

将来宇宙利用に向けた高エネルギーイオン液体推進剤の研究

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

Research of High Energetic Ionic Liquid Propellants for Future Space Applications

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

Abstract: The development of microsatellite is important for expansion of space utilization. The “energetic ionic liquids (EILs)”, eutectic liquids of high energetic materials, are promising new liquid propellant replacing hydrazine because their unique properties, high energy density, low vapor pressure, enable miniaturization of system, easier handling, and reduction of explosion risks. The mixture of ammonium dinitramide (ADN), monomethylamine nitrate (MMAN), and urea forms EILs and it is one of the candidate for new propellant. To realize the on-orbit demonstration of propulsion systems using EILs within several years, we are advancing researches of component technology; synthesis with highly safety and low cost, propulsion system using laser ignition and electrical energy, and risk assessment for safety use from design to operation.

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

1. はじめに

通信、海洋・気象情報、地理情報など、宇宙開発とその利用は我々の生活の基盤となるものである。昨今は超小型衛星（数十 kg 以内）による宇宙開発や探査に向けた研究が世界中で盛んになっている^{1,2}。衛星の小型化は製作にかかる材料費、時間を削減することができるため、多様で萌芽的な技術実証を高頻度を実施するのに最適である。その中で衛星の推進や制御を行う推進系技術は、今後の更なる宇宙利用拡大に向けて自在性を獲得するためには欠かせない。

筆者ら高エネルギー物質研究会では、次世代の衛星利用に向けた化学推進機の研究開発を進めてきた。化学推進機は推進剤の分解・燃焼により推力を得る方式であり、インパルスビットが求められる姿勢制御や軌道遷移においては液体推進剤の利用が望ましい。衛星用化学推進における汎用の推進剤はヒドラジンである。ヒドラジンは特定の触媒や酸化性物質との反応によって一定量のガスを発生するため、反応制御が容易である。一方で、ヒドラジンは毒性が高く、室温で可燃性の蒸気を形成することから、充填をはじめとする取扱い操作において特殊な設備と厳重な管理を必要とする。ヒドラジンの取扱性の低さは、低コスト・高頻度を目指す次世代宇宙開発の妨げとなるものであり、代替となる推進剤の開発が望まれている。さらに、衛星の小型軽量化に向け、推進剤を高エネルギー化し、推進剤タンクの占める体積を小さくすることも重要である。これらを解決する方法は、高エネルギー物質（HEMs；加熱分解により高温の低分子量化学安定ガスを発生する材料）を用いた推進剤を開発し、ヒドラジンを代替することである。

* 2020 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2020)

^{*1} 福岡大学 工学部 化学システム工学科
Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

^{*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} 宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系
(Department for Space Flight Systems, Institute of Space and Astronautical Science)

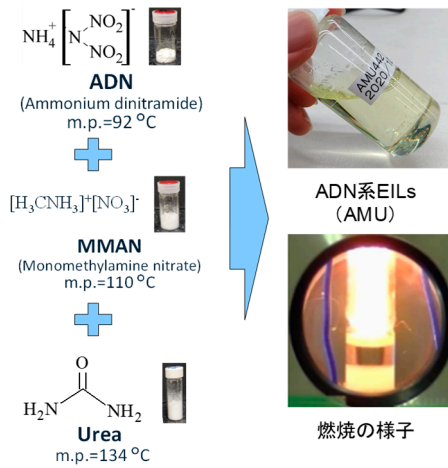
^{*4} 日本大学 生産工学部 機械工学科
(Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University)

^{*5} 横浜国立大学 先端科学高等研究院
(Institute of Advanced Sciences, Yokohama National University)

