 条件では、噴霧軸方向に進むにつれて強い流体的な乱れが見られるが、20kPa.abs 環境では比較的乱れが少なく側部から見て扇状に近い形状で噴霧されていることが見受けられた。

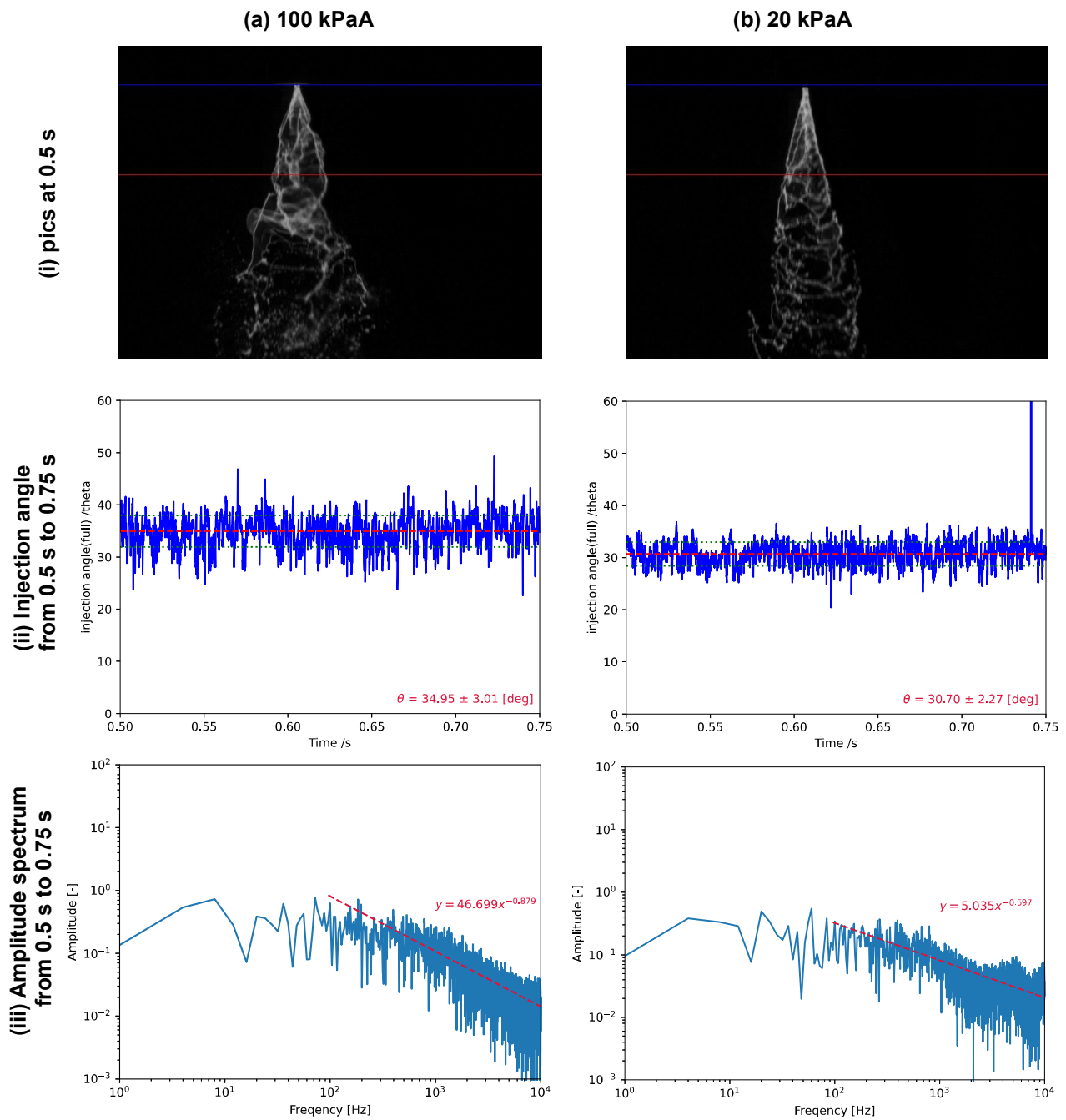
つづいて、図2中(ii)に示す噴霧角の時間履歴に着目する。赤破線のプロットが噴霧開始後 0.5 s から 0.75 s までの平均値、緑点線・黄色で塗られた領域が平均値を中心とする標準偏差の範囲 (1σ) に相当する。噴霧開始後 0.5 s から 0.75 s を対象とした理由は、質量流量計測や圧力履歴からこの領域が定常状態の噴霧が進行していると判断されたためである。各図右下に示す平均値および 1σ を比較すると、環境圧 100 kPa.abs における噴霧角と標準偏差はどちらも環境圧 20 kPa.abs の結果よりも大きくなる傾向になった。標準偏差は対象値の分散の度合いを示すため、この値は前述する時間的な脈動を特徴づけるパラメータといえる。また、環境圧 100 kPa.abs での噴霧では噴霧角および標準偏差の値が環境圧 20 kPa.abs よりも大きくなる傾向は、図2中(i)の画像比較から見出された流体的な乱れの大小の関係とも一致する。

