

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22430

研究課題名（和文）高エネルギー物質およびこれを基材とする低毒・高性能液体推進薬の爆轟特性の基礎解明

研究課題名（英文）Investigation of the detonability of high energy density materials and its-based propellants

研究代表者

伊東山 登 (Itouyama, Noboru)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任助教

研究者番号：50881215

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高エネルギー物質であるアンモニウムジニトラミド（ADN）およびADN系高エネルギー密度推進剤であるADN-EILPsに対し、高い取扱性を担保すべく、甚大なリスクを伴うハザードの一つとして考えられる爆轟現象に注目し、これらの気相爆轟特性の基礎的理解を行った。ADNおよびADN-EILPsの分解ガスの初期状態を計算的に検証し、圧力環境により組成が変化することを見出した。0次元・1次元の反応シミュレーションから、ADNおよびADN-EILPsの分解ガスが取りうる気相爆轟特性を明らかにし、固液状態ではよりエネルギー感度が低いとされるADN-EILPsの方がADNに比べ、気相爆轟性が高いことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は昨今利用拡大や新規開発が進む高エネルギー物質（特にADN）とその推進剤に対して随伴する取扱時の安全性確保に資するものである。特に、ADNは単体では衝撃・摩擦といった外的エネルギーに対して非常に感度が高い反面、イオン液体化させたADN-EILPsではこれらが鈍化するため、高いエネルギー密度と高い取扱性の両立が可能であるという関係がこれまで知られていた。しかしながら本研究が指し示した気相爆轟特性の関係は、これに反する結果となり、取扱時の最小化を目指すにあたり、ハザードシナリオのさらなる拡大の必要性が示唆された。また、本研究で得られた知見は他のADN系推進剤にも十分応用可能なものである。

研究成果の概要（英文）：The study focused on the detonation as a potential hazard with significant risk to ensure high handling performance for ammonium dinitramide (ADN) which is an energetic material and an ADN-based high energy density propellant, ADN-EILPs, and aimed to understand the basic gas-phase detonation characteristics of these materials. The initial conditions of ADN and ADN-EILPs decomposition gases were computationally verified and their compositions were found to change depending on the pressure environment. The 0D and 1D reaction simulations were performed to clarify the possible gas-phase detonation characteristics of ADN and ADN-EILPs decomposition gases, and to understand the detonation characteristics of ADN-EILPs, which are considered to have lower energy sensitivity in the solid-liquid state. It is suggested that ADN-EILPs, which is considered to have lower energy sensitivity in the solid-liquid state, has higher gas-phase detonability than ADN.

研究分野：安全工学

キーワード：高エネルギー物質 気相デトネーション 反応速度論 推進剤

1. 研究開始当初の背景

民間企業や大学機関を主体とした宇宙利用が活性化する昨今、人工衛星やロケット開発では取扱性の向上と小型・高性能化が主たる技術課題である。これに伴い、人工衛星やロケットの自存性確保のために、取扱性が高く小型・高性能な化学推進系(化学スラスタ)の開発が欠かせない。化学スラスタとは推進薬の熱分解・燃焼ガスを放出させ推進力を得るエンジン機構である。本開発には推進薬の高エネルギー密度化(高い化学エネルギー、高密度)と低毒化が求められる。解決策は世界共通であり、それは高エネルギー物質(HEMs)の利用である。HEMs系液体推進薬は Green propellants (GPs) と呼称され、硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)系とアンモニウムジニトラミド(ADN)系に分類される¹⁾。HAN や ADN (以下、GPs-HEMs) は酸素バランスが正であり(酸化剤)、燃料と混合することで GPs として調整される。既往推進薬であるヒドラジンに比べ2倍近い推進薬性能を有することや軌道実証済のものもあることから、GPs は今後ヒドラジン代替の宇宙機搭載向け液体推進薬としての利用拡大が見込まれる。

