

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H00844

研究課題名(和文)凝縮相エネルギー物質の爆発学理

研究課題名(英文)Theoretical study on explosion of energetic materials

研究代表者

三宅 淳巳(Miyake, Atsumi)

横浜国立大学・先端科学高等研究院・教授

研究者番号：60174140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、先端計測技術および第一原理計算を用いて凝縮相エネルギー物質が呈する極限的な爆発反応を精密に測定・解析し、理論体系化する研究スキーム構築である。先端計測技術開発では、高速度カメラと二色法による複合測定や熱分析-高分解能飛行時間型質量分析などを用いて、凝縮相エネルギー物質に関する爆発反応の生起から分解、発火、燃焼、爆発に至るプロセス解析に適用した。理論的には、量子力学/連続溶媒和モデル法を活用し、第一原理から詳細反応モデルを構築することに成功し、凝縮相エネルギー物質の爆発学理構築に大きく貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学産業界からは、凝縮相エネルギー物質を含む高反応性化学物質の取扱いに関連して、爆発学理に基づいた爆発影響評価ならびにより精度の高いリスク評価への展開が強く求められていた。当該研究で構築した爆発反応に関する計測および計算手法は、化学反応計測に基づいたプロセスデザイン支援、化学反応危険性予測に基づいたプロセス管理指標の設定、および災害発生シナリオの体系的抽出とそれに基づいた防災減災戦略の策定に活用可能であることから、化学産業界ならびに航空宇宙産業の安全性向上と新規学術領域の構築に貢献した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to establish methodology that analyze and organizes explosion chemistry associated with high energetic materials based on advanced measurements and ab initio calculations. We conducted various measurements such as high-speed camera combined with two-color temperature radiometry and thermal analysis combined with high-resolution time-of-flight mass spectrometer to investigate wide range of explosion chemistry such as decomposition, ignition, combustion, and detonation. We succeeded in constructing a detailed reaction model from the first principle by utilizing the quantum mechanics/continuous solvation model method.

研究分野：安全工学

キーワード：エネルギー物質 爆発 発火 爆轟 詳細反応モデリング

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

凝縮相エネルギー物質の爆発によって創生される高温、超高压場は 10,000K, 100GPa に達し、そこでは高密度なエネルギーが 1 マイクロ秒以下に発生、解放され、通常では考えられない極限反応が進行している。これらの極限反応を適切に制御して工学的に活用することにより、新たな反応や物質の創製も試みられている。しかし、この極限反応が起こるメカニズムに関しては未解明な点が多く、古典的な理論によってマクロに解釈されているに過ぎなかった。また、試験条件や環境条件によって起爆、伝爆の挙動は変化するため、起爆限界は定性的理解に留まり、爆轟特性値は古典理論で予測される計算値には達せず、多くの場合、非理想的な爆轟挙動を呈する。これは、1 次元爆轟現象の大前提である反応速度や起爆、伝爆のメカニズムが現実と合致しないためであり、特にその挙動が顕著に現れる産業爆薬類では、古典理論を補うべき新たな爆轟モデルの構築が強く望まれており、これら非理想爆轟モデルの確立と、これを導入した爆発影響評価ならびにより精度の高いリスク評価への展開が強く求められていた。これらを達成するために、凝縮相エネルギー物質の爆発学理の構築、具体的には、凝縮相エネルギー物質が呈する極限的爆発反応を精密に測定・解析し、理論体系化する研究スキームの構築が必要であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、爆発現象の理解と予測精度を飛躍的に向上させるため、次の 2 点を達成し、爆発の発生、伝播及び爆発影響予測に至る体系的な爆発学理の構築を図ることである。

(1) 凝縮相エネルギー物質に関する爆発反応の生起から分解、発火、燃焼、爆発に至るプロセスを精密な実験で測定する手法を確立する。近年発達が著しい可視化技術や熱分析技術を、凝縮相エネルギー物質の爆発・燃焼・分解反応解析に適用し、その有効性を検証し、従来分析技術をアップデートする。

