

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

高エネルギー物質研究会  
令和5年度研究成果報告書

年次報告書編集委員会  
松永 浩貴, 伊東山 登, 塩田 謙人, 松本 幸太郎  
伊里 友一郎, 勝身 俊之, 羽生 宏人

2024年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 高エネルギー物質研究会

### 研究者一覧

松永 浩貴	防衛大学校（研究会座長）
羽生 宏人	宇宙航空研究開発機構
三宅 淳巳	横浜国立大学
勝身 俊之	長岡技術科学大学
伊里 友一郎	横浜国立大学
塩田 謙人	福岡大学
松本 幸太郎	日本大学
伊東山 登	名古屋大学
加藤 勝美	福岡大学
吉野 悟	日本大学

### 参加大学院生／学部学生

伊藤 尚義	長岡技術科学大学大学院
川端 健心	長岡技術科学大学大学院
早田 和義	長岡技術科学大学大学院
大森 稜介	横浜国立大学大学院
磯田 涼太	横浜国立大学大学院
大村 朋広	横浜国立大学大学院
長町 大気	日本大学大学院
大淵 慎一郎	福岡大学大学院
古野 岳	福岡大学大学院
矢野 佑樹	福岡大学大学院
濁川 淳	長岡技術科学大学
得丸 翔平	長岡技術科学大学
加藤 夏樹	横浜国立大学
高岡 泰成	東京大学大学院

## まえがき

高エネルギー物質研究会は、エネルギー物質に関する研究の基盤強化および利用促進を図るべく平成21年度より精力的かつ継続的に活動を推進している。

本研究活動は、学術的には（一社）火薬学会の研究活動として進めてきている。現在は高エネルギー物質アンモニウムジニトラミド（Ammonium dinitramide, ADN）を基剤とした高エネルギーイオン液体（Energetic ionic liquids, EILs）を用いた推進系の研究開発を中心に、固体推進薬の高性能化を目的とした新規酸化剤やポリマーの開発、高エネルギー物質の爆轟特性解析など幅広い研究を実施している。

ADN系EILsは、固体の高エネルギー酸化剤であるADNと特定の固体可燃剤を混合した際に起こる結晶同士の相互作用により得られる可燃性の液体である。固体同士での混合のみで得られ、調製に液体の溶剤を一切用いない。これにより高エネルギー密度かつ安全性の高い液体推進剤となるポテンシャルがあり、超小型衛星等の技術革新を期待している。

本年度は、ADN系EILsを推進剤としたスラスタの成立性を示すことを主な目的として、研究開発を進めてきた。まず、長秒燃焼の実証および使用時の反応系、供給系の課題の抽出のため、既存推進剤で実績のある方式を用いたスラスタを試作し、本年の3月と10月にJAXAあきる野実験施設での地上燃焼試験を実施した。本年度実施した第2回試験においては、推進剤の着火を確認することができた。一方で、EILsの物性（高い粘度や燃焼温度）に起因するとみられる特異な燃焼挙動が観測され、既存方式の改良とともにEILs用の技術開発（組成最適化や新規スラスタシステム開発）の重要性が確認されたところである。

EILs用技術の開発としては、点火系の研究開発に注力した。本研究会では、既存の触媒方式に加えて熱安定性や燃焼温度が高いEILsに対応したレーザー、電解による点火方式に着目している。これまでの研究では、各手法による点火を小スケールの試験で確認しており、本年度は現象の詳細についての理解とともに、点火系に合わせた供給系の確立を目指し研究を進めている。次年度以降の研究であきる野実験施設での新技術の実証を目指している。また、点火方式の研究と並行して、原料となる高エネルギー物質（ADN）の低コスト化研究、イオン液体組成の改善、燃焼反応の詳細解析も進めており、イオン液体の安全で、使いやすい、安価で小型、高性能である利点を大いに生かした宇宙用推進剤と推進システムの実現に着実に近づいてきていると考える。今後は各技術の基盤を確立していくとともに、スラスタ燃焼試験に基づく推進性能の実証を行い、衛星用スラスタとしての成立性を明らかにする。

以上の研究開発を通して、超小型衛星での利用を見据えた革新的スラスタの試作および実証試験に繋がる知見、技術が蓄積された。これらは従来技術とは一線を画する次世代技術であり、本研究活動により成果を着実に獲得してきている。今後の活動においても当該分野に大きな影響を及ぼすことが期待される。

令和6年1月  
高エネルギー物質研究会  
年次報告書編集委員会

## 目次

1. 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，伊東山 登，松本 幸太郎，塩田 謙人，伊里 友一郎，勝身 俊之， 羽生 宏人，野田 賢，三宅 淳巳 .....	1
2. 高エネルギーイオン液体推進剤を適用した化学スラストの開発 松本 幸太郎，勝身 俊之，伊東山 登，松永 浩貴，羽生 宏人 .....	5
3. 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，佐藤 寛，伊藤 尚義，勝身 俊之，松岡 健，笠原 次郎 .....	9
4. 低毒性一液推進剤の触媒点火特性向上のための添加物選定に関する実験的研究 伊藤 尚義，川端 健心，早田 和義，濁川 淳，得丸 翔平，勝身 俊之，門脇 敏 .....	13
5. ADN 系イオン液体の電圧印加型燃焼器を用いた燃焼試験 大森 稜介，伊東山 登，塩田 謙人，伊里 友一郎，三宅 淳巳 .....	17
6. アンモニウムジニトラミド/アセトアミド/モノメチルアミン硝酸塩混合系の燃焼 速度および燃焼温度の圧力依存性 古野 岳，塩田 謙人，伊里 友一郎，松永 浩貴，加藤 貴史，三宅 淳巳 .....	21



# 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<sup>\*1</sup>, 伊東山 登<sup>\*2</sup>, 松本 幸太郎<sup>\*3</sup>, 塩田 謙人<sup>\*4</sup>,  
伊里 友一朗<sup>\*5</sup>, 勝身 俊之<sup>\*6</sup>, 羽生 宏人<sup>\*7</sup>, 野田 賢<sup>\*4</sup>, 三宅 淳巳<sup>\*5</sup>

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

MATSUNAGA Hiroki<sup>\*1</sup>, ITOUYAMA Noboru<sup>\*2</sup>, MATSUMOTO Kotaro<sup>\*3</sup>, SHIOTA Kento<sup>\*4</sup>,  
IZATO Yu-ichiro<sup>\*5</sup>, KATSUMI Toshiyuki<sup>\*6</sup>, HABU Hiroto<sup>\*7</sup>, NODA Masaru<sup>\*4</sup> and MIYAKE Atsumi<sup>\*5</sup>

### ABSTRACT

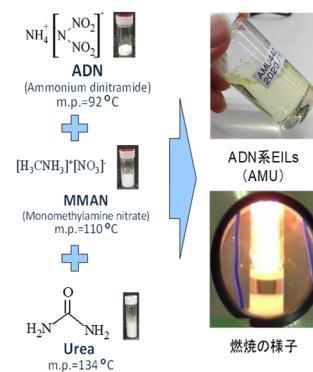
We are conducting research and development of chemical propulsion systems for satellites using ammonium dinitramide (ADN)-based energetic ionic liquids (EILs) as propellants. They are expected to be used as propellants for high-performance and safe nano-satellite propulsion systems. The project aims 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<sup>1,2</sup>。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<sup>3,4</sup>。

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<sup>5,6</sup>。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



第 1 図 ADN 系 EILs

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

<sup>\*1</sup> 防衛大学校 応用科学群 応用化学科  
(Department of Applied Chemistry, National Defense Academy)

<sup>\*2</sup> 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)

<sup>\*3</sup> 日本大学 生産工学部 機械工学科  
(Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University)

<sup>\*4</sup> 福岡大学 工学部 化学システム工学科  
(Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

<sup>\*5</sup> 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)

<sup>\*6</sup> 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)

<sup>\*7</sup> 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)<sup>5)</sup>である。AMUは化学安定性<sup>5)</sup>や材料適合性<sup>7)</sup>に優れ、NASA-CEA<sup>8)</sup>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<sup>9)</sup>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中でス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。

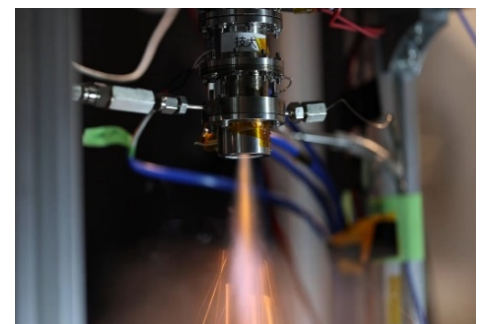
### 2.2 EILs向け新規スラスタシステムの構築

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。

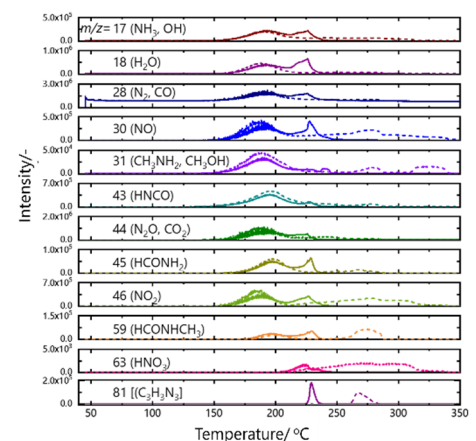
一つ目の手法は, 触媒および熱源による点火を用いるスラスタである。インジェクタで微粒化したEILsを加熱した触媒層に吹き付けることで分解および燃焼を引き起こす方式である。昨年度までに, 川端ら<sup>9)</sup>はAMUに過酸化水素水を添加することで微粒化が可能となり, 予熱した白金触媒への噴射で着火することを示した。また, 伊東山ら<sup>10)</sup>はAMU自身の発熱分解を促進する触媒の探索を熱重量-示差熱分析(TG-DTA)により実施し, Rh触媒による促進が顕著であることを報告した。本年度は, AMUの物性(粘度, 表面張力)が噴霧特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし, 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H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>の生成が顕著になり, Rh触媒によるMMANの発熱分解, HNO<sub>3</sub>が寄与する発熱反応の促進が示唆された(第4図)<sup>11)</sup>。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)<sup>12)</sup>。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<sup>13)</sup>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<sup>11)</sup>

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）<sup>14)</sup>。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<sup>15)</sup>。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<sup>16)</sup>。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<sup>17)</sup>。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<sup>18,19)</sup>。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<sup>20)</sup>を進めている。

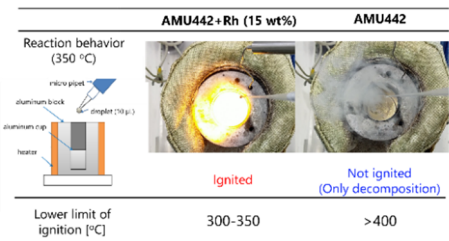
### 2.3 ADN系 EILs 組成の最適化

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<sup>21)</sup>、ADN の分解機構<sup>22-24)</sup>、ADN との反応性に及ぼす可燃剤の影響<sup>25,26)</sup>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 NO<sub>2</sub> 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<sup>27)</sup>、ホルモヒドラジド<sup>28)</sup>、HEHN<sup>29)</sup>は、AMU の尿素と比べて NO<sub>2</sub> 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<sup>30-33)</sup>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。

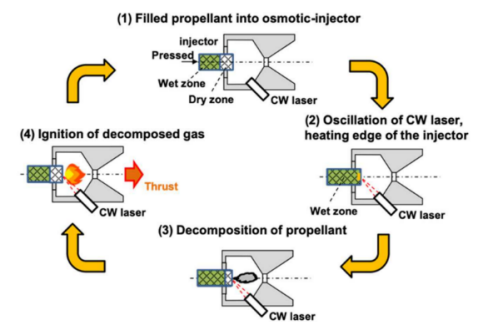
## 3. ま と め

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。

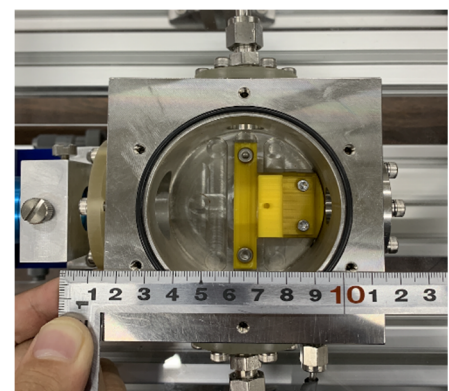
本研究会による高エネルギー物質研究活動は、2009 年度から継続して実施してきており、その成果は「高エネルギー物質研究会成果報告」として 2010 年度から毎年報告している。また昨今は、本研究成果は前述する低軌道衛星への応用



第5図 Rh 添加による AMU の着火性向上<sup>12)</sup>



第6図 レーザー点火スラスタの概念図<sup>14)</sup>



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. 34<sup>th</sup> 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. 34<sup>th</sup> 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, 26<sup>th</sup> 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, 7<sup>th</sup> 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).

