

超小型衛星を見据えた高エネルギーイオン液体推進系の研究開発

松永 浩貴^{*1}, 伊東山 登^{*2}, 松本 幸太郎^{*3}, 塩田 謙人^{*4},
伊里 友一朗^{*5}, 勝身 俊之^{*6}, 羽生 宏人^{*7}, 野田 賢^{*4}, 三宅 淳巳^{*5}

Research and Development of Thruster with High Energetic Ionic Liquids for Micro Propulsion System

MATSUNAGA Hiroki^{*1}, ITOUYAMA Noboru^{*2}, MATSUMOTO Kotaro^{*3}, SHIOTA Kento^{*4},
IZATO Yu-ichiro^{*5}, KATSUMI Toshiyuki^{*6}, HABU Hiroto^{*7}, NODA Masaru^{*4} and MIYAKE Atsumi^{*5}

ABSTRACT

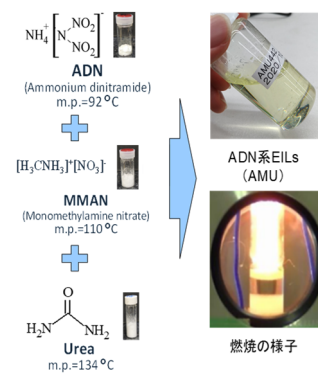
We are conducting research and development of chemical propulsion systems for satellites using ammonium dinitramide (ADN)-based energetic ionic liquids (EILs) as propellants. They are expected to be used as propellants for high-performance and safe nano-satellite propulsion systems. The project aims to demonstrate the EILs in orbit within a few years, and this year, in parallel with the development of new thruster systems using laser and electrolytic ignition, and the advancement of new EILs-specific technologies such as the design of highly reactive ADN-based EILs, a prototype thruster using a simple method was built and a ground combustion test was conducted. The thruster has been tested in ground combustion tests. In the future, we plan to demonstrate the thruster's propulsion performance to clarify its feasibility as a chemical propulsion system, and then proceed with the fabrication of a thruster equipped with each new technology.

Keywords: Monopropellant, Thruster, Micro Propulsion System, High Energetic Materials, Ionic Liquid

1. はじめに

宇宙開発や探査が活況な昨今、低コスト・高頻度な実証に適した超小型（数十 kg 以内）の衛星の開発が重要視されている^{1,2}。人工衛星の姿勢や軌道の制御を担う推進系は、「安全」、「安価」、「使いやすい」、「小型高性能」であることが重要である。化学推進系においてはこれらを満たす液体推進剤の研究開発が世界中で進んでいる。注目されている推進剤の一つは、室温で固体の高エネルギー物質であるアンモニウムジニトラミド（ADN、融点 92°C）を水や有機溶媒に溶解させて得る液体である^{3,4}。

一方で、筆者ら高エネルギー物質研究会では、ADN を固体可燃剤と混合すると、溶媒を用いることなく可燃性の液体を形成することを見出した^{5,6}。我々はこれらの総称を ADN 系高エネルギーイオン液体（Energetic Ionic Liquids ; EILs）とし、新たな推進剤候補



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

^{*1} 防衛大学校 応用科学群 応用化学科
(Department of Applied Chemistry, National Defense Academy)

^{*2} 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)

^{*3} 日本大学 生産工学部 機械工学科
(Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University)

^{*4} 福岡大学 工学部 化学システム工学科
(Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

^{*5} 横浜国立大学大学院 環境情報研究院
(Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University)

^{*6} 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)

^{*7} 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)

として注目している。ADN系EILsは調製の容易さのみならず、イオン性化合物特有の高密度・低蒸気圧・高安定性により、既存推進剤であるヒドラジンやその代替候補と比較して、燃料タンクの小型化、取扱性の向上、意図しない爆発リスクの低減が期待できる。これまでに見出した組成の一つが酸化剤ADNに可燃剤モノメチルアミン硝酸塩(MMAN)および尿素の混合により得られるEILs(AMU, 第1図)⁵⁾である。AMUは化学安定性⁵⁾や材料適合性⁷⁾に優れ、NASA-CEA⁸⁾を用いた化学平衡計算ではヒドラジンや国内外の推進剤候補よりも高い密度比推力となる⁹⁾ことが示されている。