GPs-HEMs およびこれらを基材とする GPs において、喫緊の技術課題は”取扱安全性の担保(起こりうる現象の予測・制御)”である。GPs-HEMs および GPs の工学応用はこれらの熱分解・燃焼ガスを利用したもの(e.g. 宇宙推進機)が主である。安全な取扱には GPs および GPs-HEMs の燃焼・熱分解に関する物理・化学特性の理解が欠かせない。注目すべきは爆轟特性を有する既存の HEMs が複数存在する点である(e.g. 硝酸アンモニウム²⁾)。爆轟とは、爆発的反応から生じる衝撃波により未反応相が断熱圧縮され発熱し発火・燃焼に至る現象を指し、その進行速度はマッハ域に達する。衝撃波の後方では断熱圧縮された化学種が反応し発熱する。衝撃波はこの発熱よりエネルギーを獲得することで安定して進行する。つまり、HEMs の高い化学エネルギー(=断熱火炎温度)故に衝撃波のエネルギー量が増え、爆轟特性を発現するといった原理である。本原理に従うと既存の HEMs 同様、GPs および GPs-HEMs も爆轟特性を有することは十分に考えられる。爆轟はマッハ域の衝撃波を伴うため、熱分解や燃焼に比べて反応暴走した際のハザードリスクが高い(e.g. 化学スラスタの破損、推進薬配管系の爆発)。しかし、GPs-HEMs および GPs の爆轟特性に関する既往研究は限られ、現状、関連するハザードリスクの詳細な予測は難しい。つまり、“GPs-HEMs および GPs の爆轟特性とその発現機構”は未解明の学術的「問い」であった。

2. 研究の目的

GPs および GPs-HEMs の燃焼・熱分解(気相を主とする反応)が加速(暴走)することで、当該反応の爆轟現象への遷移が予想される。そのため研究の初手としては、GPs-HEMs および GPs の気相領域の爆轟特性を評価することが望ましい。GPs-HEMs および GPs の気相成分は蒸発ガスや熱分解ガスから構成される。そこで GPs-HEMs および GPs の蒸発ガスや熱分解ガスを対象に、これらの爆轟特性を明らかにし、爆轟の予測関数を導出することを目指した。本研究では、HEMs として次世代高エネルギー物質として世界的に広く研究される ADN、ADN 系 GPs として高い推進剤取扱性・推進剤特性が期待されるイオン液体推進剤 ADN-EILPs³⁾に注目した。ADN-EILPs は ADN を主材とした様々な組成が報告されてきたが、中でも低融点・高エネルギー密度であり、ベンチマーク種として取り扱われる ADN:メチルアミン硝酸塩:尿素=40:40:20 (wt.%, 以降 AMU442) を本研究では取り扱った。

3. 研究の方法

ADN および AMU442 の熱分解ガスを精度よく再現し、これらを化学的に安定化させて実験に供するのは困難である。そこで複数の仮定を含むものの、本研究では主に反応シミュレーションにより、上述する予混合ガスの気相デトネーション特性を解き明かすことを目指した。

気相デトネーションに関連する反応シミュレーションを行うためには、これに適した詳細化学反応機構の構築のみならず、初期ガス組成・温度・圧力等を決定する必要がある。関連する既報の研究結果を元に、これらについて検討を進めた。その後、選出された各種計算初期条件を用いて、Chapman-Jouguet (CJ) および Zeldovich von Neumann Doering (ZND)理論に基づき、0次元・1次元定常デトネーション計算を行った。前者については NASA-CEA⁴⁾および SD toolbox⁵⁾を用い、後者については ZND code⁵⁾を用いて計算を進めた。1次元定常デトネーション構造については、その化学反応機構を詳細に理解すべく、CHEMKIN-PRO⁶⁾内断熱定積モデルによる0次元反応シミュレーションにおいて、1次元定常デトネーション計算から得られた時間-圧力履歴を外挿することで、熱化学反応解析を行った。

4. 研究成果

4.1. 計算対象と初期条件の検討

当該検証を進めるにあたり、適した詳細化学反応機構を構築し、ADN および AMU442 の熱分解ガスの初期条件として(1)圧力、(2)温度、(3)組成を精度よく決定する必要がある。前者については既に伊東山らにより構築済⁷⁾であり、これを活用することとした。後者については、その中で

