

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860028

研究課題名（和文）ロケットエンジンにおける極低温推進剤の微粒化特性の解明と数値的予測

研究課題名（英文）Elucidation and Prediction of Atomization of Cryogenic Liquid Propellant in Rocket Engine

研究代表者 井上 智博（INOUE CHIHIRO）

東京大学大学院・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：70466788

研究成果の概要（和文）：極低温流体の一次微粒化解析に適応可能性を有する数値解析手法を構築した。基礎的な微粒化計測実験結果との比較に基づく検証により、解析手法の妥当性が示された。その結果、液体ロケットエンジンや人工衛星に利用される、衝突型噴射器における液膜、および同軸型噴射器における液柱の一次微粒化現象の把握が一定程度可能になった。同軸型噴射器において、気相速度の影響が一次微粒化に大きく影響すること、リセスが一次微粒化を促進することなどが、数値解析によって確認された。

研究成果の概要（英文）：Numerical analysis method for the prediction of primary atomization under cryogenic conditions has been developed. The verification has been conducted through the comparison with corresponding experiment, which is fundamental atomization of liquid sheet. Thus, numerical analysis of atomization of liquid sheets and jets at coaxial type and impingement type injector has been able to be carried out. It was confirmed that gaseous velocity and recess is important factor for the primary atomization at coaxial type injector.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,320,000	396,000	1,716,000
2009 年度	1,140,000	342,000	1,482,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,460,000	738,000	3,198,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：①航空宇宙工学 ②極低温 ③微粒化 ④ロケット

1. 研究開始当初の背景

極低温推進剤を利用した上段のロケットエンジンや、非設計点作動時の再使用ロケットエンジンでは、亜臨界圧力で噴射された酸化剤が燃焼室で微細な液滴へと微粒化され、

噴霧燃焼が起きる。微粒化の過程は、ロケット本体の損傷に繋がり得る燃焼振動にも関連することが以前から問題視されている。最近では、わが国の主力ロケット H-2A の上段エンジン LE-5B(燃焼圧 3.58MPa)において、

低周波燃焼振動がペイロードを想定以上に加振することが問題視され、原因として推進剤の微粒化が挙げられている。過去には欧米を中心に、燃焼振動の実験が数多く行われたものの、微粒化に関する知見は未だ十分でなく、適切な噴射条件を選定できないという現実的な問題がある。それ故、極低温推進剤の微粒化現象の解明が強く求められている。

微粒化過程の中でも、特に噴射器直下流の微粒化は、下流の噴霧状態や蒸発、混合、燃焼の初期条件を決める。従って、燃焼室内の現象を予測する上で、噴射器近傍の微粒化現象を把握しておくことは不可欠である。最近では、光学計測が発達したことで、噴射器から離れた位置にある噴霧の情報を得ることが可能になっている一方で、液体密度が高い噴射器近傍では、液体の分布や速度場の情報を定量的に取得することは、依然として極めて難しく、未解明な部分が多い。別のアプローチとして、近年、噴射器近傍における非圧縮性流体の微粒化の数値解析が行われ始めたものの、気液の物性値変化を無視できない極低温流体の微粒化に関する解析は、世界的に見ても行われていない。

以上の問題点と研究動向を踏まえた上で、本研究では、極低温流体の噴射器近傍における微粒化過程を明らかにすることを旨とする。既に応募者は、単純な液体分裂現象を対象として、実験結果との定量的な比較を行い、数値解析の妥当性を検証してきた。更に、噴射器近傍の微粒化メカニズムである、ケルビン-ヘルムホルツ(K-H)不安定性が顕在する系の数値解析を行なうとともに、液膜微粒化の可視化実験を行っている。このように、実験結果と数値解析結果の比較に基づいて、微粒化過程を模擬できる段階に達しつつある。実験結果との継続的な比較および検証を行うことにより、これらの手法をさらに発展させることで、液体ロケットエンジンの噴射器における、極低温流体の微粒化過程に関する、基礎的な知見を獲得することが期待される。

2. 研究の目的

本研究は、液体ロケットエンジンで用いられる同軸型噴射器における極低温推進剤の微粒化を、噴射器内部の流動から含めて、三次元・非定常数値解析によって明らかにすることが主眼である。特に、噴射条件(速度比、噴射温度、噴射口径など)を広範囲に変化させたときの、液体の空間分布および微粒化特性を調べ、噴射条件と微粒化特性の関係を把握する。同時に、噴射条件と微粒化特性の関係を繋ぐ物理的なメカニズムを、流れ場の面から詳細に解析することで明らかにすることを旨とする。