これまで我々はADN系EILsを推進剤として実用化するための要素技術開発を進めてきた。ADN系EILsは液化に溶媒を用いないゆえの特異な物性や反応性(高い粘度, 熱安定性, 火炎温度)を有しており, いかにかにスラスタへ供給し, 着火および燃焼させるかが重要な課題である。さらに, 低コスト・高頻度の衛星打ち上げを見据えると, EILsを構成する物質(特にADN)の製造コストが高いことも課題である。これらの解決に向けて, 供給系, 着火系といったスラスタシステムの新規化, EILsの組成の調整による物性改善, EILsの安全性評価, そしてADNの低コスト合成を目指した研究開発を実施してきた。さらに昨年度末から宇宙航空研究開発機構(JAXA)あきる野実験施設において, スラスタの成立性を明らかにするための地上燃焼試験を開始した。本稿ではこれらのうち本年度における主要な研究成果や研究方針についての概要を報告する。

2. EILsの実装に向けた本年度の取組み

2.1 EILsスラスタの試作および地上燃焼試験の実施

AMUを対象として, これまでの物性・反応性評価の結果を基にしてスラスタを構築し, 宇宙航空研究開発機構あきる野実験施設にて地上燃焼試験を開始した。スラスタは既存推進剤における実績のある(ヒーターを熱源とする)方式とし, 推力約5N, 設計燃焼圧力0.4MPaAとした。実験では, 燃焼器内への推進剤の連続的な供給および微粒化, 長秒時燃焼(今回は10s)の挙動把握および課題抽出が目的である。実験は第1回を2023年3月, 第2回を2023年10月に実施し, 第2回試験では大気圧雰囲気ですラスタに供給した推進剤の着火に成功した(第3図)。第3回試験は本年度中に計画しており, ここまでに抽出させた課題を基にして, 大気圧雰囲気での長秒時燃焼の達成を目指す。

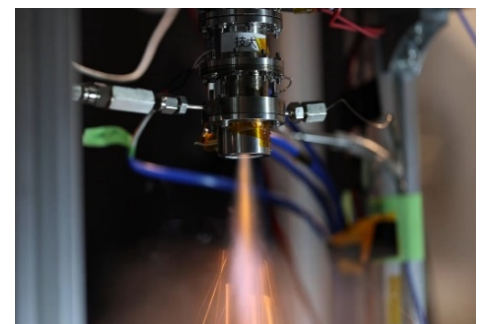
2.2 EILs向け新規スラスタシステムの構築

ADN系EILsの高い熱安定性, 燃焼温度, 粘度に対応し, 高いエネルギー密度を有することを最大限活用可能な着火方式, 供給方式の研究開発を進めている。

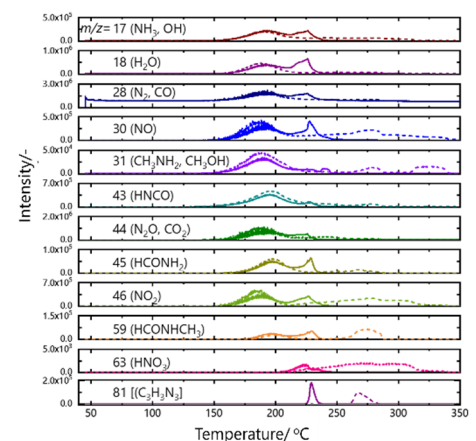
一つ目の手法は, 触媒および熱源による点火を用いるスラスタである。インジェクタで微粒化したEILsを加熱した触媒層に吹き付けることで分解および燃焼を引き起こす方式である。昨年度までに, 川端ら⁹⁾はAMUに過酸化水素水を添加することで微粒化が可能となり, 予熱した白金触媒への噴射で着火することを示した。また, 伊東山ら¹⁰⁾はAMU自身の発熱分解を促進する触媒の探索を熱重量-示差熱分析(TG-DTA)により実施し, Rh触媒による促進が顕著であることを報告した。本年度は, AMUの物性(粘度, 表面張力)が噴霧特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし, AMUを模擬したグリセリン溶液を使用して噴射角度の時間推移を調査した。その結果, 現在までには溶媒を加えないAMUでは十分な噴射角は得られていないものの, 微粒化を行うための指針を得ることができた。また, 触媒がAMUの熱分解機構に与える影響を明らかにするため, 昇温時の生成ガスを熱分解ガスクロマトグラフ質量分析装置(Py-GC/MS)にて分析した。Rh触媒添加試料では, MMANの熱分解生成ガスおよびH₂O, N₂の生成が顕著になり, Rh触媒によるMMANの発熱分解, HNO₃が寄与する発熱反応の促進が示唆された(第4図)¹¹⁾。液滴を加熱炉に滴下し, 簡易的に着火性を評価したところ, AMUより低い炉温でも着火が可能であることも確認された(第5図)¹²⁾。現在は触媒効果の詳細について, 理論的にも解析を進めている¹³⁾ところである。