も圧力は想定するシナリオに従って、優先的に決定することができる。ADN および AMU442 が用いられる圧力条件として、実験室環境である 0.1 MPa、燃焼場として取りうる圧力範囲でも最も高いと考えられる 1 MPa 前後の 2 条件を選出した。後者で述べた内容は本国の高圧ガス保安法により、密閉系で取り扱うことができる（高圧ガス非該当）許容限界値がこれであり、GPs のスラスタ燃焼なども主としてこれに従った設計を行う場合が多いためである。つづいて、初期ガス温度については、ADN および ADN-EILPs の凝縮相～気相の境界温度は ADN の分解生成物である硝酸アンモニウムの解離温度にほぼ等しいことが報告されている⁸⁻⁹⁾。この解離温度はアントワン式の形で定式化されるとされ、提案される式は ADN および ADN-EILPs の凝縮相温度に対して良い再現を示すことがわかっている。凝縮相直後の分解ガス温度は凝縮相温度と等しいと仮定し、上述した圧力を用いて、0.1 MPa および 1 MPa における凝縮相直後のガス温度をそれぞれ 610 K および 705 K と算出した。残る初期ガス組成については、まず ADN に対して検討を行い、その後、妥当な組成を用いて AMU442 に対する検討を段階的に進めた。

ADN の初期分解ガスについては様々報告例があるが、中でも分解ガスを直接サンプリング且つ分子ビーム化することで不安定な化学種も精度よく分析できる手法を用いた Korobeninchev らによる分析結果¹⁰⁾を参照した。しかしながらこの組成の元素バランスは ADN の元素バランス N:H:O=1:1:1 とは一致しない結果であった。松永らの研究から、ADN の熱分解は固体・液体の残差を伴わない、完全なガス化であることが報告されている¹¹⁾。また、ADN-EILPs についても同様な結果が報告されている¹²⁾。そこで本研究では Korobeninchev らによる分析結果¹⁰⁾を基準に、元素バランス N:H:O=1:1:1 を満たすような組成を網羅的に探索し、いくつかの候補を絞り込んだ。なお、本組成の策定では各種分解ガスのモル分率を変える手法を取ったが、その変更率は分析時の不確かさに相当すると仮定し、最大でも元値の 10%とした。各組成を用いて、0.3 MPa から 2 MPa 圧力範囲における ADN の定常燃焼時の火炎構造の計算的再現を試み、各圧力における確からしい組成の策定を試みた。その結果の一例を図 1 に示す。大凡 1.5 MPa を境に、ADN の初期分解ガスは 2 つの組成で概ね再現できることがわかった。また、この 2 組成を用いた計算結果の比較から、この圧力を境にして ADN が蒸発するか、分解してジニトラミド酸 (HDN) とアンモニアを生成するかが大きく変化することが予想された。ADN の分解は気相反応と凝縮相反応の並進により進行するとされるが、この予想は圧力環境の変化に従って気相反応と凝縮相反応の進行度の比が変動したためと考えられる。

つづいて、この 2 組成を用いて AMU442 の初期分解ガスを計算的に探索した。ADN を除く他 2 成分について、メチルアミン硝酸塩はメチルアミンと硝酸に、尿素については昇華するか、分解してイソシアン酸とアンモニアになる条件を設定した。よって、ADN に対して 2 組成・尿素に対して 2 組成の計 4 組成に対して、AMU442 の実験結果の計算的再現を試みた。ADN に比べ、AMU442 の実験報告例は少ない。本研究では井出らによって報告されている、ストランドバーナー燃焼試験による圧力に対する AMU442 の燃焼後退速度の再現を実施したところ、一定の圧力範囲において、燃焼後退速度を再現可能な組成の策定に成功した。また、本検証から、AMU442 中の ADN の熱分解振る舞いは ADN 単体の場合とほぼ変わらず、MMAN については仮定の通りメチルアミンと硝酸に、尿素は熱分解していることが想定された。

