

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820407

研究課題名(和文)軌道上輸送技術高度化に向けたマイクロジェット噴射による微粒化促進手法の開発

研究課題名(英文)Development of Enhancement Technique of Impinging Atomization by Microjet Injection for On-orbit Transportation System

研究代表者

井上 智博(Inoue, Chihiro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・特任准教授

研究者番号：70466788

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):人工衛星の長寿命化や軌道間輸送技術の構築にあたって、広範な作動条件下における宇宙機エンジンの高効率運転を実現する必要がある。そこで、人工衛星用エンジンに多用される、二液を衝突させて微粒化を行う方式の推進薬噴射装置を対象に、液体に対して約1%質量流量程度の微量の気体噴射を付加する新たな微粒化促進方式を提案し、その効果を実験によって実証するとともに、開発した数値解析手法を適用することで、微粒化促進機構を解明した。さらに、最適な微量気体噴射条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文):For the development of spacecraft engines on orbit, it is required to realize highly efficient operations in wide conditions. Impinging atomization, which has been widely utilized in liquid rocket propulsion systems, is able to produce fine drops at a rated operation. In contrast, however, the atomization characteristics deteriorate under off design conditions when injection velocity comes to be slower. In the present study, an effective technique is verified utilizing small amount of gas injection at off design operation. To clarify the flow field and the mechanism of the effectivity, experimental visualizations, drop size measurements and corresponding numerical analyses are carried out. It is elucidated that atomization is drastically promoted when the dynamic pressure of gas overcomes that of liquid at the impingement point. In addition, the optimized atomization efficiency is clearly presented.

研究分野：航空宇宙推進学

キーワード：宇宙化学推進 推進薬噴射 液体微粒化 マイクロジェット 実験 数値解析

1. 研究開始当初の背景

地球周回軌道から地上を観測し、また、地球以外の惑星や衛星へと自在にアクセスできる高度な宇宙利用技術を獲得するためには、地上から軌道上、さらには、軌道上での輸送技術は根源的に重要である。近年、地上から軌道上への宇宙輸送技術は成熟の一途をたどっている。次の段階として、軌道上の人工衛星の長寿命化、そして軌道と軌道との間の宇宙機の移動といった宇宙空間における輸送技術がいっそう重要になると考えられる。

現在、地球周回軌道上の人工衛星は、液体推進薬が枯渇すると寿命を迎える。従って、人工衛星を長寿命化するにあたっては、可能な限り高効率な（比推力が高い）エンジンを搭載することが求められる。人工衛星用エンジンの特徴として、推力を定常的に得る定格作動と、間欠的に推力を発生させるパルス作動の両者を行う点が挙げられる。こうした幅広い作動条件で、高比推力を実現させるためには、推進薬を速やかに微粒化し、燃焼を行う必要がある。しかしながら、特に推進薬の噴射開始・停止時には、推進薬を低速で噴射することを避けられず、微粒化は必然的に悪化し、比推力が大幅に低下する場合があります。パルス作動を主に行う軌道上で致命的な問題となる。そこで、人工衛星の長寿命化や軌道間輸送能力の向上にあたって、広範な噴射条件下で推進薬の良好な微粒化を達成することは、解決すべき技術的課題として認識されているが、有効な手立ては存在しない。

2. 研究の目的

こうした背景を踏まえて、応募者は、人工衛星用エンジンに多用される、二液を衝突させて微粒化を行う二液衝突微粒化方式(図1)の推進薬噴射装置を対象として、推進薬を定常的に低速で噴射する場合においても良好な微粒化を達成可能な、新たな微粒化促進方法を独自に提案・実証した(図2)。具体的には、二液衝突点に、液体に対して約1%質量流量の微量の高速気流(マイクロジェット)を吹付けることで、平均粒径(SMD)が約1/10になるなど、著しい微粒化促進効果を得ることに成功した。