第2図 第1回試験(2023.03)の集合写真



第3図 着火の様子(2023.10 第2回試験)



第4図 AMU442(破線)およびRh添加試料(質量比75:25, 実線)のガス生成挙動¹¹⁾

一方で、より EILs に特化したスラスタシステムの構築に向け、EILs の特性（高い粘性、燃焼温度、導電性）に対応し、既存の手法にとらわれない新しい供給方式、点火方式についての基礎研究を進めている。その一つがスラスタ内部に設置したカーボン繊維に EILs を徐々に浸透させていき、そこに連続発振（CW）レーザーを照射して加熱着火する方式である（第6図）¹⁴⁾。この方式では、インジェクタによる微粒化を必要としないことから高粘度である EILs にも適用でき、レーザーによる高エネルギー密度かつ非接触の加熱は、熱安定性の高い EILs でも瞬時の着火が可能であること、高い燃焼温度であっても熱源の損耗がないことが期待できる。昨年度は、スラスタ燃焼器内に設置したカーボン繊維に浸み込ませた数百 mg オーダーの AMU を、レーザーにより予熱なしで燃焼させることに成功した¹⁵⁾。本年度は連続的に AMU をカーボン繊維に浸透させる供給系を含めたスラスタの構築を進めるとともに、レーザー点火試験をより精度良く行うためのレーザー光学系および点火系の改善（第7図）を実施しているところである。

また、EILs の導電性を活用した電解による点火も有力候補である。電解は加熱時に進行する熱分解とは異なる反応経路となることで、熱安定性の高い EILs が加熱よりも低いエネルギーの印加で着火に至ることが期待できる¹⁶⁾。これまでに、液滴レベルでの試験を行ったところ着火を確認し、反応に寄与するパラメータの整理を進めてきた。さらに、昨年度は、3D プリンタで試作した模擬スラスタにおいて、数 mL オーダーの EILs [ADN/2-ヒドロキシエチルヒドラジニウム硝酸塩 (HEHN)] を着火させることに成功した¹⁷⁾。本年度は、交流電圧の印加は直流電圧と比較して着火遅れ時間の短縮が可能であることや EILs 中の水分は推進性能を低下させる一方で着火遅れを短縮することなどが実験的に示唆された^{18,19)}。現在はこれらを基にした着火に必要な電圧印加条件の最適化、そして模擬スラスタにおける燃焼パラメータの取得²⁰⁾を進めている。

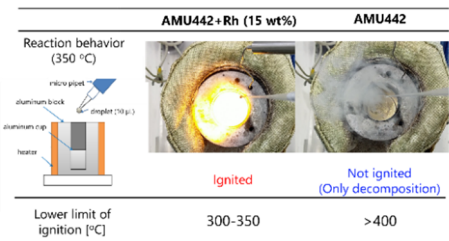
2.3 ADN系 EILs 組成の最適化

AMU は既存推進剤と比べて優れた性能を有する一方で、熱安定性の高さゆえ着火性が課題となっており、点火方式の改良と並行して、これまでの研究により得られた EILs 液体形成のメカニズム²¹⁾、ADN の分解機構²²⁻²⁴⁾、ADN との反応性に及ぼす可燃剤の影響^{25,26)}を基にして、高着火性、高性能である ADN 系 EILs の開発を進め、種々の候補組成を見出している。ADN 系 EILs の燃焼性には、ADN の熱分解で生じる NO₂ による可燃剤の水素引き抜きが影響することが報告されている。これまでの探索により、アセトアミド²⁷⁾、ホルモヒドラジド²⁸⁾、HEHN²⁹⁾は、AMU の尿素と比べて NO₂ と反応しやすい可燃剤であるとともに、ADN や ADN/MMAN 混合物との組み合わせで安定な EILs を形成し、アセトアミド、ホルモヒドラジドでは加熱を、HEHN では電圧印加を行うと AMU より高い着火性を有することを見出した。これらは、地上で安全な取扱いが可能でありながら、使用時には加熱や電圧印加により瞬時にエネルギーを放出可能であることを示唆している。現在は燃焼反応の詳細解析³⁰⁻³³⁾を行い、着火性や燃焼速度などに及ぼす可燃剤の影響を整理しており、今後は 2.2 における供給方式や点火方式との適合性を評価し、最適な組み合わせを用いたスラスタを確立していく。