# 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<sup>\*1</sup>, 勝身 俊之<sup>\*2</sup>, 伊東山 登<sup>\*3</sup>, 松永 浩貴<sup>\*4</sup>, 羽生 宏人<sup>\*5</sup>

## Development of Chemical Thrusters applying High Energetic Ionic Liquid Propellants

MATSUMOTO Kotaro<sup>\*1</sup>, KATSUMI Toshiyuki<sup>\*2</sup>, ITOUYAMA Noboru<sup>\*3</sup>, MATSUNAGA Hiroki<sup>\*4</sup>  
and HABU Hiroto<sup>\*5</sup>

### 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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。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<sup>4)5)</sup>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<sup>3)</sup>や高性能組成の探索<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>やレーザ点火<sup>9)</sup>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、大学研究室内の小規模

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

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

<sup>2)</sup> 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)

<sup>3)</sup> 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)

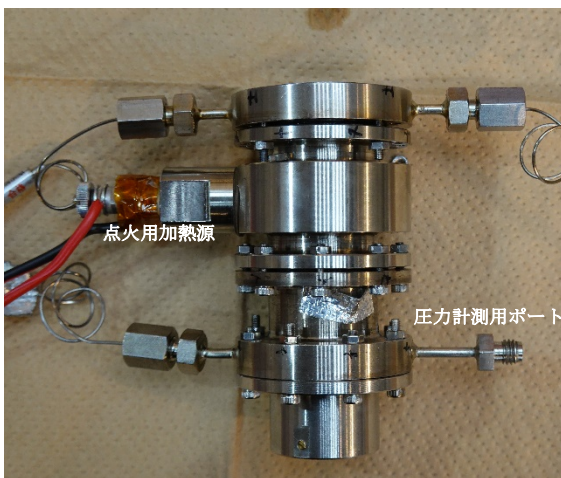
<sup>4)</sup> 防衛大学校 応用科学群 応用化学科  
(Department of Applied Chemistry, National Defense Academy)

<sup>5)</sup> 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)

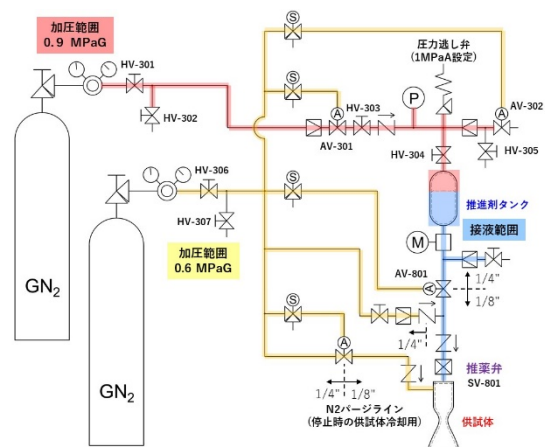
試験や JAXA あきる野実験施設での燃焼試験を計画・実施している。本報告では ADN 系 EILs を推進剤とした化学スラスタ地上燃焼試験の実施状況及び実証計画について纏める。

## 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。



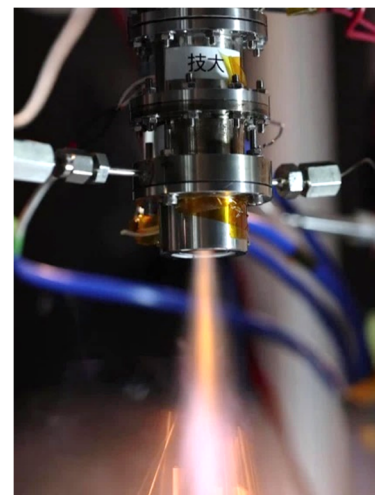
第 1 図 スラスタ供試体の外観(第 1 次試験)



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<sup>9)</sup>、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<sup>9)</sup>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).

# 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<sup>\*1</sup>, 佐藤 寛<sup>\*2</sup>, 伊藤 尚義<sup>\*3</sup>, 勝身 俊之<sup>\*3</sup>, 松岡 健<sup>\*2</sup>, 笠原 次郎<sup>\*1</sup>

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

ITOUYAMA Noboru<sup>\*1</sup>, SATO Tomoki<sup>\*2</sup>, ITO Hisayoshi<sup>\*3</sup>, KATSUMI Toshiyuki<sup>\*3</sup>, MATSUOKA Ken<sup>\*2</sup> and KASAHARA Jiro<sup>\*1</sup>

### 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<sup>1)</sup>。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<sup>2),3)</sup>。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<sup>3)</sup>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)

<sup>\*1</sup> 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)

<sup>\*2</sup> 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)

<sup>\*3</sup> 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。

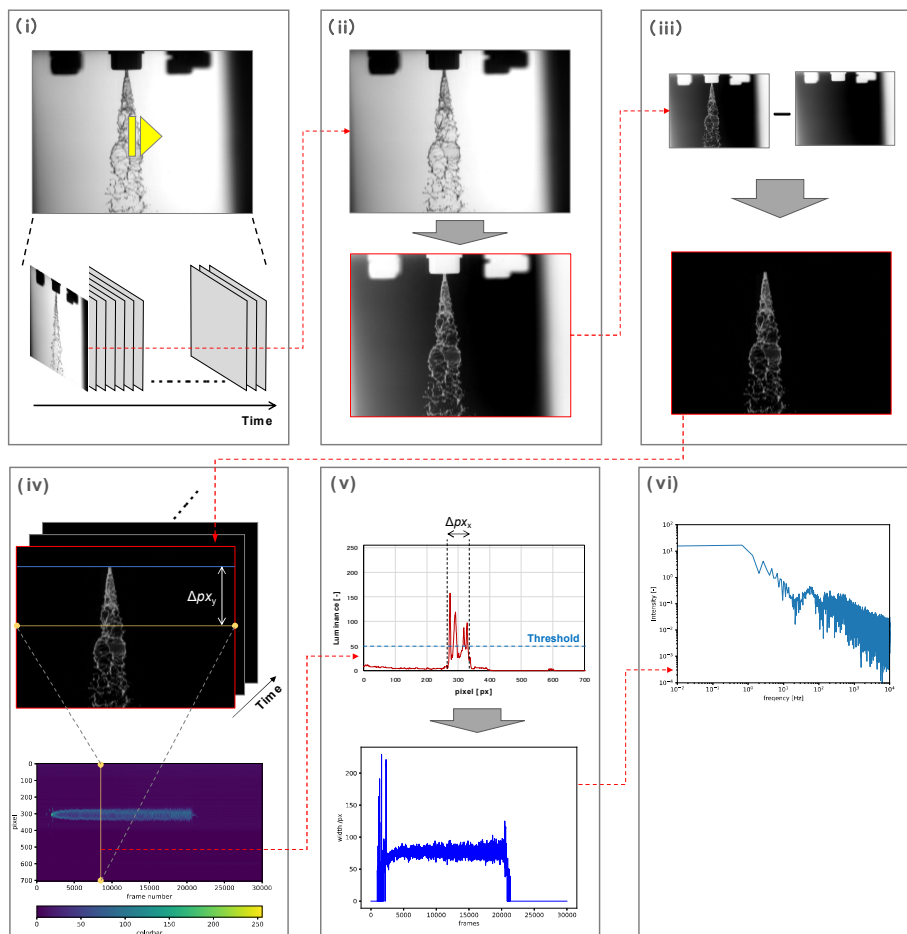
本研究グループでは、既報のハイスピードカメラの観察結果に対して画像解析手法を導入することで、噴霧体の脈動をはじめとする微粒化特性に対する考察を現在進めている。本稿ではその手法や結果、現在までの考察などを紹介する。

## 2. 実験系と解析手法

本実験の詳細については既報<sup>3)</sup>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。

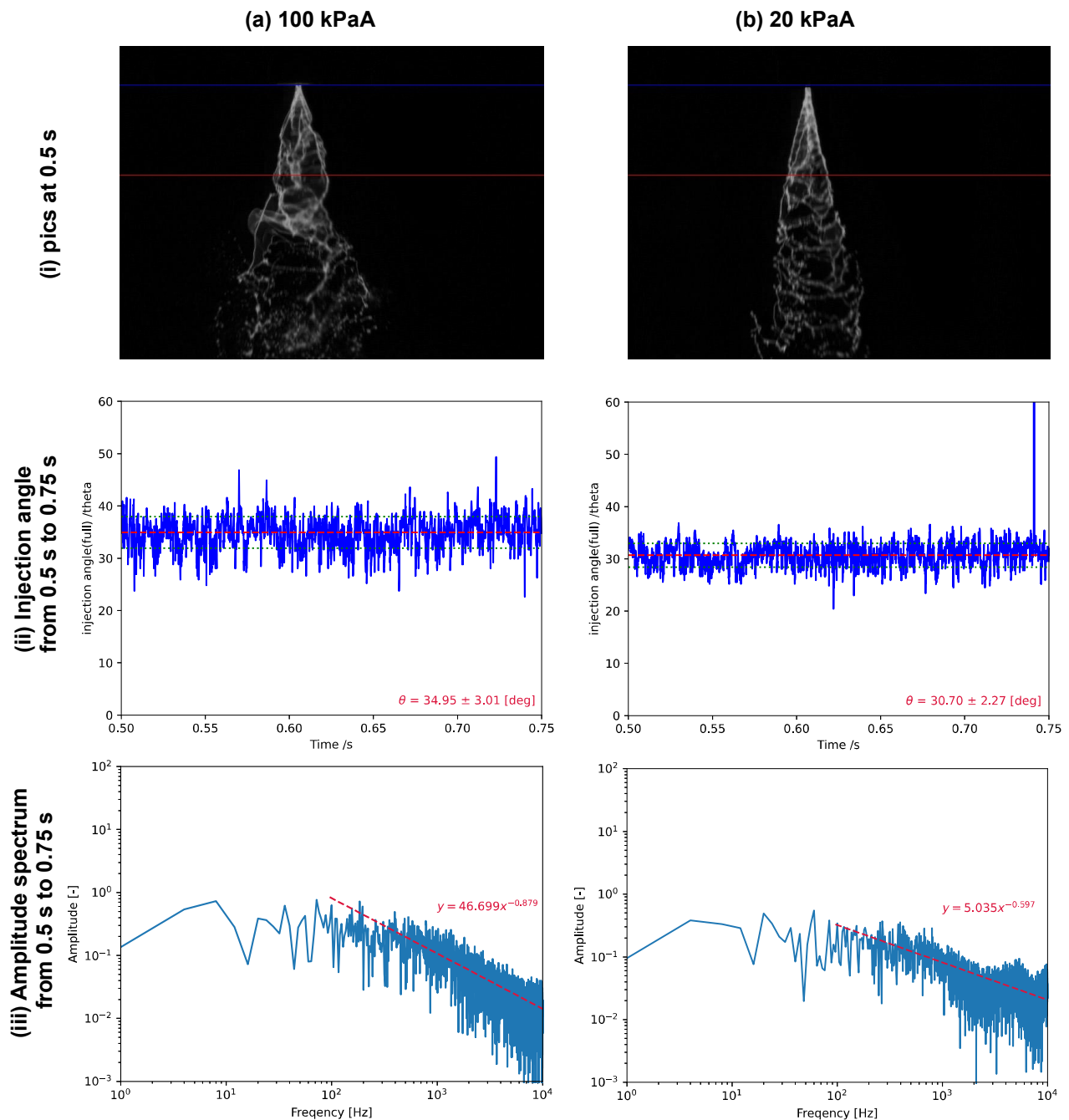
つづいて、図2中(ii)に示す噴霧角の時間履歴に着目する。赤破線のプロットが噴霧開始後 0.5 s から 0.75 s までの平均値、緑点線・黄色で塗られた領域が平均値を中心とする標準偏差の範囲 ( $1\sigma$ ) に相当する。噴霧開始後 0.5 s から 0.75 s を対象とした理由は、質量流量計測や圧力履歴からこの領域が定常状態の噴霧が進行していると判断されたためである。各図右下に示す平均値および  $1\sigma$  を比較すると、環境圧 100 kPa.abs における噴霧角と標準偏差はどちらも環境圧 20 kPa.abs の結果よりも大きくなる傾向になった。標準偏差は対象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  $\mu$ 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<sup>2)</sup>。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<sup>4)</sup>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, 52<sup>nd</sup> 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. 34<sup>th</sup> 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).