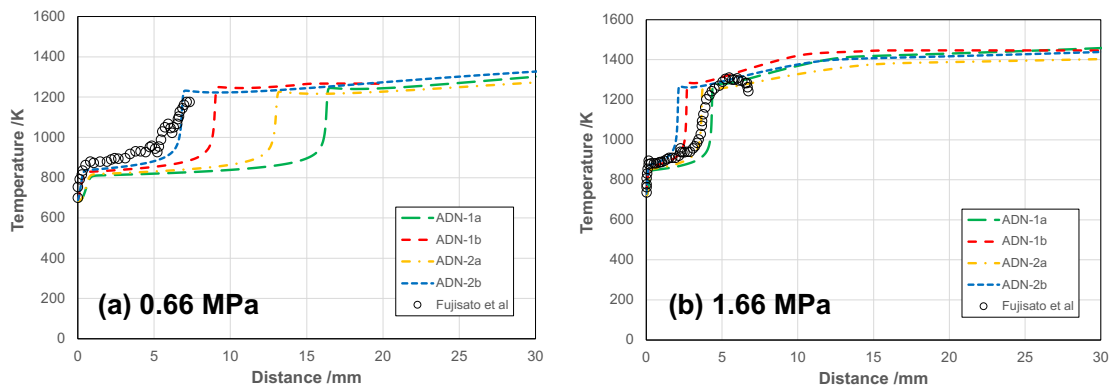


図 1. ADN の定常燃焼火炎構造の計算的再現結果 (CHEMKIN-PRO 内 Premixed stabilized burner を用いて計算, 実験結果は Ermolin ら¹⁸⁾, Fujisato ら¹⁹⁾ の文献を参照)

4.2. CJ デトネーション特性

表 1 に CJ デトネーションに関する計算結果をまとめる。低圧・高圧の両条件において、AMU442 分解ガスのフォン・ノイマン温度は ADN 分解ガスよりも 100 から 130K 高く、一方、フォン・ノイマン圧力は 2 倍以上高くなっている。CJ 状態では、温度差は 600K 以上まで大きくなるが、圧力差は 2 倍程度に留まる。AMU442 分解ガスが ADN 分解ガスよりも高温になる理由は、AMU442 分解ガスの方がデトネーション波の伝播マッハ数が高いためであると思われる。ADN 分解ガスでは、N₂, H₂O, O₂ の 3 つが主生成物であった。また、初期圧力と温度は平衡組成を大きく変化させないことがわかる。平衡組成から、ADN 分解ガスは、燃焼により多量の酸素分

子が生成されるリーン混合物であると考えられる。AMU442 分解ガスについては、 H_2O , N_2 , H_2 , CO の順に主要生成物となる。ADN 分解ガスと同様に、初期圧力と温度は平衡組成に大きな影響を与えないが、例えば O_2 と OH については若干の違いが存在する。ADN 分解ガスとは異なり、AMU442 分解ガスは、平衡状態での CO_2 のモル分率が非常に低く、 H_2 と CO のモル分率が大きい。これは燃料リッチな組成であったことに起因すると考えられた。

表 1. CJ デトネーション特性 計算結果

Target	P_{ini} /MPa	Vonn-Neumann state		CJ state		M_{CJ} /-
		T_{vn} /K	P_{vn} /MPa	T_{CJ} /K	P_{CJ} /MPa	
ADN	1	1660	17.89	2611	9.48	3.83
ADN	0.1	1561	1.85	2505	0.98	4.05
AMU442	1	1938	37.76	3336	18.85	5.66
AMU442	0.1	1809	3.80	3119	1.91	5.89