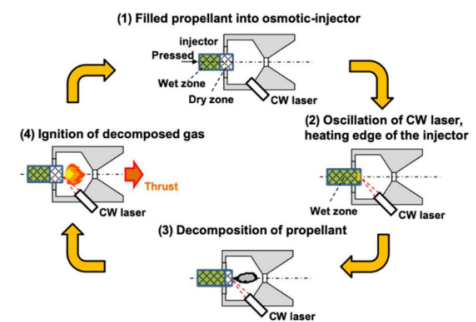
3. ま と め

安全で、使いやすい、安価、高性能である推進剤として期待される ADN 系 EILs を超小型化学推進系に搭載するために進めている研究のうち、本年度の主要な成果をまとめた。特に地上燃焼試験におけるスラスタシステムの実証、既存方式にとらわれない推進システムの開発、凝縮相反応性をパラメータとした EILs 組成の最適化について、データの蓄積および技術の高度化が達成された。また、ADN 系 EILs の低コスト合成や安全性評価についても実験データの取得および解析を継続している。今後は地上燃焼試験によるスラスタとしての成立性を示すこと、EILs スラスタ用に新規開発を進めている供給系、点火系と推進剤組成の最適な組み合わせを明らかにすることを目指す。最終的にはこれらの技術を統合し、EILs の特長を発揮できるスラスタを構築する。

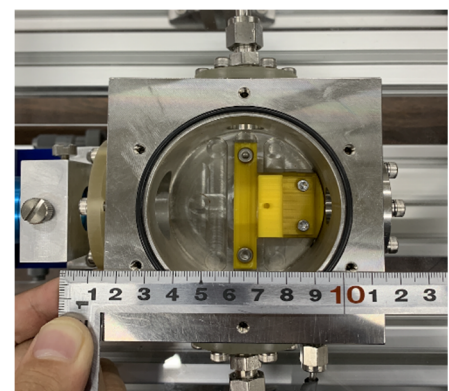
本研究会による高エネルギー物質研究活動は、2009 年度から継続して実施してきており、その成果は「高エネルギー物質研究会成果報告」として 2010 年度から毎年報告している。また昨今は、本研究成果は前述する低軌道衛星への応用



第5図 Rh 添加による AMU の着火性向上¹²⁾



第6図 レーザー点火スラスタの概念図¹⁴⁾



第7図 改良されたレーザー点火試験器

だけでなく、月軌道プラットフォームゲートウェイ運用を皮切りとした深宇宙探査への展開も見据え、宇宙工学委員会にて「将来深宇宙探査に向けた革新的超小型推進システム技術実証 RG」としても活動中である。そこでは、EILs の電気推進との共用による統合推進系構築を目指しているところであり、益々の成果が期待される。