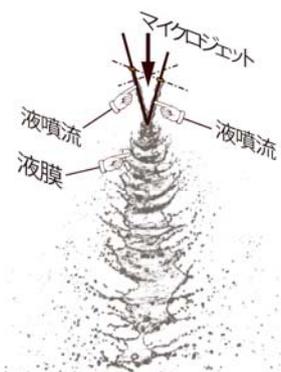
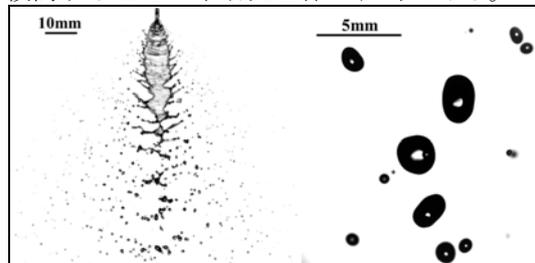


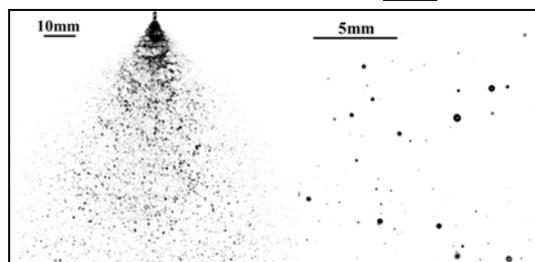
図1 二液衝突微粒化

次の段階として、人工衛星エンジンの非定格作動をも想定して、液体をパルスのように噴射した場合などでも、マイクロジェット噴射による微粒化促進効果を明らかにする必要がある。

そこで、人工衛星の様々な作動条件を想定して、マイクロジェット噴射を利用した微粒化促進方法の効果を実証するとともに、微粒化促進機構を解明し、実機への搭載可能性を検討することが本研究全体の目的である。



(a) マイクロジェットなし



(b) マイクロジェットあり

図2 マイクロジェット噴射による微粒化

3. 研究の方法

本研究では、マイクロジェット噴射による微粒化促進効果を実証し、流れの詳細を理解するために、実験と流体数値解析の両者を実施する。

まず、平成25年度は、マイクロジェット噴射の効果を、図3の試験装置を用いて、可視化と粒径計測により調査する。対応する流体数値解析を実施し、微粒化促進機構の解明を目指す。

次に、平成26年度は、マイクロジェット噴射条件を、噴射時間、噴射速度、噴射孔径等について様々に変化させて、最適なマイクロジェット噴射条件を実験により探索する。また、微粒化特性予測に向けた、流体数値解析手法を構築することを目指す。あわせて、実機適用に向けた指針を検討する。

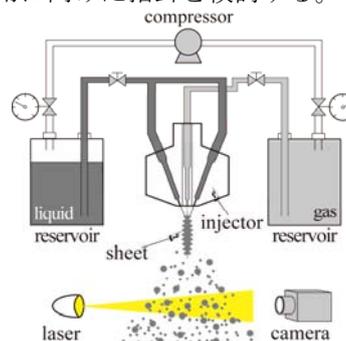


図3 実験装置外観

4. 研究成果

(1) 微量気体噴射による微粒化促進試験

マイクロジェット流量を変化させたときの微粒化過程と噴霧の可視化結果を、図4に示す。液体に対する気体の流量比 $\phi=0.0\%$ の場合は、二液衝突、液膜形成、液糸伸長、液糸分裂という段階を経て微粒化する。 $\phi=0.5\%$ のときは、 $\phi=0.0\%$ と比べて液膜変形が顕著であり、液膜が短い。さらに気体流量が増し、 $\phi=1.0\%$ 以上になると、 $\phi=0.5\%$ までとは大きく異なることがわかる。 $\phi=1.0\%$ のとき、二液衝突に伴う液膜は明瞭には認められず、衝突点近傍で瞬時に液滴が生成され、著しく微粒化が促進される。 $\phi=1.5\%$ の場合には、下流で二次的に分裂する液滴が増加し、更に微細な噴霧が実現される。