# 低毒性一液推進剤の触媒点火特性向上のための添加物選定に関する 実験的研究

伊藤 尚義<sup>\*1</sup>, 川端 健心<sup>\*1</sup>, 早田 和義<sup>\*1</sup>, 濁川 淳<sup>\*2</sup>, 得丸 翔平<sup>\*2</sup>,  
勝身 俊之<sup>\*3</sup>, 門脇 敏<sup>\*4</sup>

## Experimental Study on Improvement of Catalytic Ignition Characteristics of Green Monopropellant by Additive Materials

ITO Hisayoshi<sup>\*1</sup>, KAWABATA Kenshin<sup>\*1</sup>, HAYATA Kazuyoshi<sup>\*1</sup>, NIGORIKAWA Jun<sup>\*2</sup>,  
TOKUMARU Shohei<sup>\*2</sup>, KATSUMI Toshiyuki<sup>\*3</sup> and KADOWAKI Satoshi<sup>\*4</sup>

### ABSTRACT

This report introduces the experimental study on improving the catalytic ignition characteristics of green monopropellants for RCS thruster systems conducted at Nagaoka University of Technology. Our group focuses on two candidates for green monopropellants: HAN (Hydroxyl ammonium nitrate)-based SHP163 propellants and ADN (Ammonium dinitramide)-based AMU propellants. To improve the catalytic ignition characteristics of those propellants, some additive materials are tested. Acetone was added to SHP163 to improve its atomization characteristics, and hydrogen peroxide was added to AMU631 to improve its combustion efficiency. The injection test of acetone-adding SHP163 revealed how the ambient density and the saturation vapor pressure of the propellant affect the breakup mechanism of propellant flow from the injector. The thruster combustion test of hydrogen peroxide-adding AMU631 revealed the influence of additive material on the combustion characteristics and appropriate hydrogen peroxide additive ratio.

**Keywords:** Green Propellant, Hydroxyl Ammonium Nitrate, Ammonium Dinitramide, Thruster, Ignition, Atomization

### 摘 要

長岡技術科学大学の研究グループでは、ヒドラジンに替わる低毒性推進剤の開発のため、HAN (Hydroxyl Ammonium Nitrate) または ADN (Ammonium Dinitramide) を基剤とした高エネルギー液体に着目し研究を行っている。これらの液体を推進剤として実用化するためには燃焼効率の向上が求められるため、推進剤液体に添加物を加えることで各種の特性を改善し、反応性向上につなげることを目的とした実験的研究として、混合液系の飽和蒸気圧上昇によってフラッシングによる微粒化促進を目的としたアセトン添加 SHP163 の噴射実験と、粘度低下による微粒化促進のために添加した過酸化水素水による触媒燃焼特性の変化の調査を目的とした過酸化水素水添加 AMU631 の触媒スラスト燃焼実験を実施した。これらの結果より、添加物が推進剤の噴射・燃焼特性に与える影響の評価を行い、推進剤の特性改善とスラスト性能向上のための添加物の種類および添加量の選定指針を検証した。

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

<sup>\*1</sup> 長岡技術科学大学 大学院 工学研究科  
(Graduate School of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

<sup>\*2</sup> 長岡技術科学大学 工学部  
(School of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

<sup>\*3</sup> 長岡技術科学大学 機械系  
(Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

<sup>\*4</sup> 長岡技術科学大学 システム安全系  
(Department of System Safety Engineering, Nagaoka University of Technology)



## 記号の説明

$L_{bu}$ : 分裂長さ (mm),  $P_a$ : 雰囲気気圧 (kPa),  $R_p$ : 飽和蒸気圧比,  $M$ : 運動量流束比,  $P_c$ : 燃焼圧力 (kPa),  $T_{phu}$ : 予熱層上部温度 (°C),  $T_{bdc}$ : 触媒下部中心温度 (°C),  $T_{bdo}$ : 触媒下部外側温度 (°C),  $T_{nozzle}$ : ノズル温度 (°C)

## 1. はじめに

高性能かつ低毒性、低コストでヒドラジンを代替可能な低毒性一液推進剤の開発は世界的な関心事となっている<sup>1)</sup>。本研究グループでは、高エネルギー物質である Hydroxyl Ammonium-nitrate (HAN:  $\text{NH}_3\text{OH}^+\cdot\text{NO}_3^-$ ) を基剤とした HAN 系一液推進剤、Ammonium Dinitramide (ADN:  $\text{NH}_4^+\cdot\text{N}(\text{NO}_2)_2^-$ ) を基剤とした AMU 系一液推進剤の 2 種類に着目し研究を行っており、HAN 系一液推進剤として HAN, 硝酸アンモニウム, 水, メタノールの 4 成分からなる SHP163, ADN 系一液推進剤として ADN, モノメチル硝酸アンモニウム (MMAN), 尿素の 3 成分からなる AMU 系推進剤を低毒性一液推進剤の候補としている。これらの推進剤はヒドラジンに比べて低毒性かつ反応性が低い安全な物質であるのみならず、比推力をはじめとした性能面でも優れた特性を有する。詳細は既報<sup>2)3)</sup>を参照されたい。反応性の低さはスラスタ燃焼時の反応性の低さという課題点の原因ともなるため、理論通りの性能を発揮することは困難である。そのため、現時点では低毒性一液推進剤スラスタは複数の機関、企業による実証実験の段階に留まっており<sup>4)6)</sup>、ヒドラジン推進剤を置き換えるには至っていない。推進剤をはじめとした液体燃料の燃焼特性を改善させる手法としては、インジェクタ等を用いた燃料液体の微粒化が広く用いられている。しかし、低毒性一液推進剤候補となる物質はいずれも粘度が高く、せん断等の機械力を用いた微粒化には限界がある。推進剤候補物質である SHP163 と AMU631 それぞれの粘度のヒドラジンとの比較を第 1 表に示す。以上の背景から本研究グループでは、推進剤の微粒化特性の向上のための手法として、添加物の添加に着目した。推進剤に添加物を加えることで、添加物による粘度の低下等の物性値の変化によって推進剤の微粒化特性を改善し、スラスタ燃焼室への供給においてより良好な推進剤の噴射を得ることで触媒等に対する反応性を向上させる効果が期待できる。その反面、添加に伴う燃焼特性の変化や、物性値の変化が意図したとおりの効果を微粒化特性や反応性にもたらすのかどうかについては理論計算のみでは予測しきれない部分があるため、実験的研究によってこれを確認する必要がある。本レポートでは、SHP163 に少量のアセトンを添加し、粘度低下および混合液系の飽和蒸気圧上昇によって、減圧雰囲気環境下におけるフラッシング(減圧沸騰)による微粒化促進<sup>9)</sup>を目的としたアセトン添加 SHP163 の噴射実験、ならびに、粘度低下による微粒化促進のために AMU631 に過酸化水素水を添加した場合の触媒燃焼特性およびスラスタ性能の変化の調査を目的とした過酸化水素水添加 AMU631 の触媒スラスタ燃焼実験の 2 つの実験とその結果について報告する。

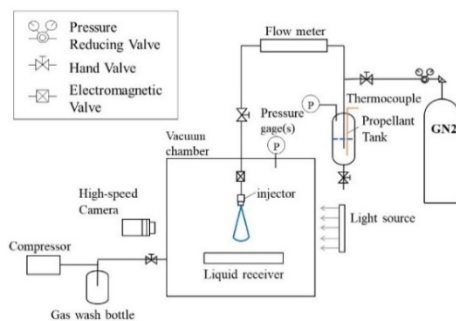
第 1 表 低毒性一液推進剤候補物質粘度比較一覧

	$\text{N}_2\text{H}_4$ <sup>7)</sup>	SHP163 <sup>4,8)</sup>	AMU631 <sup>8)</sup>
Viscosity $\mu$ [Pa·s]	$9.7 \times 10^{-7}$	0.010	0.024

## 2. アセトン添加 SHP163 噴射実験

SHP163 の噴射特性改善のため、アセトンを添加した SHP163 の異なる雰囲気気圧環境下における噴射実験を実施した。アセトン添加の意図は、SHP163 に対して低粘度かつ高飽和蒸気圧の添加物を加えることで、粘度低下による微粒化促進に加えて、スラスタの動作環境である低圧～真空雰囲気環境下において推進剤成分の液相から気相への相転移による気泡核生成を促進し、推進剤噴射のフラッシングによる微粒化<sup>9)</sup>を促進するためである。実験系の概略図を第 1 図に、実験条件を第 2 表に示す。

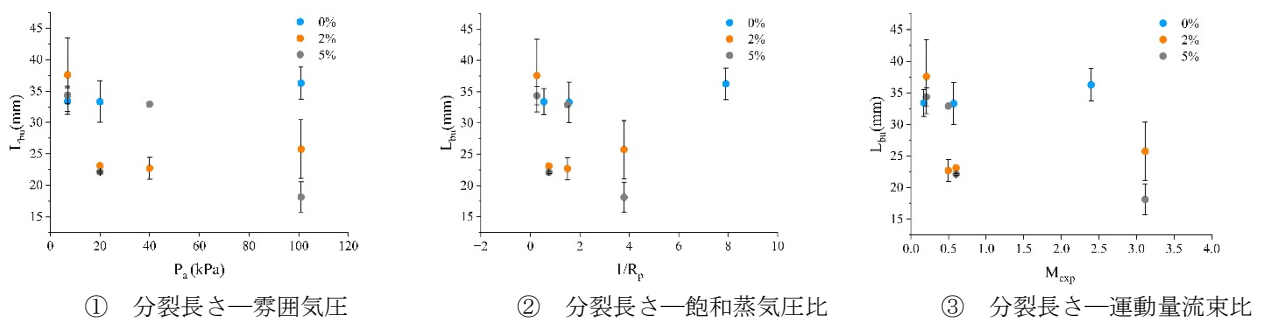
第 1 図 アセトン添加 SHP163 噴射実験系概略



第 2 表 アセトン添加 SHP163 噴射実験実施条件一覧

Propellant	SHP163
Additive ratio	0, 2, 5 (Acetone: wt %)
Feed pressure	800, 720, 700 kPa
Propellant temperature	20°C
Ambient pressure $P_a$	101.3, 20, 7.5 kPa
Nozzle orifice diameter	$\phi 0.79$ mm
Injection time	1.0 s
Frame rate	20000 fps
Injection amount	7.81 mL (Average)