数値解析と並行して、数値解析結果と比較可能な実験結果を取得すべく、境界条件と初

期条件が明確な系で、液膜微粒化の可視化実験を行なう。数値解析結果と実験結果の比較に基づいて、より高度な微粒化の数値解析法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 数値解析手法の構築

応募者は、CIP法、VOF法の一つであるMARS法、Level-Set法を組み合わせた気液二相流解析手法を構築し、高度化を図っている。極低温流体の解析を行うために、極低温流体の熱物性値の効果を考慮することができる状態方程式を組み込む。

(2) 検証用データの取得

数値解析結果と比較可能な微粒化の実験結果を取得するために、可視化実験と集霧実験を行なう。噴射器近傍の微粒化メカニズムであるK-H不安定性が顕在して微粒化する液膜の微粒化過程を観察可能な実験装置(図1)を、設計・製作した。同装置は、加圧した作動流体を、一定圧力下で2つのノズルから噴射し、互いに衝突させることで、液膜を形成するものである。ロケットエンジン内の複雑な微粒化過程を、メカニズムを等しくしながら単純な2次元の現象に帰結させることで、現象を詳細に観察する。あわせて、集霧器を用いて下流の液体分布を取得する。流れの観察には、デジタル一眼レフカメラ(NIKON社製D100)を用いた。必要に応じてハイスピードカメラ(Photron社製FASTCAM-APX RS model 250K)を用いて、液膜の非定常挙動を撮影した。

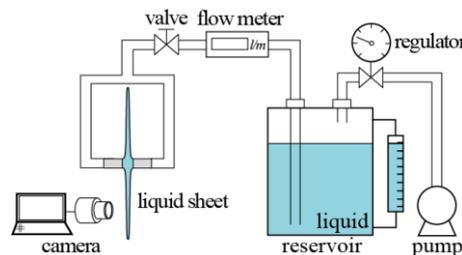


図1 液膜微粒化計測装置

(3) 大規模数値解析の実施

構築した数値解析法によって、極低温流体の微粒化の大規模数値解析を行なう。東京大学情報基盤センターのスーパーコンピューターHITACHI SR11000を計算資源として適宜利用することで、噴射パラメータである、二流体の速度比、噴射温度および噴射器の形状等の条件を広範囲に変化させたときの、液体酸素の空間分布および流れ場の詳細を調べる。

4. 研究成果

幅広い Weber 数環境の下で、実験と数値解析を相互に対応させることで、極低温環境にある液面挙動と流れの詳細を数値解析によって同時に取得できることが示された。その結果、基礎的な観点からは、主に実験からの推察に依存していた微粒化機構を明確に示すことができた。また、工学的応用の観点からは、噴射条件の設定や形状設計に資する情報を獲得することができた。極低温流体の一次微粒化解析は、複雑な微粒化現象の中でも未踏分野の一つであり、本研究を通して構築・検証された手法及び得られた知見は、学術的に極めて重要であると考えられる。工学的観点からも、今後の噴射器設計に資する情報を定性的な観点からは取得できた。今後は、一次微粒化に続く微細スケールの微粒化解析手法を融合することで、解析手法を継続的に発展させることはもちろん、その妥当性を検証するための実験を実施することが肝要であると認識している。

以下に、得られた知見をまとめる。

(1) 数値解析法の構築

三次関数型の状態方程式を導入することで、極低温環境にある流体物性を再現可能にした。これにより、気液界面を精緻に捕捉しながら、良好な体積保存性を満足でき、かつ、極低温流体の微粒化解析が可能な微粒化解析法が一定程度構築された。

(2) 数値解析手法の検証

一次微粒化の本質を抽出することで、現象の単純化を意図した液膜微粒化実験を行ない、数値解析結果と比較可能な可視化画像(図2)および液体の空間分散(図3)を取得した。実験と数値解析の双方を実施することで、それらの比較に基づく数値解析法の検証を行った(図4)。その結果、気液同軸噴射器および衝突型噴射器における、非圧縮流体および極低温推進薬の一次微粒化解析に適応可能性を有する数値解析手法が構築された。この成果は、従来、噴射器製作時に実施されてきた水流し試験の代替になり得るのみならず、エンジン作動環境下の微粒化特性を把握することにつながり、より適切な噴射条件の選定と噴射器設計法に寄与できるものと期待される。