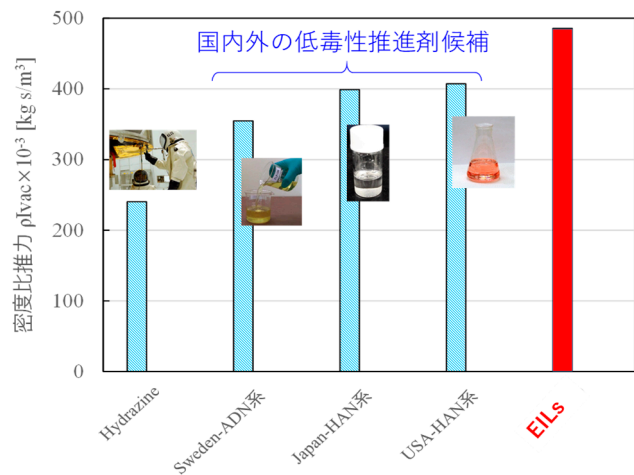
^{*6} 横浜国立大学大学院 環境情報研究院
(Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University)

^{*7} 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)

筆者らは、HEMsの一つであるアンモニウムジニトラミド（ADN）を基剤とした高エネルギーイオン液体（EILs）の調製を可能とし^{3,4}、現在は推進剤としての実用化に向けた要素技術の研究を進めている。ADN系EILsは室温で固体（融点90℃）のADNに固体物質を混合することで凝固点降下させ、低融点の液体としたものである。推進剤として期待されるEILsの一つがADN、モノメチルアミン硝酸塩（MMAN）、尿素の共融液体（AMU）である（第1図）³。三成分の混合のみで得られ、ストランド燃焼器において燃焼性があることが確認された⁵。ADN系液体推進剤の研究開発は欧州を中心に世界中で行われており、代表的なものとしてはADNを水やアルコールなどの液体に溶解させたLMP-103S⁶（ADN 63%、水 13.95%、メタノール 18.4%、アンモニア 4.65%）、FLP-106⁷（ADN 64.6%、水 23.9%、モノメチルホルムアミド 11.5%）がある。それらに対し、ADN系EILsの調製では液体の溶剤を一切用いない。そのため、イオン性化合物特有の高密度・低蒸気圧・高安定性による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低減が期待される。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を上回る理論密度比推力となることが示された（第2図）。本稿では、高エネルギー物質研究会で進めているADN系EILsを用いた推進系の研究開発について、現在の研究状況と今後の方向性について述べる。



第1図 ADN系EILs (AMU) の調製³と燃焼の様子⁵



第2図 ADN系EILs (AMU) と他の推進剤候補との密度比推力比較（燃焼圧力：1 MPa、開口比：100）⁹

2. EILsの超小型衛星実装に向けた取組み

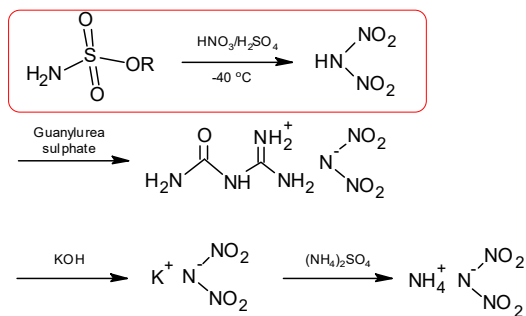
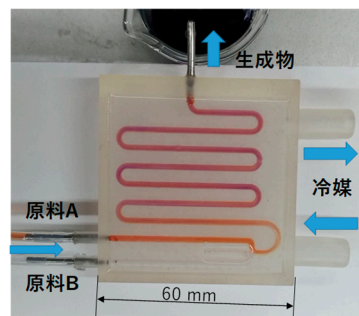
EILsを上述のイオン性化合物特有の特長を最大限に生かした推進剤として用いるためには、既存技術にとらわれない新しい推進システムを実現することが要求される。筆者らは、数年以内の宇宙実証を目指し、EILsの合成基盤確立、推進システム構築と性能評価、安全性評価フレームの構築を目指した研究を進めている。

2.1 EILsの合成基盤確立

宇宙利用拡大に向け、今後適用される推進剤には、安全で安価に入手（合成・製造）でき、取扱いが容易であることが望まれる。そのためにHEMsの合成手法およびEILsの最適組成についての検討を行う。