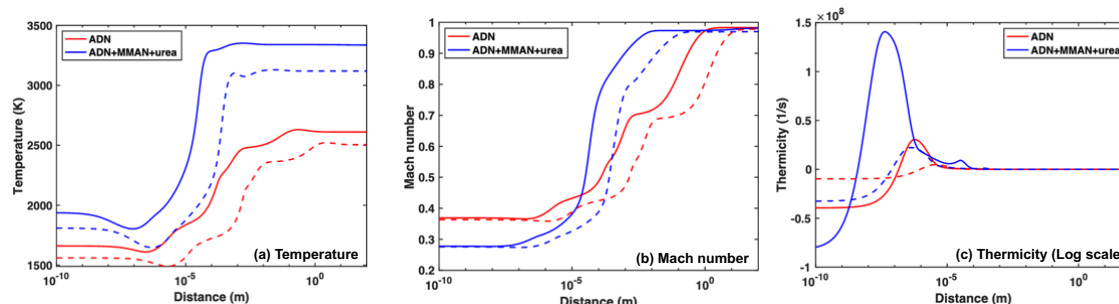


図 2. ZND 計算結果

4.3. 1次元定常デトネーション構造計算

図 2 に各組成・圧力条件における 1次元定常デトネーション構造の計算結果をまとめる。赤線が ADN 分解ガス、青線が AMU442 分解ガスの結果であり、点線が 0.1MPa 条件、実線が 1.0MPa 条件の結果である。両混合物とも、温度と熱量プロファイルの形状は低圧と高圧で類似しているが、高圧で高い反応性が観察された。いずれの場合も、反応は重要かつ急速な吸熱ステップによって開始され、その結果、誘導帯の温度が低下している。このような特徴は、通常、希釈度の低い混合物で観察され、反応物の熱分解の結果である。温度プロファイルに注目すると、CJ 温度よりもわずかに高い温度でピークを示していることが確認される。この特徴は、化学平衡以上の濃度で水が生成される超平衡に関連していると思われる。このような条件下では、水が分解され、温度の低下を引き起こす。窒素はこのような超平衡の挙動を示さないとされるが、AND 分解ガスでは 2 つの主要な生成段階が観察された。ADN 分解ガスでは、最大 4 段階の温度上昇が見られるが、高圧では 1 段階、低圧では 2 段階のピークしか存在しないため、必ずしも熱的なピークに関連したものではないことが予想される。AMU442 分解ガスについては、高圧と低圧の両方で 2 つの熱性のピークを明確に特定できた。このように複段階の熱放出を伴うデトネーション構造については N_2O など様々報告例が存在し、例えば 2 段階の thermicity を示す混合物は、複雑なセル構造を示すことがある (N_2O 系予混合気¹³⁻¹⁴) など。ZND 構造の誘導長はデトネーションセル構造の大きさと相関があることがよく知られており、一般に、誘導長は熱量ピークを用いて定義される。いずれの混合物でも、圧力が高くなるにつれて、すべての誘導長が短くなることわがわかる。高圧条件下で thermicity 最大値に達するまでの距離を考慮すると、誘導帯長は ADN 分解ガスでは $0.65 \mu m$ 以下、AMU442 分解ガスでは $0.05 \mu m$ 以下であることが分かった。また、thermicity プロファイルが $1 s^{-1}$ 以下になるまでに必要な距離として定義される化学反応長も、ADN 分解ガスより AMU442 分解ガスの方が短かった。高圧下でも、ADN 分解ガスの反応距離は 1 m 程度であるのに対し、AMU442 系混合物の反応距離は 10 cm オーダーであった。これらの結果は、気相におけるデトネーションしやすさ (detonability) としては、AMU442 分解ガスの方が ADN 分解ガスよりも十分高いことを示唆している。また、1 m 程度の反応距離を有するということから、ADN 分解ガスの場合、デトネーションに遷移するリスクは比較的低いことが予想される。従来、1~2 段階の thermicity 履歴の場合、そのピーク位置を以て、反応誘導距離を定義することができる。今回の ADN 分解生成物の計算結果では、どのピークがデトネーション全体に対する反応誘導位置かを判断するのは困難と考えられた。今後は実験的なアプローチによる反応誘導距離の特定やセルサイズの実測、または計算的な臨界エネルギーの算出などから 2 組成の detonability の定量的評価を行うことが望まれる。

また、各分解ガスのモル分率変化および関連する反応に対する Rate of production を解析した結果、ADN 分解ガスおよび AMU442 分解ガスのどちらの場合についても、定常デトネーションでは定常燃焼の例と近い履歴や反応流れ⁷⁾を経ることが明らかとなった。このことより、ADN 分解ガスおよび AMU442 分解ガスの detonability の定性的特性は、これらの理論的着火遅れや定

常火炎に関する特性等と相関する可能性が示唆された。定量的な予測のためには、やはり煤膜法を用いたセル構造の取得¹⁵⁾や、Kawasakiらにより近年提案される反射点距離の評価¹⁶⁾など、実験的試みが不可欠と考えられた。

4.4. 総括

以上の結果から、ADN および ADN-EILPs の気相に着目したデトネーション特性の基礎的知見を獲得した。上述の通り、さらなる計算的アプローチに向けた課題と、実験的解釈の必要性を整理するに至った。最後に本成果を基に、当該研究が対象とする「ADN-EILPs と ADN の取扱性・安全性」に着眼する。高橋らにより、ADN-EILPs 調整による液化により、ADN の高い衝撃・静電感度がほぼ鈍化することが報告されている¹⁷⁾。このことから、ADN-EILPs は安全で取扱性の高い推進剤であることが期待されてきた。しかしながら、本研究が指し示す気相における反応性の順位はこれと相反する結果となった。このことから、推進剤そのもの（液体・固体）が取りうるハザードとその分解ガスが起こしうるハザードを区別して評価する重要性が新たに見出された。採択期間終了後も継続した研究を展開すると共に、他の高エネルギー物質に対する同様の特性を網羅的に探索することを目指す予定である。また、本研究は酸化剤として活用可能な高エネルギー物質の気相デトネーションに関連するものである。安全性の観点からの調査と並行して、候補が乏しいデトネーションエンジン向け液体酸化剤の適用性検討（および選出された液体酸化剤に対して、より有効な燃料の策定）も推し進める予定である。