脈動の大きさについては標準偏差で議論できうる可能性がわかるが、その周期性も微粒化を増進する流体的不安定性を議論する上で重要である。そこで、特定の時間範囲における噴霧角の時間履歴に対して、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を施すことで、周波数スペクトルを導出した。図2中(iii)に、噴霧開始後 0.5 s から 0.75 s の噴霧角の時間履歴に対する FFT 処理結果として、各々の条件の周波数スペクトルを示す。本処理では、データ数が 5000 点、データの時間分解能が 500 μ s であった。そのため、周波数スペクトルの周波数分解能は 4 Hz、周波数の検出限界は 10,000 Hz であった。低周波領域に注目すると、環境圧 100 kPa.abs では 8 Hz 前後、環境圧 20 kPa.abs では 12 Hz 前後が最大の振幅強度となった。高周波側はどちらも周波数増加とともに振幅強度の減少傾向が観察された。この減衰傾向は環境圧で明確に異なっており、環境圧 100 kPa.abs の条件の方が強い減衰傾向が確認された。流体的不安定性は波動的に近似されることが多く、周波数とその伝播を特徴づける。周波数スペクトルの違いが確認されたことから、定常領域の特定波形の周波数解析も微粒化画像の時空間分解の有効な手立てとして活用できる可能性がある。

以上のように、ハイスピードカメラから得た連続画像を起点とする各種画像解析と時空間分解により、環境圧の違いによる SHP163 の微粒化の程度の差を数値的に評価するに至った。より環境圧が低い実験条件では、物質の拡散係数が大きくなることや液体の蒸発速度が大きくなることで、噴霧角や微粒化の度合いは大きくなることが予想されるものの、実際の結果はそれとは反する傾向を示した。既往研究を参照し、この要因について簡単に考察してみる。本グループの既往研究ではウェーバー数ではなく、レイノルズ数ないしはオーネゾルゲ数による微粒化の臨界領域の定義が有効である可能性を報告した²⁾。これは、微粒化に粘性力が強く効いているということである。静止した流体上を一定速度で動く物体を想定する場合、粘性は速度勾配との相互作用により、流れ場の滑り面に対してせん断応力を発生させる。このせん断応力は流体側と物体側の両方に働き、それぞれのベクトル方向は対向する形となる。これに倣って、一定圧の気体中に SHP163 が噴霧された場合を想定すると、気液境界面では静止した気体を一定速度の噴霧体が動かすこととなる。その際に発生するせん断応力は気体の粘性係数と速度勾配の積で表現されるが、速度勾配が圧力に対して大きく変化しないと仮定すると、せん断応力は粘性係数に比例する。粘性係数は圧力低下に従って減少していくため、せん断応力も圧力減少に従って減少していく。結果、図2(i)に示すとおり、噴霧体初期の液柱や液膜が積極的に破壊されず、噴霧体側部の不安定性が強く発現しなかったと考えられた。つづいて、環境圧変化に対する噴霧角の変化について考察する。複数の噴射孔から成るインジェクタを用いた液体噴霧では、ある噴射孔から射出された噴霧体が別の噴射孔から射出された噴霧体と衝突し液膜・液柱を再形成、この際に周囲気体を巻き込み、液で閉じ込められた気体が液噴霧同等の速度を持つことで静圧が当初の環境圧より低くなることで、環境圧から押されて噴霧角が小さくなること⁴⁾が報告されている。前述したとおり、せん断応力が低下することで、噴霧体同士の再結合後の液膜・液柱の破壊は起こりづらくなり、閉じ込められた環境気体の動圧上昇とこれに伴う静圧低下が発生する。これによる噴霧角の狭小化が発生した可能性が示唆された。しかしながら、本考察については十分な議論に至っていない。今後の追加実験や理論的な解釈が重要となる。

4. まとめ

本稿では、高粘性の一液推進剤の効率的な微粒化達成に向けた、微粒化現象の時空間分解手法の例を概説し、最近の結果例と考察をまとめた。当該手法および得られた結果は SHP163 の旋回流式インジェクタを用いた微粒化の支配要素を整理する有用なツールやデータとして活用できる可能性がある。また、同様の画像解析手法を展開することで、今回議論を行った噴霧角だけでなく、break-up point の特定などが期待できる。ただし、本稿で述べた考察などはまだ検証が不十分であるため、今後の追加実験や数理的な解釈の充実が求められる。



第2図. 微粒化画像の解析結果. (a) 環境圧 100 kPa.abs, (b) 環境圧 100 kPa.abs,
 (i) 噴霧開始後 0.5 s における微粒化の様子, (ii) 噴霧開始後 0.5 s~0.75 s における噴霧角の時間履歴, (iii) (ii) の FFT 解析結果.

謝 辞

実験の実施にあたり、長岡技術科学大学 早田和義氏の支援を頂いた。本解析の実施には、名古屋大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 澤田悟氏のご協力を頂いた。この場を借りて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) R. Masse, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 2016-4577 (2016).
- 2) 伊藤尚義, 黒田彬斗, 尾松来基, 半澤佳祐, 勝身俊之, 門脇敏, 高エネルギー物質研究会令和4年度報告書, JAXA-RR22-006, pp.25-28 (2022).
- 3) H. Ito, Proc. 34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023-a-52 (2023).
- 4) S. Wu, S. Yang, M. Wooldridge, M. Xu, Fuel, 242, pp. 109-123 (2019).