(2) 量子化学計算を用いて、凝縮相エネルギー物質の爆発・燃焼現象を第一原理より解析する。第一原理とは何ら実験的パラメータや調整を要しない純理論に基づく演繹的アプローチであり、上記(1)と対となるものである。本研究では、分子間の単一化学結合の組み替えである詳細反応機構レベルで凝縮相エネルギー物質の反応を定式化する手法を確立する。

3. 研究の方法

極限反応である凝縮相エネルギー物質の爆発反応を解析するために(1)実験的手法(帰納)と(2)理論計算的手法(演繹)の両面から検討を行った。

(1) 先端計測技術として、高速度カメラを用いた複合測定(二色法による温度複合計測など)、高感度熱量計による熱分解反応の精密熱量測定、高分解能飛行時間型質量分析計を用いた生成ガスの高精度分析、および電気化学測定と分光分析を組み合わせた電解反応解析技術を様々な凝縮相エネルギー物質の反応解析に適用し、その有効性を検証し、測定手法の確立を行った。

(2) 量子力学/連続溶媒和モデル(QM/PCM)法を活用し、凝縮相エネルギー物質の凝縮相における分解・燃焼反応に関する素反応機構の探索、各素反応の反応速度定数の推算、各化学種の熱力学データ推算を行った。エネルギー物質が呈する燃焼や爆発などの高速過渡現象を直接測定したり、その反応中のみに現れる短寿命化学種の分析を行ったりすることは、どのような高精度・高感度分析機器を用いても不可能である。このような過酷条件において、計算化学手法は威力を発揮し、化学種の生成と消滅のダイナミクスに関する描像を理論的に与えるものである。理論計算には実験的な検証が必要であるが、ここで(1)実験的手法がその役割を果たすことができるため、これらは相補的な関係である。

4. 研究成果

(1) 燃焼・爆発現象の可視化技術の深化

高速度カメラおよび物体の放射輝度を測定する 2 色法温度測定を用いた解析手法を用いて、燃焼分解の挙動とその際の温度計測を同時に行う手法を確立した。当該可視化手法を黒色火薬に特異的な火球破裂・分裂現象測定に適用し、当該現象を物理モデルで定式化することに成功した。これによって線香花火等が呈する液滴の連続破裂現象が、放出液滴の半径と内部気泡によって説明されることを見出した(図 1)。<引用文献①>

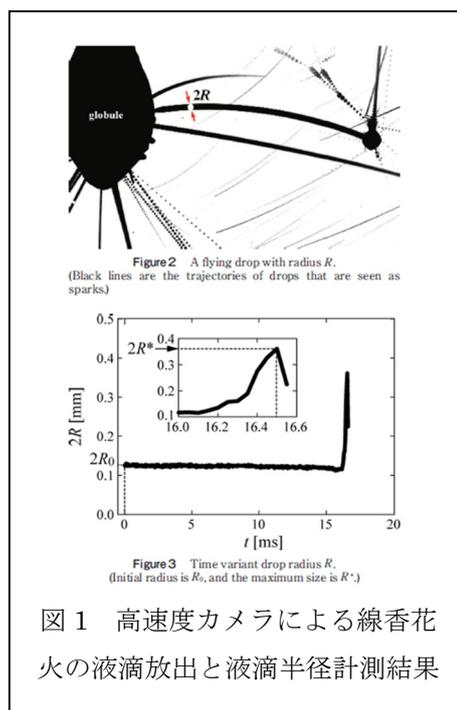


図 1 高速度カメラによる線香花火の液滴放出と液滴半径計測結果

(2) 先端分析化学手法の燃焼・分解反応への応用

分析化学手法に関する検討では複合測定技術の導入, 特に示差走査熱-熱重量-高分解能飛行時間型質量複合分析やサイクリックボルタンメトリー-紫外可視分光同時測定法などを検討し, これまでの測定技術では測定できなかったエネルギー物質の反応挙動を検出することに成功した。