参考文献

- [1] A. E. S. Nosseir, A. Cervone, and A. Pasini, Review of State-of-the-Art Green Monopropellants: For Propulsion Systems Analysts and Designers, *aerospace*, 8(1), **2021**, pp. 20.
- [2] S. Paterson and J. M. Davidson, Detonation in Ammonium Nitrate, *Nature*, 195, **1962**, pp. 277–278.
- [3] H. Matsunaga, H. Habu, and A. Miyake, Preparation and thermal decomposition behavior of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquid propellant, *Science and Technology of Energetic Materials*, 78(3), **2017**, pp. 69–74.
- [4] S. Gordon and B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, *NASA Reference Publication 1311*, **1996**.
- [5] <https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/sdt/>
- [6] <https://www.ansys.com/ja-jp/products/fluids/ansys-chemkin-pro>
- [7] N. Itouyama, Y. Izato, A. Miyake, and H. Habu, Construction and validation of a detailed gas-phase chemical reaction model for ammonium dinitramide based ionic liquids, *Science and Technology of Energetic Materials*, 81, **2020**, pp. 53–66.
- [8] V. P. Sinditskii, V. Y. Egorshv, V. V. Serushkin, and S. A. Filatov, Combustion of energetic materials controlled by condensed-phase reactions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 48, **2012**, pp. 81–99.
- [9] 井出雄一郎, ADN 系イオン液体の燃焼に関する実験研究, 総合研究大学院大学学位論文, **2017**.
- [10] O. P. Korobeinichev, L. V. Kuibida, A. A. Paletsly, and A. G. Shmakov, Molecular-Beam Mass-Spectrometry to Ammonium Dinitramide Combustion Chemistry Studies, *Journal of Propulsion and Power*, 14, **1998**, pp. 991
- [11] H. Matsunaga, H. Habu, and A. Miyake, Influence of aging on thermal decomposition mechanism of high performance oxidizer ammonium dinitramide, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 113, **2013**, pp.1387-1394.
- [12] N. Itouyama, H. Matsunaga, A. Wada, J. Kasahara, and H. Habu, Thermal analytical screening of effective catalysts for ignition of high energy ionic liquid propellants, *Proceeding of the 7th International Symposium of Energetic Materials and its Application*, B8-2, **2021**.
- [13] F. Viot, B. Khasainov, D. Desbordes, and H. N. Presles, Numerical Simulation of the Influence of Tuve Diameter on Detonation Regime and Structure in Mixture with Two-step Energy Release and Double Celler Structure, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 45(4), **2009**, pp. 435–441.
- [14] D. Davidenko, R. Mével, and G. Dupré, Numerical study of the detonation structure in rich H₂-NO₂/N₂O₄ and very lean H₂-N₂O Mixture, *Shock Waves*, 21, **2011**, pp. 85-99.
- [15] デトネーション研究会, デトネーションの熱流体力学 1 基礎編, 理工図書, pp. 91
- [16] A. Kawasaki and J. Kasahara, A Novel Characteristic Length of Detonation Relevant to Supercritical Diffraction, *Shock Waves*, 30(1), **2020**, pp. 1–12.
- [17] 高橋拓也, 秦啓晃, 岩井啓一郎, 野副克彦, 井出雄一郎, 羽生宏人, 徳留真一郎, アンモニウムジニトラミド系液体推進剤の物性, 火薬学会春季講演会, **2014**.
- [18] N. Ermolin, Heat-release mechanism in ammonium dinitramide flame, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 43, **2007**, 549–561.
- [19] K. Fujisato, H. Habu, and K. Hori, Condensed Phase Behavior in the Combustion of Ammonium Dinitramide, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 39, **2014**, pp.714–722.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Noboru Itouyama, Yu-ichiro Izato, Atsumi Miyake, Hiroto Habu	4. 巻 81
