

高エネルギーイオン液体推進剤を適用した化学スラスタの開発

松本 幸太郎^{*1}, 勝身 俊之^{*2}, 伊東山 登^{*3}, 松永 浩貴^{*4}, 羽生 宏人^{*5}

Development of Chemical Thrusters applying High Energetic Ionic Liquid Propellants

MATSUMOTO Kotaro^{*1}, KATSUMI Toshiyuki^{*2}, ITOUYAMA Noboru^{*3}, MATSUNAGA Hiroki^{*4}
and HABU Hiroto^{*5}

ABSTRACT

Ammonium Dinitramide (ADN)-based ionic liquid propellants are promising new liquid propellants with excellent propulsive performance, stability, and ground handling characteristics. There have been studies on the properties of ADN-based ionic liquids alone and on thruster element technologies such as ignition systems and injectors. Our research group is currently studying chemical thrusters using ADN-based ionic liquids as propellant and is conducting ground burning tests for future space demonstrations. This report summarizes the status of the ground combustion test and the development plan up to the space demonstration.

Keywords: Liquid Propellant, Ionic liquid, High Energetic Material, Chemical Propulsion

1. はじめに

高エネルギー物質研究会では、従前の液体推進剤と比較して安全・扱い易い・安価・小型高性能を達成しうる新規液体推進剤である高エネルギーイオン液体(EILs)に関する研究を進めている¹⁾。EILsは一般的なイオン液体の特徴である低揮発性を有し、化学分解によって高温ガスを生成する液体である。また、本研究グループで取扱っているEILsは、アンモニウムジニトラミド(ADN)を基材として、特定の化学物質を混合することで調製が可能であり、溶媒を必要としない非溶媒系推進剤である。ADN以外に混合する物質としては、モノメチルアミン硝酸塩(MMAN)や尿素(Urea)が多く研究されているが、その他にアセトアミド(AA)等²⁾を混合した多様なEILsについて研究が行われている。上述のADNを基材としたADN系EILsは組成設計の自由度が高く、搭載するシステムに応じた組成変更が可能な液体推進剤である。ADN系EILsは2010年度より基礎研究が始まり、単体の物性に関する研究が行われてきた。ADN系EILsの中で最も取扱いが容易なAMU442(ADN/MMAN/Urea = 40/40/20 wt%)は、熱分析試験の結果より、分解開始温度が約130℃かつ温度上昇による揮発がないことが判っている³⁾。また、落槌や摩擦等の各種感度試験も実施されており、原材料と比較して低感度である。このように、ADN系EILsの一部組成では、既に地上運用時の取扱いリスクを低減させることを示す成果が揃っている。ADN系EILsの各種性能については、国内外の新規液体推進剤候補との比較⁴⁾⁵⁾が行われており、他候補と比較して高い推進性能を有することが判っている。上述のようにADN系EILsは取扱い性および性能の面で優れた液体推進剤であり、着火特性³⁾や高性能組成の探索⁷⁾のような推進剤単体の特性把握のみならず、インジェクタ噴射特性⁸⁾やレーザ点火⁹⁾等のスラスタの要素技術に関する研究も併せて行われている。現在では、電気推進と化学推進に併用可能な液体推進剤として、ADN系EILsを将来宇宙探査用に電気推進と化学推進を統合した推進システムに適用することを目標にスラスタの設計開発を実施している。本研究グループは化学スラスタに関する検討を進めており、大学研究室内での小規模

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

¹⁾ 日本大学 生産工学部 機械工学科
(Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University)

²⁾ 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)

³⁾ 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)

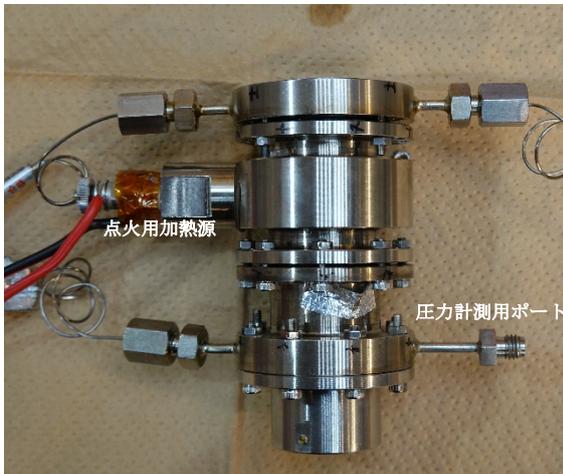
⁴⁾ 防衛大学校 応用科学群 応用化学科
(Department of Applied Chemistry, National Defense Academy)

⁵⁾ 宇宙科学研究所 学際科学研究系
(Department of Interdisciplinary Space Science, Institute of Space and Astronautical Science)