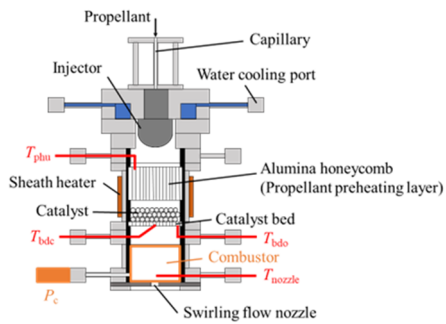
微粒化特性の評価手法としては、噴射された液膜の分裂長さをを用いた。高速度撮影画像の解析により得られた分裂長さの各条件における平均値を①雰囲気気圧、②フラッシングの影響の評価指標である飽和蒸気圧比<sup>10)</sup>、③気液間の力学的影響の評価指標である運動量流束比<sup>11)</sup>、の3つの基準に従い整理した結果を第2図に示す。これらの結果より、雰囲気気圧低下に伴って添加物なしのSHP163の分裂長さは推進剤中のメタノール成分のフラッシングの影響を受け微減した。その反面、アセトン添加SHP163の分裂長さは大気圧環境下ではアセトン添加に伴う粘度の低下によって添加物なしのものよりも10mm~15mm程度短くなる一方で、減圧雰囲気環境下において急激に増大し添加物なしのSHP163とほぼ変わらない結果を示した。この分裂長さ増大は、分裂メカニズムの変化とそれに伴う分裂長さ増大の発生する閾値として提唱されている $M_{crit}=0.5$ の前後<sup>11)</sup>で発生していたことから、アセトン添加SHP163の分裂メカニズムにおいては、粘度の低下に伴い気液間の機械力の影響が添加物なしのSHP163に比べて増加し、この分裂メカニズム変化の影響をより強く受けたと考えられる。このことから、実際にスラストシステムが動作する減圧~真空雰囲気環境下において良好な噴射特性を有する低毒性推進剤の開発のために、このような条件下での推進剤噴流の分裂、微粒化メカニズムについてより詳細な実験的研究を実施することの重要性が明らかになった。



第2図 雰囲気気圧別アセトン添加SHP163噴射実験結果

### 3. 過酸化水素水添加AMU631触媒スラスト燃焼実験

AMU631に濃度60wt.%の過酸化水素水を15wt.%および25wt.%添加した2条件において、宇宙空間を模した真空槽内で触媒スラスト燃焼実験を実施した。試験で使用した触媒スラストを第3図に、詳細な試験条件を第3表に示す。



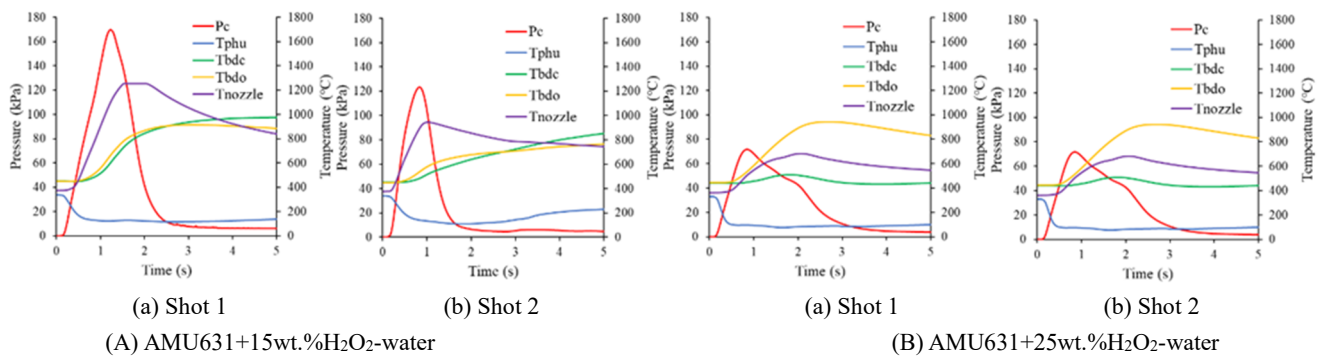
第3図 触媒スラスト

第3表 試験条件

Items	Conditions	
Propellant type	AMU631+ 15wt.%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> water	AMU631+ 25wt.%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> water
Propellant mass-flow rate	5.50 g/s	4.50 g/s
Catalyst	0.5wt.%Pt / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Grain)	
Preheat layer material	Alumina Honeycomb	
Catalyst temperature	450 °C	
Supplying pressure	1000 kPa(Absolute)	
Injection duration	0.5 s	
Nozzle diameter	φ 3.7 mm	
Atmosphere	Vacuum (< 7 kPa)	
Number of Tests	2 shots	

触媒スラスト燃焼実験で取得した測定データを第4図に示す。この測定データを基に算出した力積効率および燃焼圧力上昇速度を第4表に示す。力積効率は推進剤噴射開始から5秒間の積算圧力から算出した力積の実験値を理論力積で除して求めた値で、燃焼性能の評価指標となる。燃焼圧力上昇速度は推進剤噴射開始から終了までの燃焼圧力の上昇量を噴射時間で除して求めた値で、応答性評価指標となる。以上2つの指標を総合的に判断して燃焼特性の評価とする。第4図に着目すると、推進剤供給直後において予熱層上部の温度が低下しているのに対し、触媒下部の温度は上昇していることが分かる。これは予熱層で推進剤が十分に予熱され、触媒によって反応が促進されたことを示唆している。つまり、過酸化水素水の添加により微粒化を促進したことで、推進剤が予熱層を通過する間に予熱が完了したと推測される。そのため、添加物により微粒化を促進することは一定のメリットがあると判断できる。第4表に示した力積効率と燃焼圧力上昇速度に着目すると、過酸化水素水の添加量が15wt.%の場合の方が25wt.%の場合に比べ、両項目ともに優れていることが分かった。ただし、実用化に向けては両項目ともに改善が必須という結果であった。このような課題はあるが、推進剤へ

の熱供給という側面では一定のメリットがあることも判明したため、添加物添加 AMU 推進剤の研究は今後も継続していく価値がある。



第4図 測定データ

第4表 力積効率および燃焼圧力上昇速度

(A) AMU631+15wt.%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -water				(B) AMU631+25wt.%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -water			
	Injection time $t$	Impulse efficiency $\eta_1$	Combustion- pressure rise rate $P_c rate$		Injection time $t$	Impulse efficiency $\eta_1$	Combustion- pressure rise rate $P_c rate$
Shot 1	0.600 s	47.1 %	125.6 kPa/s	Shot 1	0.496 s	43.5 %	88.6 kPa/s
Shot 2	0.394 s	39.5 %	151.3 kPa/s	Shot 2	0.494 s	38.0 %	92.7 kPa/s
Average	—	43.3 %	138.5 kPa/s	Average	—	40.8 %	90.7 kPa/s

## 4. おわりに

低毒性一液推進剤の反応性向上のための添加物による微粒化特性改善の実験的研究として、アセトン添加 SHP163 の噴射実験と過酸化水素水添加 AMU631 の触媒スラスト燃焼実験の2つの実験を実施した。アセトン添加 SHP163 の噴射実験において、添加物の添加により推進剤の粘度を低下させることで大気圧雰囲気環境下において微粒化を促進させることが実証された。一方で減圧雰囲気環境下においては、粘度低下によって分裂メカニズムに占める機械力の影響が増加したことで、減圧による雰囲気密度の低下に起因する気液間の運動量流束比低下の影響を強く受け、分裂が抑制されるという結果を示した。以上より、今後は減圧雰囲気環境下において微粒化を促進するための手法について、フラッシングの影響と運動量流束比の影響の双方を考慮してより有効な手法を探索していく方針である。過酸化水素水添加 AMU631 の触媒スラスト燃焼実験において、添加物の添加により微粒化を促進することで、推進剤に熱が入りやすくなるメリットがあることが判明した。一方で、今回の条件では実用化が視野に入る燃焼特性は得られなかったため、今後は触媒種の検討などにより燃焼特性の改善を図っていく方針である。

## 参考文献

- Witze, Alexandra. Green fuels blast off. Nature. 2013, vol. 500, no. 7464, p. 509–510. <https://doi.org/10.1038/500509a>.
- Matsunaga, Hiroki, Itakura, Masataka, Shiota, Kento, Izato, Yu-ichiro, Katsumi, Toshiyuki, Habu, Hiroto, Noda, Masaru, Miyake, Atsumi. Research and development of high energy and low toxic propellant using ionic liquids. JAXA Research and Development Report: Technical Report of The Research Activity for High Energy Materials. 2016, vol. JAXA-RR-15-004, p. 1–8.
- Katsumi, Toshiyuki, Furusawa, Masaya. Feasibility study on ignition of green monopropellant using a pulse laser. JAXA Research and Development Report: Technical Report of The Research Activity for High Energy Materials. 2017, vol. JAXA-RR-16-006, p. 13–20.
- Katsumi, Toshiyuki, Hori, Keiichi. Successful development of HAN based green propellant. Energetic Materials Frontiers. 2021, vol. 2, p. 228–237.
- Persson, Staffan, D'Amico, S., Harr, J. “Flight results from prisma formation flying and rendezvous demonstration mission”. 61st International Astronautical Congress 2010, IAC 2010. prague, 2010, p. 446–457.
- McLean, Christopher H., Marotta, Brian, Tennant, Scott, Smith, Tim A., Sheehy, Jeffrey A. “Green propellant infusion mission: Program construct, technology development, and mission results”. AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. VIRTUAL EVENT, 2020, p. 1–23.
- Japan Ministry of Health, Labor and welfare. “Safety data sheet (Hydrazine)”. <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/0056.html>, (参照 2022-12-16).
- Ito, Hisayoshi, Kuroda, Yoshito, Omatsu, Raiki, Hanzawa, Keisuke, Katsumi, Toshiyuki, Kadowaki, Satoshi. “Research on Atomization Characteristics of Green Propellant Candidates”. The 32nd International Symposium on Space Technology and Science. 2019.
- Sher, Eran, Bar-Kohany, Tali, Rashkovan, Alexander. “Flash-boiling atomization”. Progress in Energy and Combustion Science. 2008.
- Bar-Kohany, Tali, Levy, Moti. “State of the art review of flash-boiling atomization”. Atomization and Sprays. Begell House Inc., 2016.
- Fernandez, V. G., Berthoumie, P., Lavergne, G. “Liquid sheet disintegration at high pressure: An experimental approach”. C.R. Mecanique. 2009.

# ADN系イオン液体の電圧印加型燃焼器を用いた燃焼試験

大森 稜介<sup>\*1</sup>, 伊東山 登<sup>\*2</sup>, 塩田 謙人<sup>\*3</sup>, 伊里 友一朗<sup>\*4</sup>, 三宅 淳巳<sup>\*4</sup>

## Combustion test of ADN based ionic liquids using electrolytic combustor

OMORI Ryosuke<sup>\*1</sup>, ITOUYAMA Noboru<sup>\*2</sup>, SHIOTA Kento<sup>\*3</sup>, IZATO Yu-ichiro<sup>\*4</sup> and MIYAKE Atsumi<sup>\*4</sup>

### ABSTRACT

Ammonium dinitramide (ADN) based energetic ionic liquids (EILs) has been expected as a next HEMs. Since ADN-based EILs are thermally stable, it is difficult to control ignition phenomena using thermal ignition methods. Our research group focused on an ignition method of the EILs by applying a voltage. Previous Studies have theoretically reported the possibility of ignition of ADN-based EILs and experimentally demonstrated the ignition. In order to demonstrate the feasibility of the thruster, it is essential to design a voltage-applied combustor concept and to confirm the generation of thrust. In this report, a conceptual design of a voltage-applied combustor based on the voltage-applied ignition mechanism and combustion tests of EILs using this combustor were conducted. The phenomena that occurred in the voltage-applied combustor were discussed based on the existing voltage-applied ignition mechanism, and the changes over time of the current values obtained from the current measurements conducted simultaneously with the combustion test were also discussed. Furthermore, the feasibility of the thruster concept was discussed based on the thrust measurement results.