2. 論文標題 Construction and validation of a detailed gas-phase chemical reaction model for ammonium-dinitramide-based ionic liquids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 53-66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Itouyama Noboru, Matsunaga Hiroki, Habu Hiroto	4. 巻 45
2. 論文標題 Characterization of Continuous Wave Laser Heating Ignition of Ammonium Dinitramide Based Ionic Liquids with Carbon Fibers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Propellants, Explosives, Pyrotechnics	6. 最初と最後の頁 988 ~ 996
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/prop.201900352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊東山 登	4. 巻 JAXA-RR-20-007
2. 論文標題 高エネルギー物質の気相爆轟に関する基礎検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構研究開発報告：高エネルギー物質研究会令和2年度研究成果報告書	6. 最初と最後の頁 30-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 松永浩貴, 伊東山登, 塩田謙人, 伊里友一朗, 勝身俊之, 羽生宏人, 野田賢, 三宅淳巳	4. 巻 JAXA-RR-20-007
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構研究開発報告：高エネルギー物質研究会令和2年度研究成果報告書	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 和田明哲, 渡邊裕樹, 伊東山登, 月崎竜童, 池田知行, 飯塚俊明, 佐原宏典, 各務聡, 松永浩貴, 伊里友一朗, 塩田謙人, 松本幸太郎, 勝身俊之, 三宅淳巳, 笠原次郎, 志田真樹, 船瀬龍, 船木一幸, 羽生宏人	4. 巻 JAXA-RR-20-008
2. 論文標題 超小型探査機搭載に向けた革新的超小型推進系技術に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 将来深宇宙探査に向けた革新的超小型推進系研究グループ 2020年度研究成果報告書	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Nakata, K. Ishihara, K. Goto, N. Itouyama, H. Watanabe, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo, I. Funaki, K. Higashino, J. Braun, T. Meyer, and G. Paniagua	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental investigation of inner flow of a throat-less diverging detonation engine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of the Combustion Institution	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakata Kotaro, Ota Kosei, Ito Shiro, Ishihara Kazuki, Goto Keisuke, Itouyama Noboru, Watanabe Hiroaki, Kawasaki Akira, Matsuoka Ken, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko, Funaki Ikkoh, Higashino Kazuyuki, Braun James, Meyer Terrence, Paniagua Guillermo	4. 巻 -
2. 論文標題 Supersonic Exhaust from a Rotating Detonation Engine with Throatless Diverging Channel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Buyakofu Valentin, Matsuoka Ken, Matsuyama Koichi, Kawasaki Akira, Watanabe Hiroaki, Itouyama Noboru, Goto Keisuke, Ishihara Kazuki, Noda Tomoyuki, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko, Funaki Ikkoh, Nakata Daisuke, Uchiyama Masaharu, Habu Hiroto, Takeuchi Shinsuke, Arakawa Satoshi, Masuda Junichi, Maehara Kenji	4. 巻 59
2. 論文標題 Development of an S-Shaped Pulse Detonation Engine for a Sounding Rocket	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 850 ~ 860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.A35200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Goto Keisuke, Ota Kosei, Kawasaki Akira, Itouyama Noboru, Watanabe Hiroaki, Matsuoka Ken, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko, Funaki Ikko, Kawashima Hideto	4. 巻 38
2. 論文標題 Cylindrical Rotating Detonation Engine with Propellant Injection Cooling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 410 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taguchi Tomoya, Yamaguchi Masato, Matsuoka Ken, Kawasaki Akira, Watanabe Hiroaki, Itouyama Noboru, Kasahara Jiro, Matsuo Akiko	4. 巻 236