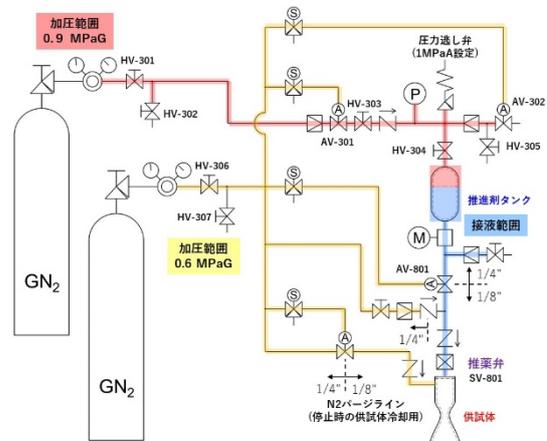
試験や JAXA あきる野実験施設での燃焼試験を計画・実施している。本報告では ADN 系 EILs を推進剤とした化学スラスタ地上燃焼試験の実施状況及び実証計画について纏める。

2. 化学スラスタ地上燃焼試験

地上燃焼試験は 2023 年 3 月及び 10 月の計 2 回実施しており、いずれも大気圧下での試験である。各試験において、これまでに蓄積された ADN 系 EILs に関する知見を元にして、新たに燃焼器を製作している。第 1 図に燃焼試験で用いた供試体を示す。また、第 2 図に試験で用いた推進剤供給系の系統図を示す。供試体は SUS304 製であり、燃焼器内部の寸法は内径 $\phi 24$ mm×全長約 80 mm である。液体推進剤には AMU442 を適用した。AMU442 は第 2 図に示す推進剤タンク内に注液されており、上流からの N_2 ガス加压によってインジェクタを介して燃焼器に噴射される。噴射された AMU442 は、燃焼器内に組付けられたグラファイト製点火器に接触し着火する。グラファイト製点火器は加熱源であるグロープラグによって約 1000 °C に加熱した。燃焼器内部には燃焼器温度上昇による強度低下を抑制するために断熱材を施工しており、内面にタンタル(Ta)薄板を取り付けることで断熱材への AMU442 の浸透を防いでいる。なお、安全機構としてノズル部に放圧機構を備えており、燃焼器内圧が約 1.6 MPa になった際にノズルが脱落して放圧する。



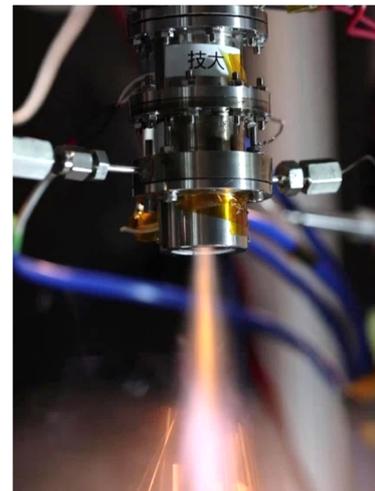
第 1 図 スラスタ供試体の外観(第 1 次試験)



第 2 図 ADN 系 EILs 供給システム系統図
(推進剤：AMU442)

2023 年 3 月に実施した第 1 次試験は本研究グループにおける初めての地上燃焼試験であり、推進剤の燃焼特性(着火遅れ時間、燃焼効率等)やスラスタ設計における技術課題及び試験実行上の課題抽出を目的として JAXA あきる野実験施設にて実施した。試験条件は、推力約 5 N、設計燃焼圧力 0.4 MPaA、燃焼時間 1 s 及び 10 s である。燃焼時間 1 s の着火試験では、大学機関で実施している予備試験との比較を行う。燃焼時間 10 s の燃焼試験の目的は、大学で実施困難な長秒時燃焼時のスラスタ温度や燃焼特性の把握である。試験結果として、AMU442 の分解ガスの発生が確認できたが、スラスタ着火には至らなかった。試験実施後の検証により、AMU442 が点火器に滞留せず下流に流出してしまったことが未着火の要因であることが判った。なお、目的の一つである試験実施上の課題抽出は達成出来ており、今後の試験についても問題なく実行可能である。