図2 可視化結果

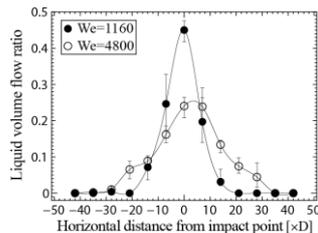


図3 噴霧の空間分散計測

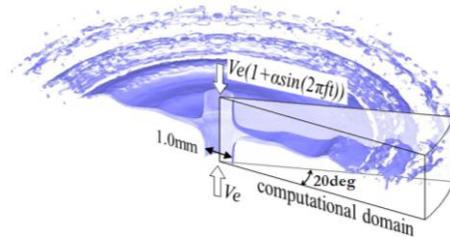


図4 実験と対応する微粒化数値解析

(3) 微粒化基礎現象の理解

液体ロケットエンジンや衛星のスラスターに用いられている衝突型噴射器における液膜の微粒化過程を対象として、数値解析を実施した(図5)。噴射条件および噴射器形状として考慮すべき、噴射速度、雰囲気密度、噴射器長さ等が液膜の微粒化に与える影響を検討し、噴射速度と雰囲気密度が大きいときに微粒化が促進されることを確認した。また噴射器長さが長くなり、噴射速度分布が非一様になると、液膜内部の速度分布における変曲点の存在に起因した不安定性が卓越することで、液膜の微粒化が促進されることを明らかにした。

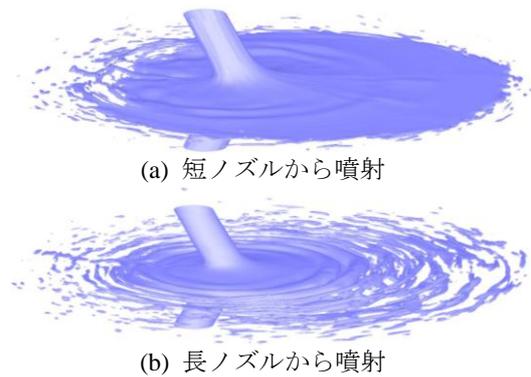


図5 衝突型噴射器における微粒化解析

(4) 液体ロケットエンジン内の微粒化現象

同軸型噴射器における微粒化を対象に、様々な条件下で数値解析を実施した。エンジン作動を想定し、噴射口径や気相密度、速度比、リセスの存在などが、気液同軸噴射器における一次微粒化の基礎的な流れに与える影響を把握した。その結果、気相速度の影響が一次微粒化に大きく影響すること、リセスが微粒化を促進することなどが、数値解析によって確認された。



図6 同軸型噴射器における微粒化解析

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 4 件)

① 井上智博、渡辺紀徳、姫野武洋、鶴沢聖治、噴射器内部流れが自由液膜挙動と微粒化特性に与える影響とその機構 (液体噴射速度分布の効果)、日本機械学会誌 B 編、査読有、76 巻 765 号、2010、755-762

② 姫野武洋、根岸秀世、野中聡、井上智博、渡辺紀徳、鶴沢聖治、様々な加速度環境における自由表面流の数値解析 (CIP 法, MARS 法, Level Set 法を協調した解法の改良)、日本機械学会誌 B 編、査読有、76 巻 765 号、2010、778-788

③ 井上智博、寺島洋史、根岸秀世、姫野武洋、液体ロケットエンジンのシミュレーションとモデリング: 極低温推進薬の高圧噴射と微粒化に関連した熱流動現象、日本航空宇宙学会誌、査読無、2010 (掲載決定)

④ 液体ロケットエンジンのシミュレーションとモデリング: 現状と問題点、清水和弥、津田伸一、井上智博、山西伸宏、姫野武洋、越光男、日本航空宇宙学会誌、査読無、58 巻 675 号、2010、1-8

[学会発表] (計 15 件)

① CHIHIRO INOUE, Liquid Jet Dynamics and Atomization Characteristics at Near-Field of Coaxial Type Injector, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, 2010/3/4, 宮崎観光ホテル(宮崎県宮崎市)

② CHIHIRO INOUE, Liquid Sheet Dynamics and Primary Breakup Characteristics at Impingement Type Injector, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009/8/3, Colorado Convention Center (CO, U. S. A.)

③ CHIHIRO INOUE, Study on Atomization Process of Liquid Sheet Formed by Impinging Jets, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2008/7/22, Connecticut Convention Center Hartford(CT, U. S. A.)

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/jetlab/>

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・助教

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: