

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14875

研究課題名(和文)パルス放電型反応促進機構を用いたグリーンプロペラントロケットの研究

研究課題名(英文) Research on Reaction Promotion of Green Propellant by Pulsed Electric Discharge for Space Propulsion

研究代表者

青柳 潤一郎 (AOYAGI, Junichiro)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10453036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：低毒性で取扱が比較的容易なグリーンプロペラント(SHP163推進剤)の発熱反応をパルス放電で誘起して推力発生する小型ロケットを提案し、エレクトロスプレーを使った噴射装置および8 J級パルス放電型反応機構を設計、製作した。ロケット作動試験は真空チャンバ内で行った。エレクトロスプレーへの電圧印加に伴い推進薬の液滴が放出し、パルス放電が発生した。特に同軸円環型のパルス放電電極の場合、発熱反応を伴わないエタノールで得られた力積と比べて、SHP163を適用した際の力積が大きかった。したがってパルス放電によってSHP163の発熱反応を誘起し、推力が向上していると考えられ、本提案の有用性を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

利用エネルギーに制約がある超小型衛星において、少ない電気エネルギーでグリーンプロペラントの化学反応を起こしてエネルギーを取り出し、推力に利用する推進系が提供できる。パルス放電装置は簡単な構造なので、固体触媒で化学反応を起こす方法に比べて低コスト、高信頼性の推進系になると期待できる。超小型衛星にも推進系が使えるようになると、ミッションの幅を広げることができる。またグリーンプロペラントは低毒性・安定性の推進剤なので、超小型衛星の安全性にも貢献し、宇宙利用ユーザの拡大・汎用化を促進する。

研究成果の概要(英文)：I suggested a new micro propulsion system which utilize pulsed electric discharge, instead of solid catalyst bed, to initiate exothermic reaction of green propellant. To confirm its valuable operation, I designed and constructed an electrospray system and some pulsed electrical discharge devices. As green propellant, I took hydroxyl ammonium nitrate based propellant, called SHP163. When green propellant was injected to the devices, in some conditions, pulsed electrical discharge were initiated successfully in a vacuum environment. In case of ethanol propellant, the device generated impulse by exhausting the plume. On the other hand, it is remarkable that SHP163 generated larger impulse than ethanol. We considered that the chemical exothermic reaction of SHP163 was occurred by the pulsed discharge, and the energy enhanced the impulse effectively.

研究分野：宇宙工学

キーワード：グリーンプロペラント パルスプラズマ 反応促進 電機推進機

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 質量が 100 kg 以下の超小型衛星は、大型衛星と比べると短期間、低コストでの製作が可能のため、民間企業の衛星開発や宇宙利用といった宇宙産業への参入が増加している。各国政府機関も小型衛星を利用した宇宙開発、利用を推奨する傾向にある(SIA report, 2016)。超小型衛星は自身の姿勢制御を磁気トルカやリアクションホイールをよく用いており、姿勢制御だけでなく軌道変更も可能とするロケット推進系の搭載実績がほとんど無い。今の超小型衛星ミッションは軌道の制御を行わないためロケット推進系は不要であると考えられるが、今後は、例えば複数の超小型衛星の位置を正確に制御する必要のある編隊飛行ミッションなど、より高度なミッションの要求があったり、ミッション終了後に宇宙デブリ化することを避けるために積極的に大気圏に再突入させるためのロケット推進系の要求が増えると見込まれる。超小型衛星の取扱い性を考えると、ロケット推進系には安全、低コスト、高信頼性が要求されると考える。

(2) ロケットで使われる一液式推進薬は、一般に固体触媒との接触によって化学反応を起こしてガス化、発熱する推進薬である。従来はヒドラジン( $N_2H_4$ )が多用されていて、性能は高いが毒性が非常に強いため、取り扱える企業や研究機関に限られる。そこで最近ではグリーンプロペラントと呼ぶ低毒性の一液式推進薬の研究が盛んである。グリーンプロペラントは例えば過酸化水素( $H_2O_2$ )、HAN (Hydroxyl Ammonium Nitrate;  $(NH_3OH)^+(NO_3)^-$ )系または ADN (Ammonium Di-Nitramide;  $(NH_4)^+(N_3O_4)^-$ )系の推進薬が挙げられる。超小型衛星の低コスト化や宇宙利用の拡大といった観点から、超小型衛星に搭載する安全、低コスト、高信頼性のロケットを実現するためにはグリーンプロペラントの適用が必須であると考えられる。