**Keywords:** High energetic materials, Ammonium dinitramide, Electrolysis, Ignition

### 1. はじめに

アンモニウムジニトラミド (ADN) を基剤としたエネルギーイオン液体 (EILs) は、取扱いが高く次世代エネルギー物質として期待されている<sup>1,2)</sup>。しかし、ADN系EILsは、従来の熱的な着火手法では着火制御が困難であるという課題がある。本研究グループでは、任意のタイミングで着火させることを期待して電圧印加により推進剤を分解・着火させる手法 (電圧印加着火手法) を提案し、電圧印加着火スラスタの開発に向けた基礎研究を実施してきた。先行研究では、計算的検討から ADN系EILsが着火する可能性を示し<sup>3)</sup>、実験的に着火する組成の存在を明らかにしてきた<sup>4,5)</sup>。さらに、第1図に示すように、スラスタ燃焼器試験により、EILsの中でも有望な組成である ADN とヒドロキシルエチルヒドラジニウム硝酸塩 (HEHN) の混合系である ADN/HEHN の着火・燃焼の確認に至った。当該スラスタの実現可能性を示すためには電圧印加型燃焼器の概念設計及び推力発生の確認が必要不可欠である。本発表では、電圧印加着火メカニズムに基づく電圧印加型燃焼器の概念設計及び当該燃焼器を用いた EILs の燃焼試験を実施した。電圧印加型燃焼器にて生じた現象を、燃焼試験と同時にいった電流測定にて取得した電流値の経時変化を既往の電圧印加着火メカニズムに基づいて考察した。さらに、推力測定結果を基にスラスタ概念の成立性について議論した。



第1図 燃焼器での着火の様子

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

<sup>\*1</sup> 横浜国立大学 大学院 環境情報学院  
(Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University)

<sup>\*2</sup> 名古屋大学 未来材料・システム研究所  
(Institute of Materials and Systems, Nagoya University)

<sup>\*3</sup> 福岡大学 工学部 化学システム工学科  
(Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

<sup>\*4</sup> 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)



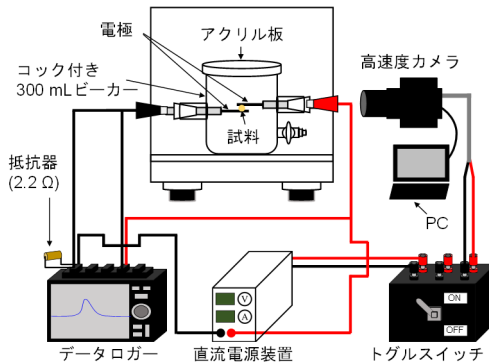
## 2. 実験方法

### 2.1 ADN系EILsの着火メカニズム解明に向けた電圧印加時における電流・温度・可視同時測定

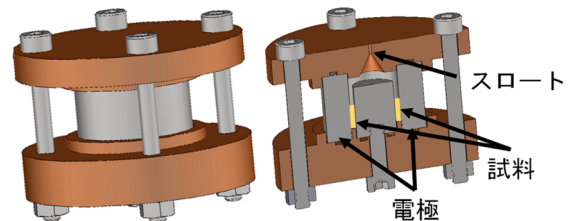
EILs 組成には、ADN と HEHN の等モル混合系 (ADN/HEHN) を用いた。ADN は細谷火工製のものを用い、HEHN は、Sigma Aldrich 製の 2-Hydroxyethylhydrazine (98 wt%) と富士フィルム和光純薬製の硝酸 (60 wt%) を等モル比で合成した。電圧印加試験の概略図を第 2 図に示す。電極は耐腐食性に優れる白金線 ( $\phi$  0.5 mm) を選定し、コック付き 300 mL ガラス製ビーカーの中央部に、2本の電極が平行になるよう上下に設置した。両電極に接触するよう、2本の電極の間に  $3\ \mu\text{L}$  の試料を設置した。電極間距離は約 1.5 mm に設定した。直流電源装置は松定プレジジョン製の POPF120-2.5 を使用した。電圧印加した際の試料の様子を Photron 製の高速カメラ FASTCAM Mini AX 100 を用い、撮影速度は 3000 fps、解像度は  $1024 \times 1024$  とした。電流値は電圧印加装置と直列に接続した抵抗 ( $2.2\ \Omega$ ) にかかる電圧をデータロガーにて取得 (サンプリング間隔 1 ms) し、オームの法則から算出した。温度測定は OMEGA 製の K 型熱電対の CHAL-002 (線径 0.05 mm) を使用し、試料の中心部に設置して測定した。なお、高速カメラにより撮影した映像と出力される電流・温度データの同期をとるため、電圧印加とデータサンプリング及びカメラ撮影はトグルスイッチを用いてトリガー信号を与えることで測定を開始した。また、安全性の確保のため電圧印加試験容器を空気雰囲気下のデンケータ内に設置して実験を行った。

### 2.2 電圧印加型燃焼器の設計及び電流・電圧・推力同時測定

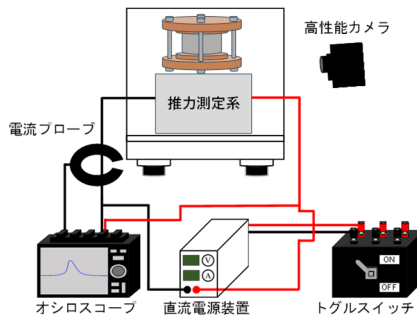
EILs 組成は 2.1 と同様のものを用いた。2.1 の結果から、電圧印加着火メカニズムから、試料と電極の接触が広くかつ安定し、抵抗値が低下しやすい燃焼器設計が反応の進行を支援することが明らかになった。また、既往の取り組みにおいて電極と試料の接触面積を安定して大きく確保することで試料抵抗が低下し、電流値が上昇し、迅速に着火することが明らかになっている<sup>9)</sup>。以上より、第 3 図に示すように外筒電極と内筒電極が同心円状の 1 mm の隙間が出来るように設置した電圧印加型燃焼器を設計した。第 4 図に電圧印加型燃焼器を用いた燃焼試験系を示す。電圧印加型燃焼器の電極間に ADN/HEHN をマイクロピペットを用いて  $100\ \mu\text{L}$  採り、挿入した。スロートの直径は 2.5 mm とした。電源装置は直流電源装置を使用し、電圧を 30 V とした。電流は電流プローブ (GWINSTEK GCP-100) を用いて測定し、電流・電圧・推力データはオシロスコープにて記録した。燃焼試験の様子を高性能カメラにて撮影した。第 5 図に推力測定系を示す。3D プリンタにて作成した土台の四隅をばね (ばね定数:0.5 N) で支え、燃焼器から発生した推力によって縮んだばねの長さをレーザー変位計 (Omron, ZX2) を用いて取得した。校正の結果をもとに取得した変位を推力に換算した。



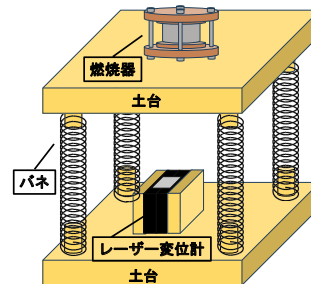
第 2 図 電流・温度・可視同時測定の概要図



第 3 図 電圧印加型燃焼器の概要 (左: 全体, 右: 断面図)



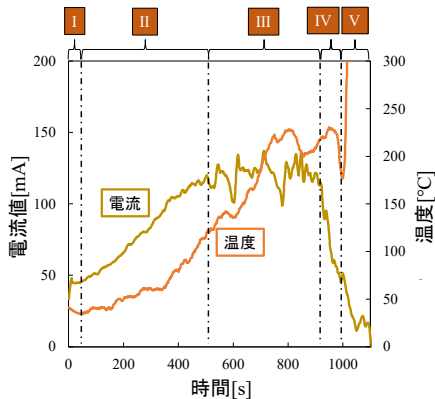
第 4 図 電圧印加型燃焼器を用いた電流・電圧・推力同時測定系の概要図



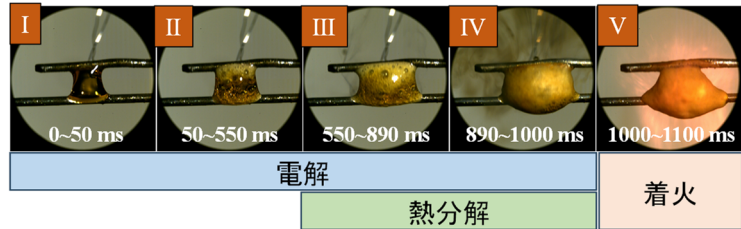
第 5 図 推力測定系

### 3. 結果・考察

#### 3.1 ADN系EILsの着火メカニズム解明に向けた電圧印加時における電流・温度・可視同時測定



第6図 電圧印加による温度・電流測定結果



第7図 電圧印加によるADN/HEHNの着火過程

第6図にADN/HEHNの電圧印加による温度・電流測定結果を示す。測定した電流・温度データより、電圧印加によるADN/HEHNの分解・着火現象を5つのステージに分割した。第7図に電圧印加によるADN/HEHNの着火過程を示す。Stage Iでは電解反応による気泡の生成が生じ、Stage IIではジュール熱及び電解生成物同士の反応熱による温度上昇、温度上昇に伴うイオン液体の電気伝導度の上昇による電流値の上昇、気泡生成頻度の上昇が確認された。Stage IIIでは試料温度がADN/HEHNの熱分解開始温度である170℃を上回り熱分解反応が開始し、急激な温度上昇及び激しい気泡の生成・破裂が生じた。Stage IVにて急激なガス化が生じ、Stage Vでは気相の可燃性混合気に着火し、試料の全てが燃焼した。以上より、本現象は電解・熱分解が複雑に相互作用しながら進展すること、電流・温度は反応進展を支配するパラメータであることが明らかになった。

#### 3.2 電圧印加型燃焼器の設計及び電流・電圧・推力同時測定

第8図に電圧印加型燃焼器におけるADN/HEHNの燃焼の様子を示す。電圧印加から約0.485s後にスロートから白煙が吹き出し始め、1.590s後に着火し、同時に火炎が噴出した。火炎は300msの間噴出し続け、1.891s後に消炎した。

第9図に電圧印加開始を0sとしたときの電流・電圧の経時変化を示す。図中に示されている火炎のマークの範囲にて火炎を確認した。電流値は電圧印加直後から0.144sかけて最小値である0.572Aまで減少した。その約0.5s後に2.5Aまで上昇し、1.753sまで電流値はほぼ一定値で継続した。一方、電圧値は電流値が2.5A付近で安定し始めた直後から減少し始めた。これは使用した電源装置の定格電流値である2.5Aの超過を防ぐために電源装置が定電圧モードから定電流モードに切り替わったことが原因である。1.754sで電流値は約2.5Aから約1.8Aまで急激に減少し、1.891sで消炎した。消炎した後も電流値は減少、増加を繰り返した。先に提案した電圧印加着火メカニズムから考えると電圧印加直後に電流値が減少すること、消炎した後も電流値が増減している点が異なる。着火メカニズムは液滴との接触面積の変動が小さい液滴試験に基づいており、燃焼器は電極と試料の接触面積が大きい。そこで、試料と電極の接触に大きく影響を受ける抵抗値の経時変化から考察する。