示差走査熱-熱重量-高分解能飛行時間型質量複合分析について, 凝縮相エネルギー物質を主剤としたエネルギーイオン液体の分解反応解析に適用した。これは分解に伴い発生する熱と生成ガスを同時分析する手法であり, 従来技術は凝縮相エネルギー物質から発生する同質量生成ガス(亜酸化窒素と二酸化炭素など)の定性・定量に課題があった。当該分析手法は, 従来技術と比較して, 同時分析性を損なわずに, 生成ガスの精密質量分析ができる点が特に優れていた。その結果, これまで解析困難であった同質量を有する生成ガス種の峻別に成功し, 凝縮相エネルギー物質の反応機構解析技術が大幅に向上した。〈引用文献②〉

サイクリックボルタンメトリー-紫外可視分光同時測定法を高エネルギー物質に適用することで, 電気的励起に対する安定性について評価する手法を確立した。当該手法を高エネルギー物質アンモニウムジニトラミド推進剤に適用し, 電解反応によってこれの着火を制御できる可能性を見出した。

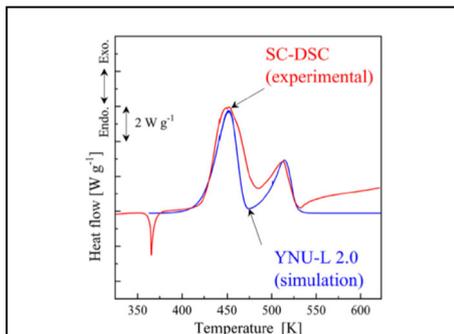


Fig. 2. Heat flow curves obtained from DSC measurements and simulation with the YNU-L2.0 model.

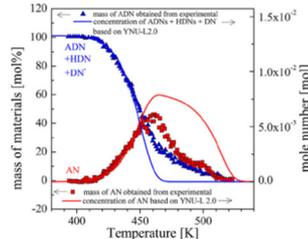


Fig. 4. Variations of ADN and AN in the condensed phase over time at a heating rate of 5 K min⁻¹. Experimental DSC-Raman measurements from Ref. [30] and simulated data based on the YNU-L2.0 model are plotted.

図 2 詳細反応シミュレーションと熱-分光分析結果の比較

(3) 凝縮相における詳細反応モデル化技術の確立

凝縮相エネルギー物質の凝縮相における詳細反応機構構築に関する方法論の基礎を確立することに本研究は成功した。自動車エンジン研究分野を中心に炭化水素系の「気相」反応理解はここ数年で大きく前進している一方で, 医薬品製造など多くの工業的に有用な反応が「液相」反応であるにも関わらず, 「液相」反応の理解は世界的にも未成熟であった。その主な障害として, 対象となる液相系に関する詳細な反応機構の理解とモデル化がなされていないことが特に問題であり, 当該研究の意義があった。詳細反応モデリングを, 量子化学計算に連続溶媒モデルに基づく溶媒効果を組み合わせる方法を用いて実験値を再現する熱力学データや速度パラメータを算出できることを見出した。本手法を用いて, 凝縮相エネルギー物質の詳細反応モデル構築を達成した。例えば, 高エネルギー物質アンモニウムジニトラミドの熱分解反応に関して 78 の化学種, 118 の素反応から構成される詳細反応モデルを構築し, これが熱分析, 分光分析, 生成ガス分析の結果を良く再現することを確認した(図 2)。これによって世界に先駆けてエネルギー物質の凝縮相詳細反応シミュレーションを達成した。〈引用文献③〉