(3) 応募者のこれまでに 1)放電によるグリーンプロペラントの分解反応促進の研究、と 2)パルス放電を使ったロケット (パルス型プラズマスラスタ, PPT) の研究に取り組んできた。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、これまでの研究成果を応用した「パルス放電によるグリーンプロペラント分解反応促進機構を用いたロケット」を提案し、小型衛星用低コスト・高信頼性の推力 1~10mN 級ロケット実現を目指す。

(2) 3 年間の研究期間で取り組む内容は以下のとおり。

- 1) エレクトロスプレーによるグリーンプロペラント微細噴射特性の解明
- 2) グリーンプロペラントの反応促進に必要なパルス放電条件の解明
- 3) パルス放電機構を搭載したグリーンプロペラントロケットの実験室モデル設計・製作と動作試験および性能評価

### 3. 研究の方法

(1) エレクトロスプレーを使ったグリーンプロペラントの供給装置を設計、製作した。金属製キャピラリーに推進薬を供給後、高電圧を印加して、キャピラリーから推進薬が噴出しているかを確認した。作動確認は最初に大気圧下で行い、その後真空環境下でも実施した。

(2) 推進剤の液滴供給によりパルス放電を発生して、その放電エネルギーを推進薬に投入するパルス放電型反応機構を設計、製作した。

(3) 真空中におけるグリーンプロペラント供給によるパルス放電型反応機構の作動を確認した。またパルス放電が発生した際の放電電流と電圧、反応機構下流部に発生した力積を測定した。

(4) グリーンプロペラントは HAN 系推進薬の SHP163 を使用した<sup>1)</sup>。また比較参考のために、発熱反応を伴わないエタノールを用いた。

### 4. 研究成果

(1) 図 1 に示すエレクトロスプレーを使ったグリーンプロペラント噴射装置を設計、製作した。大気中でキャピラリー(anode)と対向電極(cathode)間に 3 kV の電圧を印加すると、対向電極への液滴の付着を確認したため、キャピラリーから噴射していることが分かった。この結果から、キャピラリーに高電圧を印加することでグリーンプロペラントを噴射可能であるといえる。

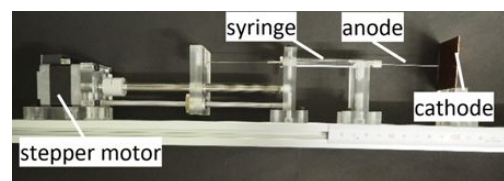


図 1. エレクトロスプレー噴射装置

(2) 真空中でエレクトロスプレーを作動させるために、推進薬の供給制御用のバルブを備えた図 2 の噴射装置を設計、製作した。真空中での作動試験の結果、エタノールと SHP163 共に真

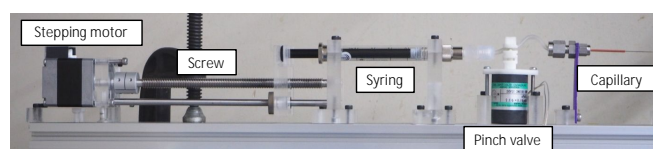


図 2. 真空中作動用エレクトロスプレー噴射装置

空中でもキャピラリへの高電圧印加によって液滴の噴射が可能であることを確認した。

(3) 図 3, 4 に示すパルス放電型反応機構を設計、製作した。図 3 は平行平板型で、キャピラリを電極間の上流側や、電極に開けた穴から挿入した。図 4 は同軸円環型で、キャピラリを円筒電極の中心軸上流から挿入した。パルス放電のエネルギーは 8 J とした。