2. 論文標題 Investigation of reflective shuttling detonation cycle by schlieren and chemiluminescence photography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 111826 ~ 111826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2021.111826	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松永 浩貴, 伊東山登, 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	4. 巻 JAXA-RR-21-002
2. 論文標題 超小型推進系への利用を見据えた高エネルギーイオン液体の研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 高エネルギー物質研究会: 令和3年度研究成果報告書	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊東山登, 和田明哲, 羽生宏人	4. 巻 JAXA-RR-21-002
2. 論文標題 高エネルギーイオン液体推進剤の小型スラスタ概念設計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 高エネルギー物質研究会: 令和3年度研究成果報告書	6. 最初と最後の頁 6-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 伊東山登、ブヤコフバレンティン、野田朋之、石原一輝、後藤啓介、川崎央、渡部広吾輝、松岡健、松山行一、笠原次郎、松尾亜紀子、船木一幸、中田大将、内海政春、竹内伸介、岩崎祥大、和田明哲、増田純一、荒川聡、羽生宏人、山田和彦
2. 発表標題 S-520-31号機によるデトネーションエンジン実験の進捗状況：パルスデトネーションエンジン
3. 学会等名 令和二年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東山登, 伊里友一朗, 三宅淳巳, 笠原次郎, 羽生宏人
2. 発表標題 詳細化学反応を用いた高エネルギーイオン液体推進薬の着火特性解析
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東山登, 和田明哲, 松永浩貴, 笠原次郎, 羽生宏人
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東山登, 笠原次郎, 羽生宏人
2. 発表標題 レーザー輻射加熱による高エネルギーイオン液体推進薬の着火に関する研究
3. 学会等名 火薬学会2020年度春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Wada, T. Iizuka, N. Itouyama, H. Sahara, H. Habu
2. 発表標題 Propulsive Performance Analysis of Energetic Ionic Liquid Mono-Propulsion Systems for Micro-Spacecraft
3. 学会等名 Space Propulsion 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 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, 野副克彦, 久保田一浩, 羽生宏人, 野田賢, 三宅淳巳
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 高エネルギー物質研究の今後の展開
3. 学会等名 火薬学会2020年度春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noboru Itouyama, Koichi Matsuyama, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Hiroaki Watanabe, Keisuke Goto, Kazuki Ishihara, Valentin Buyakofu, Tomoyuki Noda, Jiro Kasahara, Akiko Matsuo, Ikkoh Funaki, et al.
2. 発表標題 Flight Demonstration of Detonation Engine System Using Sounding Rocket S-520-31: History from Development to Flight
3. 学会等名 2022 AIAA SciTech Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noboru Itouyama, Hiroki Matsunaga, Asato Wada, Jiro Kasahara, Hiroto Habu
2. 発表標題 Thermal analytical screening of effective catalysts for the ignition of high energy ionic liquid propellants
3. 学会等名 7th International symposium of energetic materials and its application (ISEM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Noboru Itouyama, Hiroki Matsunaga, Asato Wada, Jiro Kasahara, Hiroto Habu
2. 発表標題 State-of-art monopropellant development based on the combination of high-energy-density salts and Deep eutectic phenomena
3. 学会等名 The 3rd of International Conference of Materials and Systems for Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東山登, 笠原次郎, 松山行一, 松岡健, 川崎央, 渡部広吾輝, 後藤啓介, プヤコフバレンティン, 石原一輝, 野田朋之, 秋元雄希, 松尾亜紀子, 船木一幸, 中田大將, 内海政春, 羽生宏人, 竹内伸介, 荒川聡, 増田純一, 前原健次, 中尾達郎, 山田和彦
2. 発表標題 観測ロケットS-520-31号機プロジェクト: デトネーションエンジンシステムの宇宙動作実証結果
3. 学会等名 第4回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠原次郎, 松山行一, 松岡健, 川崎央, 渡部広吾輝, 伊東山登, 後藤啓介, 石原一輝, 伊藤志朗, 中田耕太郎, 佐藤寛, 松尾亜紀子, 船木一幸, 中田大將, 内海政春, 羽生宏人, 竹内伸介, 荒川聡, 増田純一, 前原健次, 中尾達郎, 山田和彦
2. 発表標題 観測ロケットS-520を用いた液体推進剤デトネーションエンジンシステム飛行実証実験
3. 学会等名 第4回観測ロケットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊東山登、松山行一、松岡健、川崎央、渡部広吾輝、後藤啓介、石原一輝、プヤコフバレンティン、野田朋之、笠原次郎、松尾亜紀子、船木一幸、中田大将、内海政春、竹内伸介、増田純一、荒川聡、羽生宏人、山田和彦
2. 発表標題 S-520-31号機によるデトネーションエンジンシステムの宇宙実験 - 実験結果報告とサクセスクラテリア評価 -
3. 学会等名 令和三年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	清華大学		