(4) 様々な凝縮相エネルギー物質の詳細反応モデル構築

当該詳細反応モデリング技法を応用して, 様々な凝縮相エネルギー物質群(アンモニウムジニトラミド, 硝酸アンモニウム, 硝酸ヒドロキシルアミン, ヒドロキシルアミン, 硝酸グアニジン, ヒドラジン)について詳細反応モデルを構築し, 実験的検証を行った。当該モデル群は, 実験結果をよく再現し, 理論的に高精度な詳細反応モデリングが可能であることを示した。特に硝酸ヒドロキシルアミンの詳細反応モデルに関する論文は, 2019年の一般社団法人火薬学会の論文賞に選ばれた。〈引用文献④〉

(5) 液相化学種のエン트로ピー推算法の確立

凝縮相エネルギー物質に関する詳細反応モデリングを進める過程で, 詳細反応モデリング時に実施する量子化学計算に取り込む溶媒効果の抜本的な改善が必要となった。我々はQM/PCM法の理論に立ち返り, エン트로ピー算出モデルにおける溶媒効果を理論的に見直

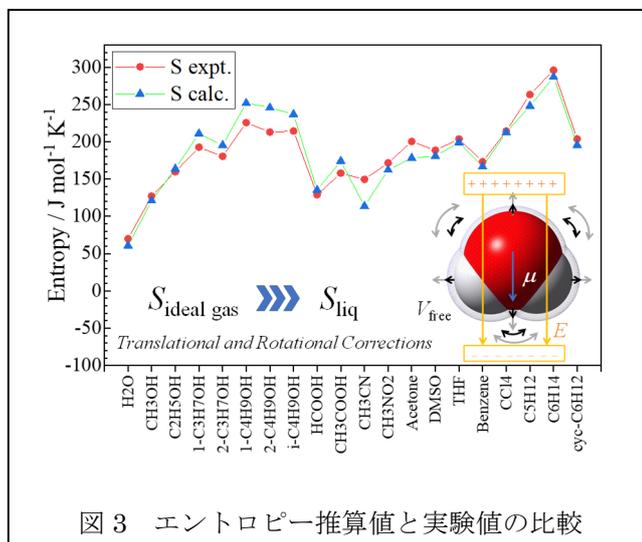


図 3 エン트로ピー推算値と実験値の比較

し改善した。従来 QM/PCM は溶媒を一様の連続誘電体として表現し、溶質分子の分極とその影響で分極した溶媒からの影響を自己無撞着的に計算することで分子が溶媒中に存在する効果を熱力学データ推算に取り込んできた。しかし溶媒分子により溶質の並進運動と回転運動が阻害される液体特有の効果を考慮できておらず、これが大きな誤差要因となっていた。これに対して、溶媒によって制限される溶質分子の並進/回転運動を理論的に補正し、液相熱力学データの計算精度を抜本的に改善し、簡便かつ良好に実験値を再現する手法を提案した(図 3)。当該成果を取りまとめた論文は英国王立化学会が発行する Phys. Chem. Chem. Phys. 誌の Hot article 2019 に選出された。〈引用文献⑤〉

(6) 第一原理分子動力学計算を用いた衝撃起爆過程の解析

衝撃起爆過程の解明が求められる硝酸アンモニウムについて、第一原理分子動力学計算を用いた格子振動-分子振動励起およびバンドギャップ解析を実施した。その結果、格子振動と分子振動が非調和的にカップリングすることで、衝撃エネルギーが分子に伝達され、分子結合が切断されるメカニズムを定性的に説明することができた。〈引用文献⑥〉