ADNをはじめとしてEILsの原料となるHEMsの安定供給は今後不可欠である。HEMsの多くはバッチ式のリアクタでラボスケールの合成がなされているが、反応過程で大きな発熱を伴いながら不安定な中間体を經由する 경우가多く、設備大型化には負担が大きい。そこで、量産基盤を構築するため、小型フローリアクタ（ μL ～数mLオーダー）によるHEMsの合成技術を確認し、安全・低コスト・高品質な製造を目指すこととした。小型フローリアクタでは容量が小さいゆえに効率よく放熱ができることから、特別な設備が無くても高効率かつ安全なHEMsの合成が可能となると期待される。筆者らは、ADNの合成（第3図）をターゲットとし、まずはその中で特に反応熱の大きいニトロ化反応の連続化を検討する。現在は数mLオーダーのバッチ式リアクタを用いて最適な反応温度、時間の把握、反応危険性の評価を進めており、それを基に3Dプリンタを活用してフローリアクタの試作（第4図）を開始したところである。

また、推進剤として使用するにあたり、地上ではイオン液体特有の高い安定性による安全な取扱いが可能でありながら、使用時の刺激（熱、光など）により瞬時に反応し、エネルギーを放出させる必要がある。昨年度¹⁰⁻¹²)に引き続き、2-ヒドロキシエチルヒドラジニウム硝酸塩（HEHN）をはじめとした加熱によりADNとの反応性が高い中間体が遊離する物質、光反応や電気分解反応による反応開始する物質を用いたEILs組成の確立を目指している。

第3図 ADNの合成反応の例¹³⁾ (赤枠：ニトロ化反応)

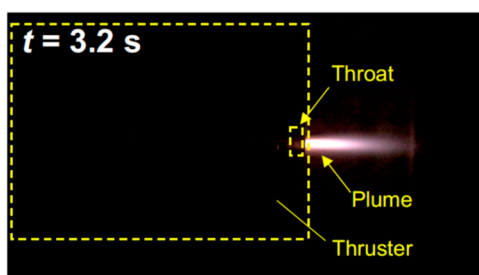
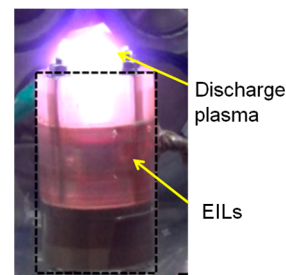
第4図 3Dプリンタで試作した小型フローリアクタ

2.2 EILs 型宇宙推進システムの研究

EILs を化学推進系で用いるための喫緊の課題は点火方式の確立である。イオン液体の高い熱安定性が着火性を低下させ、HEMsの高いエネルギー密度が高い燃焼温度につながるためである。筆者らは新規点火方式としてレーザー点火に着目し、実現可能性評価を進めている。レーザー点火では、局所的に高いエネルギーを燃焼器外部から推進剤に非接触で加えて点火させることが可能であり、燃焼による点火器の劣化や損耗を少なくすることができる。これまでに連続発振(CW)レーザーの入射による局所的加熱を用いて、AMU液滴^{14, 15)}やカーボン繊維に浸み込ませたAMU¹⁶⁾の点火に成功しており、最適組成の検討¹⁴⁾、着火メカニズム¹⁵⁾、レーザー強度と着火遅れ時間の関係¹⁶⁾などについて検討を行い、反応条件の最適化を進めてきた。さらに、スラスタ燃焼器(設計推力0.4N、燃焼圧力0.3MPaA)の試作を行い、内部に設置したカーボン繊維にAMUを浸み込ませ、外部よりレーザーを照射した(第5図)ところ、燃焼ガスの噴出および圧力・推力の発生が確認され、レーザー点火を用いた推進機構の成立性が示された¹⁷⁾。カーボン繊維を用いたスラスタでは、推進剤の供給は浸透現象を用いて行うことを想定しており、高圧供給系による微粒化を必要としない新しいスラスタの形となることが期待される。