謝 辞

本研究の一部は、宇宙工学委員会戦略的開発経費、JSPS 科研費 23K04239、福岡大学 (GR2307)、火薬工業技術奨励会の助成を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 羽生宏人：産業化が加速する宇宙開発利用分野の技術開発動向，火薬学会春季研究発表会，No.26 (2018).
- 2) 船瀬龍他：超小型宇宙科学・探査ミッションにおける推進系利用の現状と今後への期待，日本航空宇宙学会誌，67 (2019), pp.233-238.
- 3) Anflo, K., et al. : Towards green propulsion for spacecraft with ADN-based monopropellants, Proc. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-2002-3847 (2002).
- 4) Negri, M., et al.: New technologies for ammonium dinitramide based monopropellant thrusters—the project RHEFORM, Acta Astronautica, 143 (2018), pp. 105–117.
- 5) Matsunaga, et al. : Preparation and thermal decomposition behavior of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquid propellant, Sci. Technol. Energ. Mater., 78 (2017), pp.65-70.
- 6) Ide, Y., et al. : Potential of ADN-based ionic liquid propellant for spacecraft propulsion, Procedia Engineering, 99 (2015), pp.332-337.
- 7) Matsunaga, H., et al. : Reactivity of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquids with metals and metal oxides, Proc. 34th Int'l Symp. Space Technology and Science, 2023-a-47 (2023).
- 8) Gordon, S. and McBride, B. J. : Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, NASA Reference Publication 1311 (1996).
- 9) Kawabata, K., et al. : Firing Test of Hydrogen-peroxide-added ADN-based Monopropellant Using Catalytic Thruster, Proc. 34th Int'l Symp. Space Technology and Science, 2023-a-48 (2023).
- 10) Itouyama, N., et al. : Screening of effective catalysts for the ignition of high-energy ionic liquid propellants: Narrowing down of candidate catalysts and their investigation based on thermal analysis, Sci. Technol. Energ. Mater., 84 (2023), pp.33-39.
- 11) 松永浩貴他：触媒を添加したアンモニウム系高エネルギーイオン液体の分解ガス生成挙動，火薬学会 2023 年度春季研究発表会，No.5 (2023).
- 12) Matsunaga, H., et al. : Influence of catalysts on the thermal behavior of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquids, 26th Int'l Conf. Chemical Thermodynamics (ICCT-2023) (2023).
- 13) 伊東山登他：金属触媒を用いた高エネルギーイオン液体の熱分解促進に関する考察，火薬学会 2023 年度秋季研究発表会 (2023).
- 14) 伊東山登，高エネルギーイオン液体推進薬の着火に関する研究，東京大学学位論文 (2020).
- 15) 伊東山登他：高エネルギーイオン液体推進剤を用いたレーザ放射加熱点火式小型スラスタの基礎動作特性の実験評価，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-22-006 (2023), pp.7-11.
- 16) 伊里友一朗他：熱的安定なイオン液体推進剤を着火させる戦略—電解着火の可能性，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-19-003 (2020), pp.27-34.
- 17) 大森稜介他：エネルギーイオン液体を用いた電圧印加式燃焼器の分解・着火特性評価，火薬学会 2022 年度春季研究発表会, No.47 (2022).
- 18) 大森稜介他：エネルギーイオン液体の電圧印加に伴う分解・着火現象に与える交流電圧の影響，火薬学会 2023 年度春季研究発表会, No.6 (2023).
- 19) 大森稜介他：エネルギーイオン液体の電圧印加による着火メカニズムに与える水分の影響，火薬学会 2023 年度春季研究発表会, No.7 (2023).
- 20) 大森稜介他：エネルギーイオン液体の電圧印加型燃焼器を用いた燃焼試験，火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.2 (2023).
- 21) 塩田謙人他：アンモニウムジニトラミド系高エネルギー推進剤の最適組成探索手法，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-16-006 (2017), pp.47-51.
- 22) Matsunaga, H., et al. : Analysis of evolved gases during the thermal decomposition of ammonium dinitramide under pressure, Sci. Technol. Energ. Mater., 78 (2017), pp.81-86.
- 23) Izato, Y., et al. : Thermal and evolved gas analyses of decomposition of ammonium dinitramide-based ionic liquid propellant using TG-DSC-HRTOFMS, J. Therm. Anal. Calorim., 138 (2019), pp.1853-1861.
- 24) Izato, Y. and Miyake, A. : Detailed kinetic model for ammonium dinitramide decomposition, Combustion and Flame, 198 (2018), pp.222-229.
- 25) Shiota, K., I et al. : Reactivity analysis of ammonium dinitramide binary mixtures based on ab initio calculations and thermal analysis, J. Therm. Anal. Calorim., 138 (2019), pp.2615-2622.
- 26) Matsunaga, H., et al. : Thermal behavior of ammonium dinitramide and amine nitrate mixtures, J. Therm. Anal. Calorim., 135 (2019), pp.2677-2685.
- 27) 塩田謙人他：アンモニウムジニトラミド/アセトアミド混合系の燃焼に及ぼすモノメチルアミン硝酸塩の影響，火薬学会 2023 年度春季研究発表会, NO.14 (2023).
- 28) Matsunaga, H., et al. : Preparation and Thermal Behavior of High Energetic Eutectic Mixture of Ammonium Dinitramide and Hydrazide Compounds, J. Evolving Space Activities, 1, No.41 (2023).
- 29) Shiota, K., et al. : Evolved gas analysis of ammonium dinitramide and hydroxyethylhydrazinium nitrate mixture, 7th Int'l Symp. Energetic Materials and their Applications (ISEM 2021), B7-5 (2021).
- 30) 古野岳他：ADN/モノメチルアミン硝酸塩/アセトアミド混合系の燃焼に及ぼす雰囲気圧力の影響火薬学会 2023 年度秋季研究発表会，No.3 (2023).
- 31) 廣瀬和也他：ADN/モノメチルアミン硝酸塩混合系の電圧印加着火挙動に及ぼす電極材の影響火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.28 (2023).
- 32) 塩田謙人他：ADN/ヒドロキシエチルヒドラジニウム硝酸塩混合系の粘度および導電率測定，火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.35 (2023).
- 33) 矢野佑樹他：量子化学計算を用いた ADN/ホルモヒドラジド混合系の液相反応性解析，火薬学会 2023 年度秋季研究発表会，No.37 (2023).