〈引用文献〉

- ① Y. Izato, K. Shiota, K. Satoh, T. Satoh, Y. Yahata, H. Habu, A. Miyake, Thermal and evolved gas analyses of decomposition of ammonium dinitramide-based ionic liquid propellant using TG-DSC-HRTOFMS, J. Therm. Anal. Calorim. 138 (2019) 1853-1861
- ② C. Inoue, Y. Izato, A. Miyake, M. Koshi, Bubble growth in non-evaporative drops of "Senko-hanabi", Sci. technol. Energy. Mater. 80 (2019) 41-45.
- ③ Y. Izato, A. Miyake, Detailed kinetic model for ammonium dinitramide decomposition, Combust. Flame 198 (2018) 222-229
- ④ Y. Izato, K. Shiota, A. Miyake, A detailed kinetics model for the decomposition of aqueous hydroxylammonium nitrate, Sci. technol. Energy. Mater. 80 (2019) 212-221
- ⑤ Y. Izato, A. Matsugi, M. Koshi, A. Miyake, A simple heuristic approach to estimate the thermochemistry of condensed-phase molecules based on the polarizable continuum model, Phys. Chem. Chem. Phys. 21 (2019) 18920-18929
- ⑥ 伊里友一朗, 塩田謙人, 三宅淳巳, 第一原理分子動力学計算を用いた圧縮下における硝酸アンモニウムの格子振動解析, 2020 年度火薬学会春季研究発表会講演予稿集, 43 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yu-ichiro Izato, Kento Shiota, Atsumi Miyake	4. 巻 80
2. 論文標題 A detailed kinetics model for the decomposition of aqueous hydroxylammonium nitrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 212 ~ 221
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 -
1. 著者名 Shiota Kento, Izato Yu-ichiro, Habu Hiroto, Miyake Atsumi	4. 巻 138
2. 論文標題 Reactivity analysis of ammonium dinitramide binary mixtures based on ab initio calculations and thermal analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 2615 ~ 2622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-019-08557-2	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 Izato Yu-ichiro, Shiota Kento, Satoh Kenta, Satoh Takashi, Yahata Yukinori, Habu Hiroto, Miyake Atsumi	4. 巻 138
2. 論文標題 Thermal and evolved gas analyses of decomposition of ammonium dinitramide-based ionic liquid propellant using TG-DSC-HRTOFMS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 1853-1861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-019-08475-3	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 Izato Yu-ichiro, Shiota Kento, Miyake Atsumi	4. 巻 143
2. 論文標題 Condensed-phase pyrolysis mechanism of ammonium nitrate based on detailed kinetic model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	6. 最初と最後の頁 104671 ~ 104671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jaap.2019.104671	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 Izato Yu-ichiro, Matsugi Akira, Koshi Mitsuo, Miyake Atsumi	4. 巻 21
2. 論文標題 A simple heuristic approach to estimate the thermochemistry of condensed-phase molecules based on the polarizable continuum model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 18920 ~ 18929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cp03226f	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 Izato Yu-ichiro, Miyake Atsumi	4. 巻 198
2. 論文標題 Detailed kinetic model for ammonium dinitramide decomposition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 222 ~ 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2018.09.013	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 Izato Yu-ichiro, Miyake Atsumi	4. 巻 134
2. 論文標題 Kinetic analysis of the thermal decomposition of liquid ammonium nitrate based on thermal analysis and detailed reaction simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 813 ~ 823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-018-7322-8	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 Izato Yu-ichiro, Miyake Atsumi	4. 巻 79
2. 論文標題 A detailed chemical kinetics model for the combustion of gas-phase guanidine nitrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 166 ~ 174
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 -

1. 著者名 Izato Yu-ichiro, Miyake Atsumi	4. 巻 36
2. 論文標題 The decomposition pathways of ammonium dinitramide on the basis of ab initio calculations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 302 ~ 315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/07370652.2017.1405099	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 -