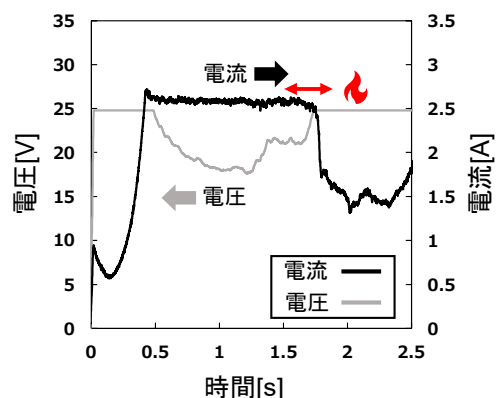
第10図に電圧・抵抗の経時変化を示す。図中に示されている火炎のマークの範囲にて火炎を確認した。電圧印加直後、抵抗値が約0.1s間に15Ωから30Ωまで急激に上昇している。これは、電解反応により生成した気泡が電極表面を覆い、試料と電極の接触面積が減少した事が原因と考えられる。接触面積が大きく初期抵抗が小さい分、抵抗上昇の傾向が大きく発現したと考えられる。つまり、着火メカニズムに対して電極と試料の接触面積の影響は大きいと言える。また、消炎した1.891s以降の抵抗値を見ると、抵抗値は上昇しているが最大抵抗値の1/3である10Ω付近を上下していることが分かる。これは電極間に導体が存在していることを示しており、試験後の燃焼器内に褐色の液体残渣が確認されたことから導体はこの液体残渣であると考えられる。仮に完全燃焼した場合、残渣は残らずに提案したメカニズムに沿うと考えられる。

第11図に推力の経時変化を示す。図中に示されている火炎のマークの範囲にて火炎を確認した。これは、得られた変位データを校正結果から推力に変換し、ノイズ除去のために移動平均をとったものである。ここで、「推力の発生」を「推力値の最大値である15mNの20%である3mNに達すること」と定義する。推力の発生によりばねが振動するため、推力が上下している。着火を確認した1.590sから0.010s後の1.600sに推力が発生した。つまり、本燃焼器は推力を発生させることが可能であることが示された。

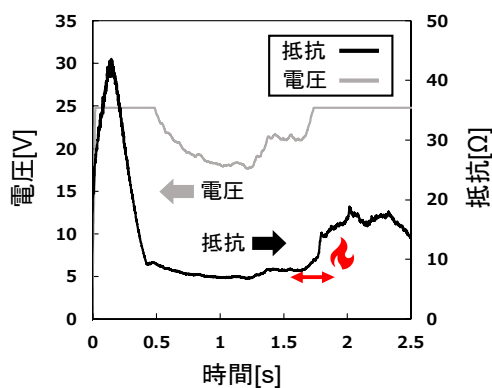
以上より、2.1にて推定した着火メカニズムに基づいて反応が進行して着火に至り、さらに火炎の形成と同時に推力が発生したことから、当該燃焼器の概念成立性が示された。今後は燃焼効率の算出に必要な燃焼室圧力の測定を実施予定である。



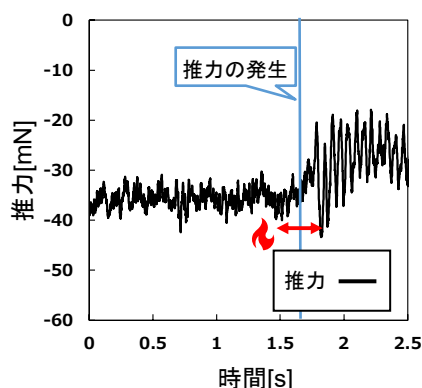
第8図 燃焼試験における着火の様子



第9図 燃焼試験における電流・電圧の経時変化



第10図 燃焼試験における抵抗・電圧の経時変化



第11図 燃焼試験における推力の経時変化

#### 4. まとめ

本発表では、ADN/HEHNの電圧印加着火メカニズムに基づいた電圧印加型燃焼器の設計及び燃焼試験を実施した。ADN/HEHNの電圧印加着火メカニズムや既往の検討をもとに二重円筒形状の電圧印加型燃焼器を設計した。燃焼試験の結果、提案していた電圧印加着火メカニズムでは言及されていなかった、電圧印加直後の抵抗値の急上昇という現象が燃焼器特有の電極表面積の広さに由来して発現した。また、電圧印加型燃焼器にて推力の発生を確認し、当該燃焼器の概念成立性が示された。今後は、真空条件下での本試験の実施による環境圧の影響評価、燃焼圧の測定による燃焼効率の評価及び送液系の設計・構築による定常燃焼試験を実施予定である。

#### 参考文献

- 1) Shiota, K., Itakura, M., Izato, Y., Matsunaga, H., Habu, H., and Miyake, A.: Effect of amide compounds and nitrate salts on the melting point depression of ammonium dinitramide, *Sci. Technol. Energ. Mater.*, **79** (2018), pp.137-141.
- 2) Matsunaga, H., Katoh, K., Habu, H., Noda, M., and Miyake, A.: Preparation and thermal decomposition behavior of high-energy ionic liquids based on ammonium dinitramide and amine nitrates, *Aerosp. Tech. Japan*, **16** (2018), pp.88-92.
- 3) Izato, Y., Matsushita, K., Shiota, K., Miyake, A.: The Electrolysis of Ammonium Dinitramide in Dimethyl Sulfoxide, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **45** (2020), pp.1614-1620.
- 4) 井口喜一郎, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: イオン液体系推進剤の電解着火に及ぼす可燃剤構造の影響, 火薬学会春季研究発表会, No.9 (2020).
- 5) Iguchi, K., Shiota, K., Izato, Y., and Miyake, A.: The Novel Ignition Method via Electrolysis for Ammonium Dinitramide based Energetic Ionic Liquid, *Proc. 33th Int'l Symp. Space Technology and Science (ISTS)*, 2022-A-05 (2022).
- 6) 大森稜介, 久保田悠斗, 井口喜一郎, 伊東山登, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 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, 火薬学会春季研究発表会, No.47 (2022).

# アンモニウムジニトラミド/アセトアミド/モノメチルアミン 硝酸塩混合系の燃焼速度および燃焼温度の圧力依存性

古野 岳<sup>\*1</sup>, 塩田 謙人<sup>\*2,3</sup>, 伊里 友一郎<sup>\*3,4</sup>, 松永 浩貴<sup>\*5</sup>,  
加藤 貴史<sup>\*2</sup>, 三宅 淳巳<sup>\*3,4</sup>

## Pressure dependence of burning rate and temperature of ammonium dinitramide, acetamide, and monomethylamine nitrate mixtures

FURUNO Gaku<sup>\*1</sup>, SHIOTA Kento<sup>\*2,3</sup>, IZATO Yu-ichiro<sup>\*3,4</sup>, MATSUNAGA Hiroki<sup>\*5</sup>, KATO Takafumi<sup>\*2</sup>  
and MIYAKE Atsumi<sup>\*3,4</sup>

### ABSTRACT

This study analyses the effect of ambient pressure on the combustion properties of mixtures of ammonium dinitramide (ADN), monomethylamine nitrate (MMAN) and acetamide (AA) (AMA). This study focused on combustion behavior, burning rate, and combustion temperature as the combustion properties. The mass ratios of AMA samples were ADN/MMAN/AA = 40/40/20 (AMA442), 50/25/25 (AMA422), 60/10/30 (AMA613) and 67/0/33 (AMA201). The combustion behavior was observed by high-speed camera imaging and temperature measurement. The burning rate was calculated from the images. The burning rate of AMA increased with increasing pressure and the dependence of the burning rate on ambient pressure was lower for AMA containing MMAN than for AMA201. The combustion temperature did not show a simple increase with increasing pressure. It was also found that the behavior of the combustion temperature was different for each AMA at pressures above 3 MPa.

**Keywords:** Ammonium Dinitramide, Monomethylamine Nitrate, Acetamide, Burning Speed, Pressure Dependence

### 1. はじめに

我々は、アンモニウムジニトラミド (ADN) を主剤とした共融型の高エネルギーイオン液体系推進剤 (EILPs) の研究開発を行ってきた<sup>1-3)</sup>。現行候補組成は、ADN にモノメチルアミン硝酸塩 (MMAN)、尿素 (Urea) を混合し融点を低下した三成分系 (EILPs) である。新規組成の探索の結果、尿素有二つのアミノ基の一つがメチル基に変わったアセトアミド (AA) が ADN との反応性や融点降下の観点から優れていることが分かってきた<sup>4-5)</sup>。先行研究において、ADN、MMAN、AA 混合系 (AMA) の燃焼特性として、液相にて優先的に進行する ADN と AA の反応とともに、MMAN 由来の反応が燃焼継続に重要であることが分かった<sup>6)</sup>。本検討では、さらなる AMA の燃焼特性の取得を目的として、組成を変更した AMA に対して雰囲気圧力を 3, 4, 5 MPa (絶対圧) とした AMA のストランド燃焼試験を行い、ハイスピードカメラでの撮影および温度測定から先行研究<sup>6)</sup>の結果とあわせて燃焼挙動を解析した。

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

<sup>\*1</sup> 福岡大学大学院工学研究科化学システム工学専攻  
(Graduate School of Engineering, Fukuoka University)

<sup>\*2</sup> 福岡大学工学部化学システム工学科  
(Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

<sup>\*3</sup> 横浜国立大学総合学術高等研究院  
(Institute for Multidisciplinary Sciences, Yokohama National University)

<sup>\*4</sup> 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)

<sup>\*5</sup> 防衛大学校 応用科学群 応用化学科  
(Department of Applied Chemistry, National Defense Academy)

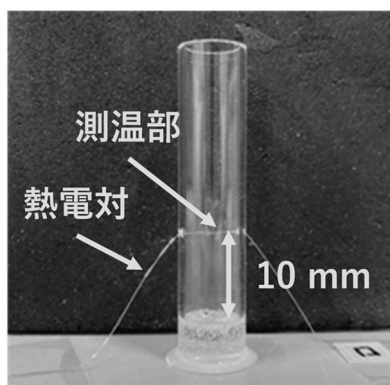


## 2. 実験方法

ADNとMMANは細谷火工製を用いた。AAはシグマアルドリッチの純度99%の試薬を使用した。試料は混合試料中のADNとAAの重量比を2:1に固定し、MMANの重量比を変更したADN/MMAN/AA=40/40/20(AMA442)、50/25/25(AMA422)、60/10/30(AMA613)および67/0/33(AMA201)を用いた。