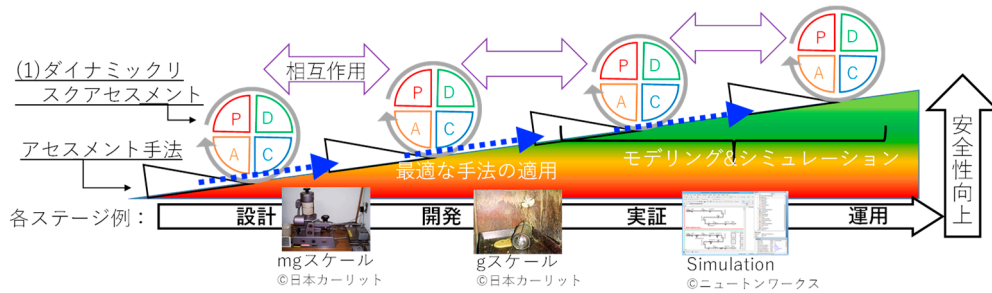
また、EILs 特有の高い導電性を利用することで、電気分解反応を用いた着火手法¹⁸⁾による化学推進機への応用やEILs 液中での放電プラズマ形成¹⁹⁾による電気推進機への応用による推力獲得も期待できる。推進剤であるEILs を電気推進系でも共用することができれば、多岐にわたる宇宙利用ニーズに対応可能となる。これまでにADN/HEHN液滴の電気分解による着火¹⁸⁾やAMU液中での放電プラズマ形成(第6図)¹⁹⁾に成功した。

EILs には現行点火方式を用いることは困難であるが、上述のようにEILs の特長を生かした新規推進システムが確立されつつある。現在は推力発生原理の学術検討とともに、スラスタとしての成立性評価、推進性能の取得を進めている。

第5図 レーザー点火スラスタ動作時の様子(推進剤AMU)¹⁷⁾第6図 AMUの直接電気分解によるプラズマ形成¹⁹⁾

2.3 安全利用に向けたリスクアセスメント

EILs やそれを用いた推進システムはこれまでに存在しなかった新技術であるため、新たなシナリオにより危険性が顕在化する可能性がある。そのため、合成から使用に至るまでの各ステージにおける重要なリスク項目を正しく識別する必要がある。そこで、EILs 自身の物性や危険性を把握するとともに、新規推進系開発に適用可能なリスクアセスメント手法の構築を進める。リスクアセスメントの進め方の概念図を第7図に示す。ダイナミックリスクアセスメント²⁰⁾の考えに基づき、開発過程に応じたリスク情報を更新(リスク情報を各ステージごとで相互に共有)し、各ステージのアセスメント結果の相互影響を考慮したリスク評価モデルを確立する。これにより、短期間で実効性のあるシステム開発を達成する。また、リスクの体系的な抽出には、システムをモデル化し、シミュレーションからシステムチックにシナリオを抽出する。現在はリスクアセスメントを行う基礎データとして、EILs 自身の物性や材料適合性、危険性について実験を中心とした評価を進め、それを基にした安全データシートを作成している。今後は合成や推進システムの研究開発状況に応じたリスクアセスメントを行えるように準備を進めている。



第7図 リスクアセスメントの進め方

(ダイナミックリスクアセスメントによるリスク情報の共有とモデリング・シミュレーションによるリスクの体系的抽出)

3. まとめ

超小型衛星への搭載を見据えた高エネルギー物質研究について、本年度の活動と今後の方針をまとめた。ADN系EILsを用いた宇宙推進システムの構築により、安全で、使いやすい、安価で小型、高性能である宇宙用推進剤と推進システムの実現が期待される。高エネルギー物質研究会では、ADN系EILsをヒドラジンに代わる推進剤として実用化するため、合成から運用までの一貫した研究開発を、フローリアクタやレーザー一点火といった新しい技術を導入して進めている。本研究を通して新規材料開発からシステム実装に係る実践的研究開発フローが構築されることで、持続性のある研究基盤を国内に整備することも可能となる。今後はこれらの技術基盤を確立していくとともに、スラスタの制作および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把握する。