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 H. Matsunaga, N. Itouyama, K. Shiota, Y. Izato, T. Katsumi, H. Habu, M. Noda, A. Miyake
2. 発表標題 Study on high energetic ionic liquids for propellant
3. 学会等名 3rd New Energetics Workshop, Stockholm, Sweden (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Matsunaga, K. Katoh, H. Habu, M. Noda, A. Miyake
2. 発表標題 Thermal behaviour of ammonium dinitramide-based high energetic ionic liquid under reduced pressure
3. 学会等名 12th European Symposium on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Izato, A. Miyake
2. 発表標題 Thermal analysis and detailed chemical reaction simulation of ammonium dinitramide decomposition
3. 学会等名 12th European Symposium on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, A. Miyake
2 . 発表標題 Reactivity analysis on ammonium dinitramide binary mixtures in condensed phase
3 . 学会等名 12th European Symposium on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. Inoue, Y. Izato, A. Miyake M. Koshi
2 . 発表標題 High-speed visualization measurement of Senko-Hanabi
3 . 学会等名 16th International Symposium on Fireworks (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 C. Inoue, Y. Izato, A. Miyake M. Koshi
2 . 発表標題 Scaling law of Senko-Hanabi
3 . 学会等名 16th International Symposium on Fireworks (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Izato, C. Inoue, A. Miyake, M. Koshi
2 . 発表標題 Thermal analysis for chemical reactions of Senko-Hanabi
3 . 学会等名 16th International Symposium on Fireworks (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Hayata, K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Influences of chemical dyes on laser ignitionability and thermal stability of ammonium dinitramide-based energetic ionic liquid
3 . 学会等名 16th International Symposium on Fireworks (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Thermal study of ammonium dinitramide and acetamide binary mixture and their agarose mixture
3 . 学会等名 16th International Symposium on Fireworks (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Matsunaga, K. Katoh, H. Habu, M. Noda, A. Miyake
2 . 発表標題 Preparation and thermal decomposition behavior of high energetic ionic liquids based on ammonium dinitramide and amine nitrates
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, and A. Miyake
2 . 発表標題 Thermal properties of ADN based ionic liquid gel propellants
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Hayata, K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Laster ignition and thermal property of ammonium dinitramide based energetic ionic liquid propellants by including chemical dyes
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Izato, M. Koshi, A. Miyake
2 . 発表標題 A Kinetic Model for combustion of hydroxylammonium nitrate (HAN)-based propellants
3 . 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Izato, A. Miyake
2 . 発表標題 Kinetic analysis and detailed chemical reaction simulation for ammonium nitrate decomposition
3 . 学会等名 4th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Matsunaga, K. Katoh, H. Habu, M. Noda, A. Miyake
2 . 発表標題 Evolved gas analysis of thermal decomposition and combustion of high energetic ionic liquid based on ammonium dinitramide
3 . 学会等名 4th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Thermal study on complex formation of ADN mixtures
3 . 学会等名 4th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Thermal and structure analysis of ammonium dinitramide and nitrate salt eutectic mixtures
3 . 学会等名 4th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Kuroki, Y. Izato, A. Miyake
2 . 発表標題 Validation for a condensed phase reaction model of hydroxylammonium nitrate aqueous based on kinetic analysis
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Izato, A. Miyake
2 . 発表標題 Detailed reaction simulation for thermal decomposition of ammonium dinitramide (ADN)
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Matsunaga, K. Katoh, H. Habu, M. Noda, A. Miyake
2 . 発表標題 Thermal decomposition and combustion behavior of high energy ionic liquid based on ammonium dinitramide
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Izato, A. Miyake
2 . 発表標題 Modeling for decomposition reactions of aqueous hydroxylammonium nitrate solution
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Vapor Pressure measurement of ammonium dinitramide binary mixtures using thermogravimetric analysis
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Hayata, K. Shiota, Y. Izato, H. Matsunaga, H. Habu, A. Miyake
2 . 発表標題 Gasification behavior of ammonium dinitramide based ionic liquid propellants under low pressure condition
3 . 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakashima, Y. Izato, H. Matsunaga, E. Higashi, S. Takagi, A. Miyake, K. Katoh
2. 発表標題 Combustion behavior of guanidine nitrate/basic copper nitrate
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究分担者	井上 智博 (Inoue Chihiro) (70466788)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	伊里 友一郎 (Izato Yu-ichiro) (90794016)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・助教 (12701)	
研究分担者	塩田 謙人 (Shiota Kento) (30827837)	横浜国立大学・先端科学高等研究院・特任教員(助教) (12701)	