2023 年 10 月に実施した第 2 次試験では、第 1 次試験の結果を元に燃焼器内部の断熱材厚さ及び点火器形状の変更を行った。また、試験実施に先立ち、事前予備試験(燃焼時間 0.5~1 s)を行い、AMU442 が燃焼器内で着火燃焼することを確認し⁹⁾、JAXA あきる野実験施設での試験に供した。第 2 次試験では、第 3 図に示すようにスラスタ着火に成功した。一方、着火後に圧力の急峻な立ち上がりが発生し、安全機構が作動したため、燃焼効率の取得に至らなかった。試験時における圧力・温度等の各種データは問題なく計測されており、詳細解析を実施している。今後は、詳細解析の結果を基に必要な対策を講じ、再試験を実施する。また、計測項目に推力を追加し、推進性能の評価を実施していく。さらに、真空燃焼試験を実施し、真空環境下での各種特性を取得・評価することで宇宙実証へ進む。なお、これらの地上試験は全て JAXA あきる野実験施設で実施することを計画している。



第 3 図 スラスタ着火時の様子(第 2 次試験)

3. 化学スラスタの実証計画

本研究グループでは、ADN系EILsを適用した化学スラスタの宇宙実証として、観測ロケットによる実証実験を計画している。第1表に化学スラスタ実証実験までの開発計画(案)を示す。

第1表 化学スラスタの開発計画(案)

計画項目	FY2022	FY2023	FY2024	FY2025～
要素技術研究 (インジェクタ, 点火機構 他)	→			
大気燃焼試験	成果フィードバック	設計改善	長秒時燃焼 推力計測	
真空燃焼試験		着火確認(済)	EM試験	追加検証
観測ロケット実験 応募		2026年度以降打上げ公募		
観測ロケット実験用PFM試験		12月E		実証実験

第1表に示すように、研究グループ全体でインジェクタ噴霧や点火機構等の要素技術に関する研究を継続しつつ、2023年度中に第3次試験(TRL-4)を実施する計画である。第3次試験は第2次試験まで成果を踏まえて、大学機関での事前予備試験を行った上で実施する。また、各試験を実施していく中で、観測ロケット実験公募には積極的に応募していく予定である。2024年度及び2025年度以降は、真空環境下での試験(TRL-5)を中心に、観測ロケットでの宇宙実証を見据えたスラスタ設計及びPFM試験(TRL-6,7)を行っていく。なお、ADN系EILs単体の基礎研究についても要素技術研究と連携しながら継続して実施していく。また、上述の開発計画と並行して化学スラスタ技術の展開先についての検討も進めており、特に観測ロケット姿勢制御装置であるSJシステムへの適用に着目してトレードオフ評価⁹⁾などを進めている。以上のように、将来宇宙探査用の統合推進システムへの適用を最終目標として、地上燃焼試験で化学スラスタ技術を確立し、観測ロケットによる宇宙実証を進めていく計画である。

4. まとめ

本研究グループではこれまでに蓄積したADN系EILsに関する知見を基に化学スラスタ開発を実施しており、本計画で開発される化学スラスタはADN系EILsを推進剤として利用したスラスタの基準設計となり得る。すなわち、現在研究が進んでいる要素技術を取り入れて実証するための基盤となる。そして、「観測ロケット実験による宇宙実証」と「要素技術の適用」を通して、将来宇宙探査に用いることが可能な化学スラスタの開発が実現すると考える。

謝辞

本研究の一部は、宇宙工学委員会戦略的開発研究費(工学)の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 松永浩貴 他.: 次世代宇宙推進システムを見据えた高エネルギーイオン液体推進剤の研究, 安全工学シンポジウム, (2022), pp.208-209.
- 2) K. Shiota, et al.: Effects of amide compounds and nitrate salts on the melting point depression of ammonium dinitramide, Sci. Tech. Energetic Materials, 79, 5, (2018), pp.137-141.
- 3) H. Matsunaga, et al.: Ignition of the Droplets of Ammonium Dinitramide-Based High-Energy Ionic Liquid, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 18, 6, (2020), pp. 323-329.
- 4) 和田明哲 他.: 超小型宇宙機搭載に向けた一液式推進系のトレードオフ評価, JAXA-RR-19-003, (2020), pp. 11-16.
- 5) 松本幸太郎 他.: 高エネルギーイオン液体を推進剤とする小型 SJ スラスタの実証, 観測ロケットシンポジウム 2022 講演集, II-6, (2022).
- 6) N. Itouyama and H. Habu.: Investigation for Ignition of ADN-based Ionic Liquid with Visible Pulse Laser, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 16, 3, (2020), pp. 291-298.
- 7) 塩田謙人 他.: アンモニウムジニトラミド系イオン液体推進剤の組成探索と性能評価手法, 火薬学会 2018 年度春季研究発表会, (2018).
- 8) 伊藤尚義 他.: 低毒性イオン液体推進剤の微粒化特性に関する実験的研究, JAXA-RR-22-006, (2023).
- 9) 松本幸太郎 他.: ADN系イオン液体を推進剤としたスラスタに関する研究, 火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, (2023).