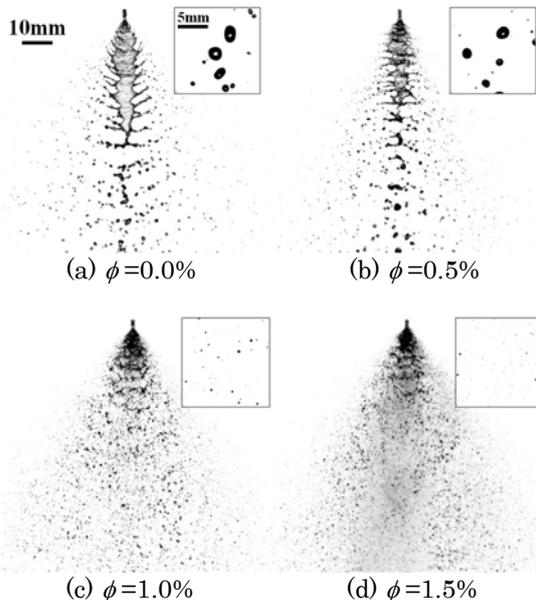


図4 マイクロジェット流量を変化させたときの衝突微粒化の可視化試験結果

続いて、粒径分布の計測結果を、図5に示す。ここでは、個数基準累積分布の99%までを示した。 $\phi=0.0\%, 0.5\%, 1.0\%, 1.5\%$ の場合を比べると、 $\phi=0.5\%$ 以下に比べて、 $\phi=1.0\%$ 以上では微細液滴の頻度が急増し、粒径の分散が遥かに狭い。この傾向は、図4の噴霧画像と定性的に一致する。以上より、 $\phi=1\%$ 程度の気体噴射を行うことで、衝突微粒化が著しく促進されることが明らかになった。

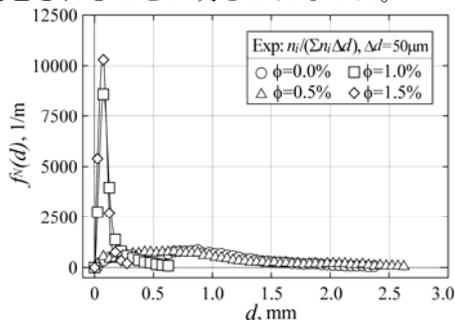


図5 マイクロジェット流量を変化させたときの粒径分布

(2) オイラーラグランジュ連成数値解析

マイクロジェットを噴射した場合の、液膜および液滴挙動を明らかにするために、液体噴射から噴霧流動をシームレスに取り扱える数値解析手法を開発した。具体的には、設定した固定格子において、気体と液体をオイラー的に解析する。二液が衝突して形成された液膜から離脱した液塊を、質点近似した液滴粒子に変化させ、ラグランジュ的に追跡した。

解析結果の一例を、図6に示す。マイクロジェット噴射以前の時刻 $t=0.0\text{ms}$ において、平滑な液膜が形成されている。同時刻からマイクロジェットを噴射開始すると、 $t=0.4\text{ms}$ 以降から、液膜形状が次第に崩れ始め、微粒化が促進される様子を確認することができる。こうした現象は、気流全圧が液噴流の全圧を上回ると生じる。

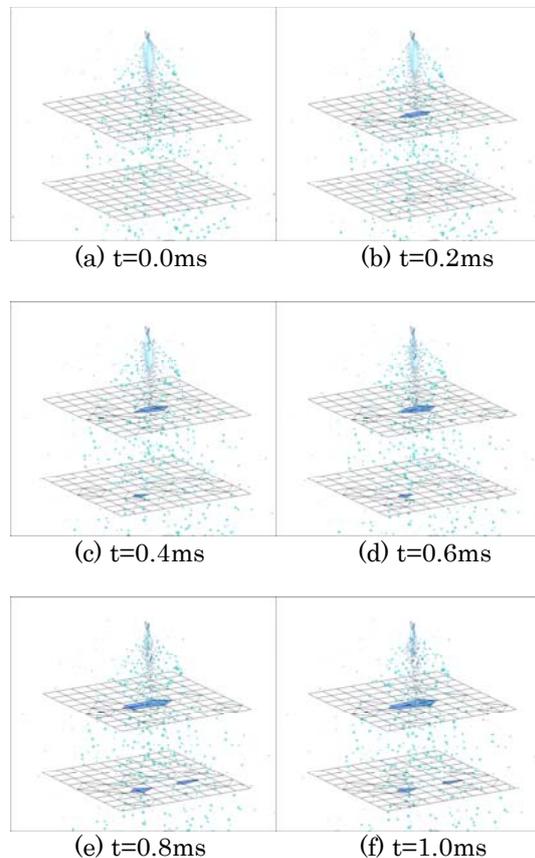


図6 マイクロジェットを噴射したときの液膜崩壊の数値解析結果

(3) マイクロジェット噴射条件の最適化

実機では、少ない気体流量で効率的に微粒化を促進する必要がある。そこで、系に流入したエネルギーに対する、液体の表面自由エネルギーおよびラプラス圧の増加割合を表す微粒化効率 η_σ を導入し、微粒化効率を最大化する気体噴射条件を明らかにした。実験結果をもとに算出した微粒化効率を、図7に示す。いずれの液体噴射条件(ウェーバー数)においても、気液流量比に対する傾向は同様

である。 $We_L=500$ において、 $\phi=0.0\%$ の場合には $\eta\sim 0.2\%$ である。 $\phi<0.6\%$ の気体噴射では、投入運動エネルギーが増加するにもかかわらず、平均粒径(SMD)が大きくなるため効率は下がる。しかし、更に気体流量を増すとSMDが急激に小さくなって効率は上昇し、 $\phi=1.5\%$ で最大微粒化効率に達する。その後、一層気体流量を増やしても、SMDは一定であるから、効率は単調に低下する。 $We_L=150$ および $We_L=1800$ の場合も同様に、 $\phi=1.5\%$ 付近で微粒化効率が最大になる。いずれの場合も微粒化効率は非常に小さく、系に流入した運動エネルギーの大部分は、そのまま流出する。最後に、可視化結果から理解される流れ場と、図6の微粒化効率の関係について考察すると、 $\phi=1.5\%$ 付近では、液噴流破断時に生成された粗大液滴も下流で微粒化される。その結果、噴霧全体が微細液滴のみで構成され、最大微粒化効率が達成される。従って、効率的に微粒化を促進するためには、気液衝突点にける気液動圧比が2程度の気体噴射条件を選択するのが良い。

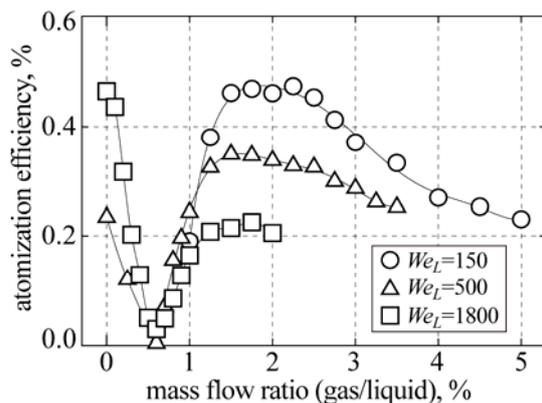


図7 マイクロジェット噴射の効率

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Chihiro INOUE, Mitsuo KOSHI, Hiroshi TERASHIMA, Takehiro HIMENO and Toshinori WATANABE, "Origin of Droplets in Sparkling Fireworks", Science and Technology of Energetic Materials, Vol. 74, No. 4 (2013).
- ② 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 鶴沢聖治, 山中翔太, "微量の気体噴射を付加した衝突微粒化現象", 微粒化 第22巻 76号 pp. 49-55 (2013)
- ③ Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno, Seiji Uzawa and Mitsuo Koshi, "Enhancement of Impinging Atomization by Microjet Injection", Proceedings of ASME TurboExpo GT2013-94677 (2014)
- ④ Chihiro Inoue, Atsushi Shimizu, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and

Seiji Uzawa, "Numerical And Experimental Investigation On Spray Flux Distribution Produced By Liquid Sheet Atomization", Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43364 (2015)

- ⑤ 井上智博, "線香花火の高速度可視化計画 - 美の物理の解明を目指して -", 可視化情報学会誌 (2015年4月)

[学会発表] (計 15 件)

- ① Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and Mitsuo Koshi, "Impinging Atomization Enhanced by Microjet Injection - effect, mechanism and optimization -", 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA2013-3705, 2013/7/14-17@San Jose, pp.1-16.
- ② Chihiro Inoue, Mitsuo KOSHI, Hiroshi TERASHIMA, Takehiro HIMENO and Toshinori WATANABE, "Atomization in Sparkling Fireworks", 66th APS DFD, 2013/11/24-26 @Pennsylvania.
- ③ 井上智博, 姫野武洋, 谷直樹, 梅村悠, "推進薬熱流動モデリングの研究", ロケット・宇宙機モデリングラボラトリーシンポジウム - シミュレーション技術の新展開 -, 2013/9/20@東京大学
- ④ 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 鶴沢聖治, "界面捕獲法と粒子追跡法を融合した液膜微粒化の数値解析", 第41回ガスタービン定期講演会, CD-ROM pp.1-6, 2013/10/16-17@那覇
- ⑤ 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 鶴沢聖治, "二液スラスタ噴射器における衝突微粒化のマルチスケール数値解析", pp.1-5, 日本航空宇宙学会西部支部講演会 2013, 2013/11/14-15@山口
- ⑥ 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, "液膜微粒化のマルチスケール数値解析", 第27回数値流体力学シンポジウム, pp.1-5, 2013/12/17-19@名古屋
- ⑦ 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 越光男, 寺島洋史, "線香花火における微粒化現象の可視化", 第22回微粒化シンポジウム, pp.1-5, 2013/12/19-20@長崎
- ⑧ Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe and Takehiro Himeno, "Experimental and Numerical Study on Impinging Atomization Enhanced by Microjet Injection", 7th Tri-University Workshop on Aerospace Engineering 2014, March3-4@Jeju, Korea.
- ⑨ Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and Seiji Uzawa, "Flow Characteristics of Impinging Atomization Enhanced by Microjet Injection", Space Propulsion 2014, May19-22@Cologne, Germany.
- ⑩ Chihiro Inoue, Atsushi Shimizu,

Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno, Seiji Uzawa, "Multi-scale Simulation and Validation for Predicting Liquid Sheet Atomization", Asian Congress on Gas Turbines 2014, [Aug. 18-20@Seoul, Korea](#)

- ⑪ [Chihiro Inoue](#), Mitsuo Koshi, Takehiro Himeno, and Toshinori Watanabe, "Investigation on Liquid Atomization Mechanism in Sparkling Fireworks", ISEM2014, [Nov. 12-14@福岡](#)
- ⑫ [Chihiro Inoue](#), "Investigation on Liquid Atomization Mechanism in Sparkling Fireworks", APS-DFD2014, Nov. 23-25@San Francisco
- ⑬ [井上智博](#), 渡辺紀徳, 姫野武洋, "衝突微粒化による噴霧特性の Eulerian-Lagrangian 解析", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014/12/9-11@東京
- ⑭ [井上智博](#), 渡辺紀徳, 姫野武洋, "二色法を用いた線香花火の時系列温度計測", 第 23 回微粒化シンポジウム, 2014/12/18-19@弘前
- ⑮ [井上智博](#), 姫野武洋, 根岸秀世, 梅村悠, 渡辺紀徳, 酒井信介, "推進薬熱流動のモデリング", 第 55 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2015/3/9-10@富山

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

- http://www.rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp/member/inoue/chihilab_jpn.html
- http://www.rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp/member/inoue/chihilab_eng.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 智博 (INOUE, Chihiro)

東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授
研究者番号：70466788

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：