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，五十嵐哲，川端洋輔：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) Matsunaga, H., Habu, H., and Miyake, A.: Preparation and thermal decomposition behavior of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquid propellant, Sci. Tech. Energetic Materials, 78 (2017), pp.65-70.
- 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. Tech. Energetic Materials, 79 (2018), pp.137-141.
- 5) Ide, Y., Takahashi, T., Iwai, K., Nozoe, K., Habu, H., and Tokudome, S.: Potential of ADN-based ionic liquid propellant for spacecraft propulsion, Procedia Engineering, 99 (2015), pp.332-337.
- 6) Anflo, K., Grönland, T. A., Bergman, G., Johansson, M., and Nedar, R.: Towards green propulsion for spacecraft with ADN-based monopropellants, Proc. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-2002-3847 (2002).
- 7) Wingborg, N., Eldsäter, C., and Skifs, H.: Formulation and characterization of ADN-based liquid monopropellants, Proc. 2nd International Conference on Green Propellants for Space Propulsion, ESA SP-557 (2004).
- 8) Gordon, S. and McBride, B. J.: Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, NASA Reference Publication 1311 (1996).
- 9) 松永浩貴，伊東山登，和田明哲，塩田謙人，伊里友一朗，松本幸太郎，勝身俊之，早田葵，于秀超，久保田一浩，野副克彦，羽生宏人，野田賢，三宅淳巳：深宇宙探査用超小型推進システムを見据えた高エネルギー物質研究，第64回宇宙科学技術連合講演会，2K11 (2020)。
- 10) 松永浩貴，伊東山登，和田明哲，松本幸太郎，塩田謙人，伊里友一朗，勝身俊之，羽生宏人，野田賢，三宅淳巳：高エネルギーイオン液体推進剤の点火システムの研究開発，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-19-003 (2020)，pp.1-10。
- 11) 塩田謙人，松下和樹，伊里友一朗，三宅淳巳：2-ヒドロキシエチルヒドラジニウム硝酸塩の基礎的熱特性の把握，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-19-003 (2020)，pp.17-22。
- 12) 伊里友一朗，松下和樹，塩田謙人，三宅淳巳：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。
- 13) Badgjar, D. M., Bulakh, N. R., Wagh, R. M., and Talawar, M. B.: Synthesis, characterization and purity determination of ammonium dinitramide (ADN) and its precursors. Sci. Tech. Energetic Materials, 77 (2016), pp.59-64.
- 14) 早田葵，塩田謙人，伊里友一朗，松永浩貴，羽生宏人，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レーザー着火性に及ぼす色素混合の影響，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-17-008 (2018)，pp.13-18。
- 15) Matsunaga, H., Katoh, K., Habu, H., Noda, M., Miyake, A.: Ignition of the droplets of ammonium dinitramide-based high-energy ionic liquid, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 18 (2020), pp.323-329.
- 16) Itouyama, N. and Habu, H.: Continuous-wave laser ignition of non-solvent ionic liquids based on high energetic salts with carbon additives, Propel. Explos. Pyrotech., 44 (2019), pp.1107-1118.
- 17) 伊東山登，和田明哲，松永浩貴，笠原次郎，羽生宏人：高エネルギーイオン液体の一液推進機応用に関する研究，第64回宇宙科学技術連合講演会，2K08 (2020)。
- 18) 松下和樹，塩田謙人，伊里友一朗，羽生宏人，三宅淳巳：分光分析および検知管試験によるアンモニウムジニトラミド溶融塩の電解反応解析，宇宙航空研究開発機構研究開発報告 (2021)。
- 19) Wada, A. and Habu, H.: Electric ignition characteristics of an ammonium-dinitramide-based ionic liquid monopropellant with discharge plasma, AIAA SciTech Forum and Exposition, 2020.
- 20) Khan, F., Hashemi, S. J., Paltrinieri, N., Amyotte, P., Cozzani, V., and Reniers, G.: Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management, Curr. Opin. Chem. Eng., 14 (2016), pp.9-17.