ストランド燃焼試験は、底面をエポキシ樹脂で蓋をした石英ガラス管（内径9 mm、外径11 mm、高さ50 mm）に推進剤を約1.5 mL充填した。推進剤の液面に浸かる程度に配置したコイル状のニクロム線（φ0.32 mm）を加熱することで試料を着火した。熱電対は線径0.1 mmのR型熱電対を両側に穴を開けた石英管に通し、推進剤底部から10 mmの箇所を設置した。第1図に石英管容器および熱電対接続の様子を示す。熱電対はデータロガー（GRAPHTEC GL980）に接続し、500 μs間隔で記録した。試験圧力に関しては、燃焼器に供給される窒素ガスの流れを燃焼器上流のオリフィスで絞ることで燃焼器内の圧力を変更した。燃焼器内部の圧力が示すデジタル表示機の値が設定圧力になるように、窒素ガスポンペに接続されている圧力調整用バルブを開いた。設定圧力は3, 4, 5 MPa（絶対圧）とした。ハイスピードカメラ（NOBBYTECH PHANTOM MiroC110）の記録から燃焼挙動を取得した。ハイスピードカメラのフレームレートは、500または1000 fpsとした。動画解析から液面後退速度を燃焼速度 $r$  (mm s<sup>-1</sup>)として求め、Vicilleの式(1) ( $\alpha$ は比例定数、 $P$ は雰囲気圧力（絶対圧）(MPa))を用いて各混合比の圧力指数 $n$ を算出した。1, 2 MPaの燃焼速度および燃焼温度は先行研究<sup>6)</sup>の値を用いた。AMA613, 201は1 MPaでは燃焼継続しないため、AMA613, 201では2 MPaの結果のみを使用した。

$$r = \alpha P^n \cdots (1)$$



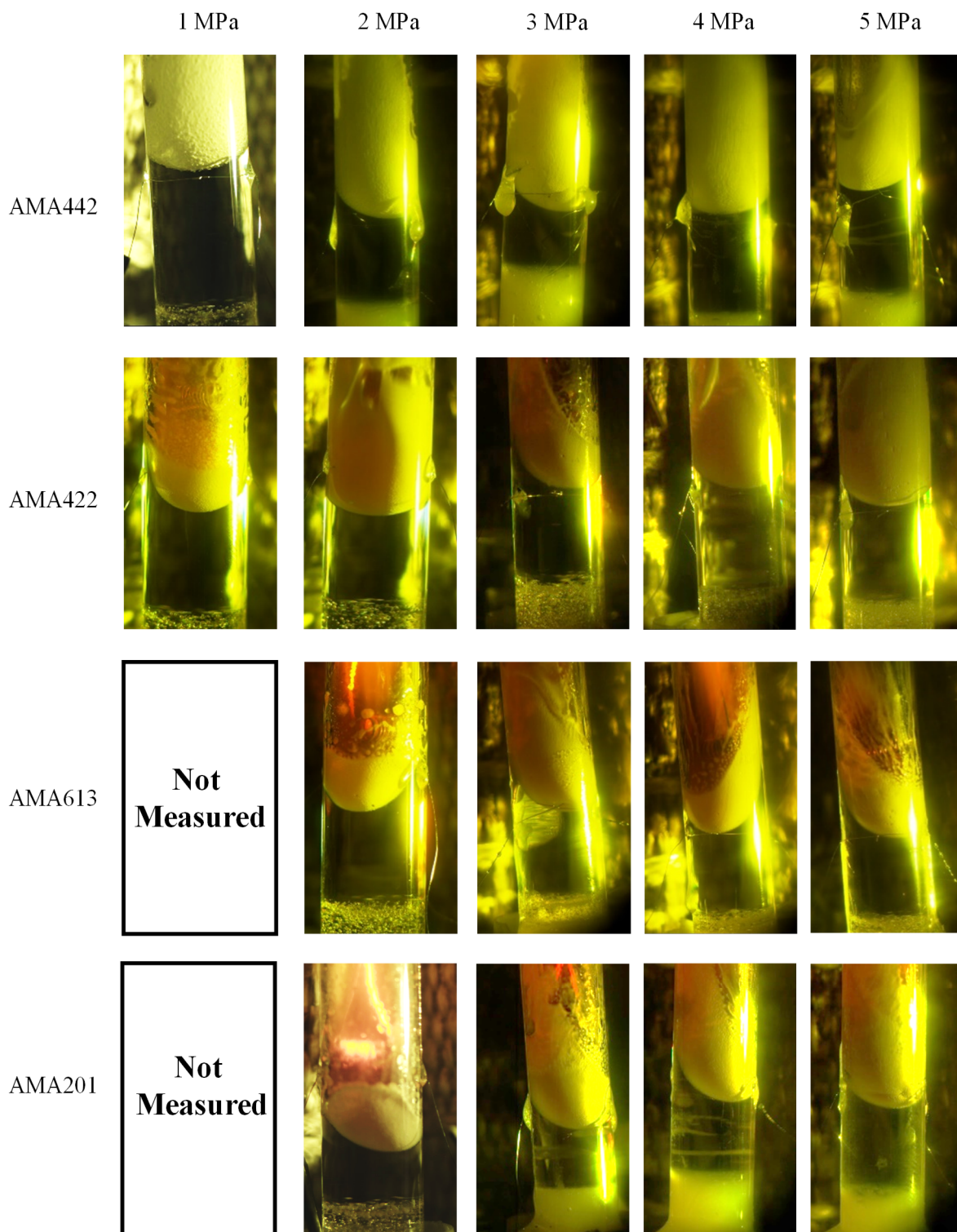
第1図 石英管容器および熱電対の接続外観

## 3. 結果および考察

第2図には、それぞれの圧力での各混合系における石英管内の同程度の位置を通過時の燃焼の様子を示す。すべての燃焼においてバブル層を形成しながら燃焼が進行した。3 MPaでは、AMA442を除いてバブル層の厚みが小さくなっている。AMA613はどの圧力でもバブル層の厚みが小さく、液面がうねりながら反応が進行した。MMANの混合比が一番多いAMA442は燃焼進行時のバブル層の石英管壁面へのせり上がりが安定しており、1-5 MPaまで同じような挙動をしている。バブル層の厚みや形成の仕方にはMMAN由来の反応に関与していると考えられる。この画像からでは気泡の大きさにあまり違いは見られず、唯一AMA442の1 MPaのみ所々に大きな気泡が確認された。

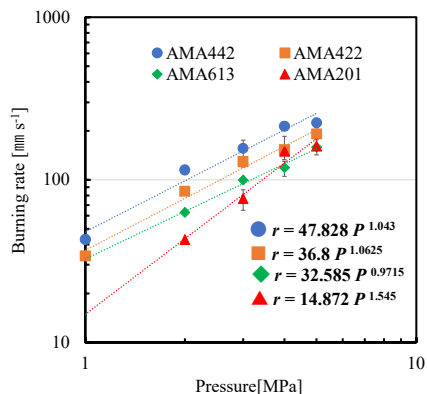
第3図に各混合比の燃焼速度の平均値と圧力の関係および各混合比の圧力指数を示す。どの混合比のAMAにおいても圧力を上げると燃焼速度は増加する傾向となった。圧力指数では、MMANが入っていないAMA201の混合系は他と比較して高く、MMANを入れることで圧力指数が低減することが分かった。また、圧力を上げたことにより、AAやMMANが熱解離した際に生成するモノメチルアミンの蒸発が抑制され吸熱反応の寄与の低下や、これらの物質が液相中で反応することで生じる発熱によって燃焼速度が増加したことが考えられる。AMA442とAMA201では、4 MPa付近でその効果が限定的になっていることが示唆された。

第4図に各混合比のAMAの3 MPa時の燃焼における温度履歴を示す。 $t=0$  sはニクロム線による加熱を開始した時刻である。どの混合比のAMAも同じような挙動を示したが、AMA442以外の組成では400 °C付近にて温度曲線の傾きに変化が見られた。これは熱電対の测温部付近を気液相であるバブル層から気相反応へと変わる部分で傾きに変化がみられたと考えられる。MMANの量が少ないほど傾きの変化が顕著に確認され、AMA442では燃焼速度が速いため他と比較すると変化が見えづらくなっていると考えられる。

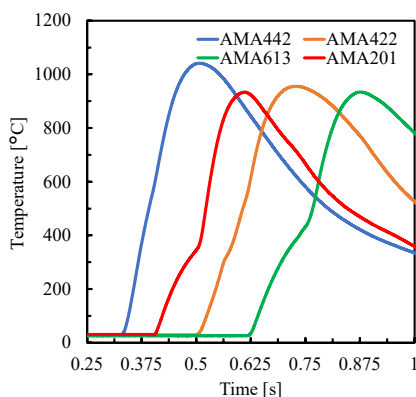


第2図 各圧力での AMA 系の燃焼の様子

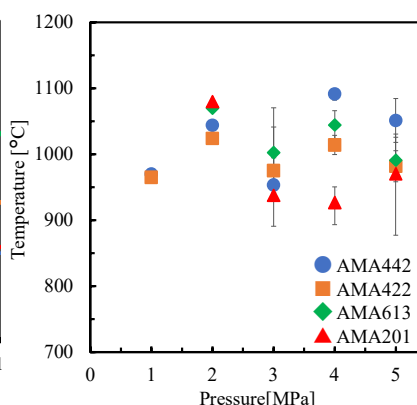
第5図には、燃焼温度の実測値を示す。先行研究<sup>9)</sup>を基に、第5図に示した燃焼における温度プロファイルで最高値に達した温度を燃焼温度とした。燃焼温度では燃焼速度のように単純な圧力依存性は示さなかった。AMA201では2 MPaを最大とし、3-5 MPaでは燃焼温度が低下し、大きな違いは見られなかった。この要因の一つとして、3 MPa以上ではAAの蒸発が抑制され液相反応で消費されることで温度上昇に寄与する気相反応へのAAの関与が低下することが挙げられる。それ以外の組成でも3 MPaで燃焼温度が低下する傾向が確認されたが、AMA442では4、5 MPaでその他より高い



第 3 図 各混合比の燃焼速度の平均値と圧力の関係および各混合比の圧力指数



第 4 図 各混合比の温度履歴



第 5 図 燃焼温度の実測値

温度を示した。この要因として、MMAN の量が多いため、気相反応において MMAN から熱解離から生成される硝酸由来などの酸化剤成分 ( $\text{OH}\cdot$  や  $\text{NO}_2\cdot$ ) と、MMAN の熱解離から生じるモノメチルアミンを含む可燃剤成分との反応が温度上昇に寄与していることが予想される。以上より、燃焼温度では 3 MPa 付近まで AA 由来の蒸発現象や液相反応の影響を大きく受けるが、それ以上の圧力では MMAN の混合比の違いによる MMAN 由来の気相反応も最高到達温度へ影響する要因の一つとして考えられる。

#### 4. 結 論

本検討では、AMA の燃焼特性の理解を深めるため、組成を変更した AMA に対して雰囲気圧力を 3, 4, 5 MPa (絶対圧) とした AMA の燃焼試験を行い、ハイスピードカメラでの撮影、温度測定および先行研究の結果とあわせて燃焼挙動を解析した。燃焼挙動や温度履歴は MMAN 由来の反応の関与からバブル層の形成や温度曲線に違いが見られた。圧力を上げて燃焼を行うと、燃焼速度は増加し、燃焼温度は 2 MPa までは増加傾向にあったが 3 MPa では低下し、それ以降は AMA の組成比で異なる傾向を示した。AMA442 では、4, 5 MPa でその他より高い温度となった。雰囲気圧力が高くなるにつれ、AA や MMAN の熱解離から生じるモノメチルアミンの蒸発が抑制され、それらが液相で発熱反応に使用されることによって燃焼速度が増加したと考えられる。また、液相反応でこれらの燃料成分が消費されることによって、温度上昇に寄与する反応が抑制された可能性が挙げられ、雰囲気圧力が増加した燃焼温度には MMAN の混合比が影響していると考えられた。MMAN を加えることで燃焼速度に対する圧力指数が ADN/AA に比べて低下することや 3 MPa 付近を境に燃焼温度に与える AA と MMAN の影響の違いについては今後詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 20H00287 および福岡大学 SK2201、K22005、GR2307 の助成を受けたものです。

#### 参 考 文 献

- 1) Matsunaga, H., Habu, H. and Miyake, A. : Preparation and Thermal Decomposition Behavior of Ammonium Dinitramide-based Energetic Ionic Liquid Propellant, *Sci. Technol. Energ. Mater.*, **78** (2017) , pp.65-70.
- 2) Matsunaga, H., Habu, H. and Miyake, A. : Study on Ionic Liquid Propellants Using High Energetic Materials, JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-14-005 (2015), pp.1-10.
- 3) Matsunaga, H., Katoh, K., Habu, H., Noda, M. and Miyake, A. : Thermal Behavior of Ammonium Dinitramide and Amine Nitrate Mixtures. *J. Therm. Anal. Calorim.*, **135** (2019), pp.2677-85.
- 4) Shiota, K., Itakura, M., Izato, Y., Matsunaga, H., Habu, H. and Miyake, A. : Effects of Amide Compounds and Nitrate Salts on the Melting Point Depression of Ammonium Dinitramide. *Sci. Technol. Energ. Mater.*, **79** (2018), pp.131-136.
- 5) Shiota, K., Izato, Y., Habu, H. and Miyake, A. : Reactivity Analysis of Ammonium Dinitramide Binary Mixtures based on ab initio Calculation and Thermal Analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.*, **138** (2019), pp.2615-2622.
- 6) Shiota, K., Nishimura, M., Ueda, N., Izato, Y., Kato, T. and Miyake, A. : Combustion reaction analysis of ammonium dinitramide, monomethylamine nitrate and acetamide mixtures based on temperature measurements, JAXA-RR-22-006.(2022), pp.15-18.
- 7) Itouyama, N., Izato, Y. H., Miyake, A. and Habu, H. : Construction of detailed chemical reaction model for ADN-EILPs in gas-phase. JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-18-006, (2018), pp.33-39.

## 令和5年度 研究発表実績一覧

### 表彰（5件）

- 1) 伊東山登, 一般社団法人火薬学会 2022 年度秋季研究発表会 優秀講演賞, 高エネルギーイオン液体のレーザ着火を応用したスラスト概念と基礎作動特性, 2022 年 11 月.
- 2) 松永浩貴, 一般社団法人火薬学会 2022 年度火薬学会技術賞, アンモニウムジニトラミド系イオン液体の連続合成および分解機構解析, 2023 年 5 月.
- 3) 大森稜介, 一般社団法人火薬学会 2023 年度春季研究発表会 優秀講演賞, 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, 2023 年 5 月.
- 4) 塩田謙人, 一般社団法人火薬学会 2023 年度春季研究発表会 優秀講演賞, 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, 2023 年 5 月.
- 5) 磯田涼太, 一般社団法人火薬学会 2023 年度春季研究発表会 優秀講演賞, アンモニウムジニトラミド系エネルギーイオン液体の熱特性に及ぼすアミド化合物の影響, 2023 年 5 月.

### 査読付投稿論文（5件）

- 1) 伊藤尚義, 半澤佳祐, 釜土大輝, 川端健心, 早田和義, 勝身俊之, 門脇敏: 周辺雰囲気圧力が HAN 系低毒性一液推進剤の噴霧と触媒燃焼に与える影響に関する研究, 日本航空宇宙学会論文集 71, 4, 168-173 (2023)
- 2) Yu-ichiro Izato, Akira Matsugi, Mitsuo Koshi, and Atsumi Miyake: Computation of entropy values for non-electrolyte solute molecules in solution based on semi-empirical corrections to a polarized continuum model, Physical Chemistry Chemical Physics, 25, 8082-8089 (2023).
- 3) Hiroki Matsunaga, Mamoru Hayata, Hiroto Habu, Masaru Noda, and Atsumi Miyake: Preparation and thermal behavior of high energetic eutectic mixture of ammonium dinitramide and hydrazide compounds, Journal of Evolving Space Activities, 1, No.41 (2023).
- 4) Noboru Itouyama, Asato Wada, Hiroto Habu, and Y. Sago: Conceptual design of small-size thruster using laser ignition of high-energy monopropellant, Journal of Propulsion and Power, 39, 415-425 (2023).
- 5) Noboru Itouyama, Asato Wada, Hiroki Matsunaga, Jiro Kasahara, and Hiroto Habu: Screening of effective catalysts for the ignition of high energy ionic liquid propellants: Narrowing down of candidate catalysts and its investigation based on thermal analysis, Science and Technology of Energetic Materials, 84, 33-39 (2023).

### 国際学会発表（11件）

- 1) Hiroki Matsunaga: Development of Next Generation Green Propellant with High Energetic Ionic Liquids, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, OS1-1, Fukuoka, Japan, June 2023 (Invited).
- 2) Hiroki Matsunaga, Kento Shiota, Katsumi Katoh, Hiroto Habu, Masaru Noda, and Atsumi Miyake: Reactivity of Ammonium Dinitramide-Based Energetic Ionic Liquids with Metals and Metal Oxides, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023-a-47, Fukuoka, Japan, June 2023.



- 3) Kenshin Kawabata, Daiki Kamatsuchi, Hisayoshi Ito, Kazuyoshi Hayata, Shohei Tokumaru, Toshiyuki Katsumi, and Satoshi Kadowaki: Firing Test of Hydrogen-peroxide-added ADN-based Monopropellant Using Catalytic Thruster, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023-a-48, Fukuoka, Japan, June 2023.
- 4) Hisayoshi Ito, Kazuyoshi Hayata, Daiki Kamatsuchi, Kenshin Kawabata, Jun Nigorikawa, Toshiyuki Katsumi, Noboru Itouyama, Jiro Kasahara, and Satoshi Kadowaki: Improvement of Flash Atomization Characteristics of HAN-based Green Propellants Using High Saturation Vapor Pressure Additive, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, Fukuoka, Japan, 2023-a-52, June 2023.
- 5) Ryosuke Omori, Noboru Itouyama, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake: Ignition of Energetic Ionic Liquids Electrolysis Ignition Thrusters, The 34th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2023), Fukuoka, Japan, 2023-a-57, June 2023.
- 6) N. Itouyama, R. Mével, X. Huang, J. Kasahara, Steady Detonation in Gaseous Pyrolysis Products of Ammonium Dinitramide and Its Related Ionic Liquids, The 29th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), 87, Siheung, Korea, June 2023.
- 7) Ryosuke Omori, Ryota Isoda, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake: Thermal Properties of Ammonium Dinitramide based Multi-Pair Ionic Liquid, 26th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2023), Osaka, Japan, August 2023.
- 8) Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Hiroki Matsunaga, Takafumi Kato, and Atsumi Miyake: Thermodynamic Analysis of Liquid Structure of ADN based Multi-Pair Ionic Liquid and Mixtures, 26th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2023), Osaka, Japan, August 2023.
- 9) Hiroki Matsunaga, Noboru Itouyama, Hiroto Habu, Masaru Noda, and Atsumi Miyake: Influence of catalysts on the thermal behavior of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquids, 26th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2023), Osaka, Japan, August 2023.
- 10) Tomohiro Omura, Yu-ichiro Izato, Atsumi Miyake: Calculation of Thermodynamics Data for Reactions of Monomethyl Hydrazine and Dinitrogen Tetroxide in the Liquid Phase using Quantum Chemistry Calculations, 26th IUPAC International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2023), Osaka, Japan, August 2023.
- 11) Hiroki Matsunaga, Yuki Yano, Katsumi Katoh, Hiroto Habu, Masaru Noda, and Atsumi Miyake: Gas generation behavior in the decomposition of ammonium dinitramide and hydrazide mixtures, 7th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC7), OP1.16, Brno, Czech Republic, August 2023.

#### 国内学会発表（24件）

- 1) 松永浩貴, 塩田謙人, 加藤勝美, 羽生宏人, 野田賢, 三宅淳巳: アンモニウムジニトラミド系高エネルギーイオン液体の熱挙動に及ぼす金属および金属酸化物の影響, 令和4年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2022-052, 相模原, 2023年1月.
- 2) 松本幸太郎, 伊東山登, 松永浩貴, 勝身俊之, 塩田謙人, 伊里友一朗, 羽生宏人: 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, II-6, 相模原, 2022年2月.
- 3) 松永浩貴: アンモニウムジニトラミド系イオン液体の連続合成および分解機構解析, 火薬学会2023年度春季研究発表会, 東京, 2023年5月(学会賞受賞講演).
- 4) 松永浩貴, 伊東山登, 羽生宏人, 野田賢, 三宅淳巳: 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, 東京, 2023年5月.
- 5) 大森稜介, 久保田悠斗, 伊東山登, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 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, 東京, 2023年5月.
- 6) 大森稜介, 田中菜月, 久保田悠斗, 伊東山登, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 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, 東京, 2023 年 5 月.

- 7) 塩田謙人, 松永浩貴, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: 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, 東京, 2023 年 5 月.
- 8) 矢野祐樹, 松永浩貴, 羽生宏人, 野田賢: アンモニウムジニトラミド/ホルモヒドラジド系高エネルギーイオン液体の組成最適化, 火薬学会 2023 年度春季研究発表会, No.15, 東京, 2023 年 5 月.
- 9) 磯田涼太, 大森稜介, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: アンモニウムジニトラミド系エネルギーイオン液体の熱特性に及ぼすアミド化合物の影響, 火薬学会 2023 年度春季研究発表会, No.16, 東京, 2023 年 5 月.
- 10) 大森稜介, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: エネルギーイオン液体の高効率着火に向けた交流電圧印加の検討, 化学工学会 第 54 回秋季大会, PB229, 福岡, 2023 年 9 月
- 11) 塩田謙人, 古野岳, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: アンモニウムジニトラミド系マルチペアイオン液体の形成に及ぼす硝酸塩の影響, 第 59 回熱測定討論会, P8, 東京, 2023 年 10 月.
- 12) 鈴木大登, 長谷川凌大, 伊東山登, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎, 電気浸透流ポンプを用いた推力可変超小型一液式スラスタの実験研究, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 1L07, 富山, 2023 年 10 月.
- 13) 大森稜介, 伊東山登, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 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, 福岡, 2023 年 11 月.
- 14) 古野岳, 塩田謙人, 松永浩貴, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: 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, 福岡, 2023 年 11 月.
- 15) 伊東山登, 松永浩貴, 和田明哲, 澤田悟, 松岡健, 笠原次郎, 羽生宏人, 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, 火薬学会秋季講演会, No.19, 福岡, 2023 年 11 月.
- 16) 伊里友一朗, 東英子, 加藤勝美, 三宅淳巳: 量子化学計算を用いたニトロセルロースの熱分解機構解析, 火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.21, 福岡, 2023 年 11 月.
- 17) 廣瀬和也, 山本陸人, 塩田謙人, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: 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, 福岡, No.28, 2023 年 11 月.
- 18) 長町大気, 松本幸太郎, 羽生宏人: 負触媒を添加した推進薬による固体ロケット推進性能の向上, 火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.32, 福岡, 2023 年 11 月.
- 19) 塩田謙人, 古野岳, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: 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, 福岡, 2023 年 11 月.
- 20) 矢野祐樹, 塩田謙人, 松永浩貴, 羽生宏人, 野田賢: 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, 福岡, 2023 年 11 月.
- 21) 伊里友一朗, 大森稜介, 後藤健太, 道上啓亮, 三宅淳巳: 高速度撮影および詳細反応シミュレーションを用いたヒドラジン/四酸化二窒素系の自着火機構解析, 火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, No.41, 福岡, 2023 年 11 月.
- 22) 松本幸太郎, 中村凜, 羽生宏人: 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, No.42, 福岡, 2023 年 11 月.
- 23) 松永浩貴, 伊東山登, 羽生宏人, 野田賢, 三宅淳巳: アンモニウムジニトラミド/ヒドラジド混合物の発熱挙動に及ぼす触媒の影響, 火薬学会 2023 年度秋季研究発表会, 福岡, No.43, 2023 年 11 月.
- 24) 古野岳, 塩田謙人, 松永浩貴, 伊里友一朗, 加藤貴史, 三宅淳巳: アンモニウムジニトラミド系イオン液体推進剤の燃焼挙動に及ぼすアミド化合物の影響, 日本航空宇宙学会西部支部講演会, JSASS-2023-S024, 長崎, 2023 年 12 月.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-23-005

JAXA Research and Development Report

高エネルギー物質研究会 令和5年度研究成果報告書

Technical Report of The Research Activity for High Energy Materials (2023)

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2024年1月30日  
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