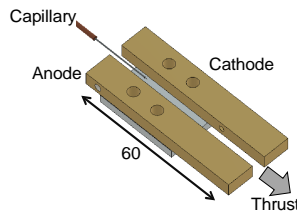


図 3. 平行平板型パルス放電部

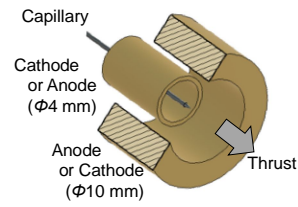


図 4. 同軸円環型パルス放電部

(4) 真空中でエレクトロスプレーをパルス放電型反応機構と組み合わせた作動試験を実施した。エタノールと SHP163 共に、キャピラリへの電圧印加による推進薬の噴射によってパルス放電が発生した。図 5 はエタノールを使用した際の各電極で得られた力積 (Impulse bit) である。パルス放電用の電極間に電圧を印加しないでエレクトロスプレーだけの噴射だけでも力積は発生していたが (凡例 ) パルス放電が発生すると力積が大きくなった (凡例 ) ことから、パルス放電によって推進剤が加熱、膨張したり、電磁気的な加速があったためだと考えられる。また、平行平板型と同軸円環型では力積の差はほとんど見られなかった。次に図 6 は SHP163 を使用した際の各電極で得られた力積である。SHP163 使用時にはエレクトロスプレーのみでの力積発生は確認できなかった。SHP163 はエタノールと比べて粘性が高く、キャピラリからの噴射が少なかったためだと考えられる。平行平板型のパルス放電機構では、SHP163 で得られた力積はエタノールの場合と同程度だった。一方で同軸円環型のパルス放電機構では、SHP163 の方が平均して 2 倍の力積を得た。これらの結果から、SHP163 はキャピラリからの噴射後にパルス放電によって発熱を伴う反応を起こすことができたと考えられる。そして平行平板型では周囲が開放していたため力積に変化がなく、一方で同軸円環型では比較的周囲が密閉された状態で気化したガスの圧力が上昇して力積が向上したと考えられる。

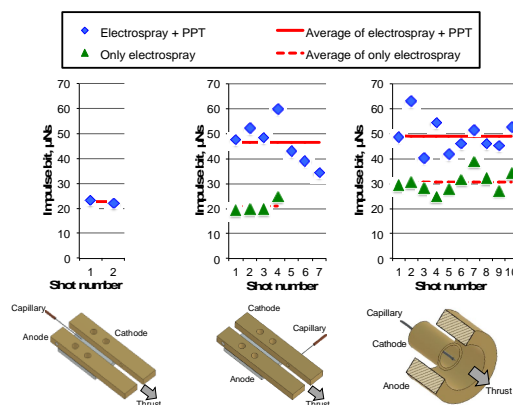


図 5. エタノール噴射時の力積

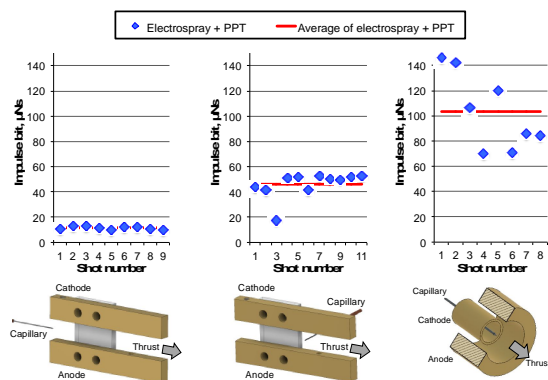


図 6. SHP163 噴射時の力積

(5) 本研究の結果、パルス放電によってグリーンプロペラントである SHP163 の発熱を伴う反応を起こすことができ、そのエネルギーを推力に変換することが可能であることが示せた。目標とする推力を得るために、推進薬の供給量や放電エネルギーとの関係、電極を含めたロケットの設計など、詳細に検討していく必要がある。

#### 参考文献

1. Amrousse, R., Katsumi, T., Azuma, N., and Hori, K., "Hydroxylammonium nitrate (HAN)-based green propellant as alternative energy resource for potential hydrazine substitution: From lab scale to pilot plant scale-up," *Combustion and Flame*, Vol. 176, February 2017, pp. 334-348.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中山絢斗、青柳潤一郎
2. 発表標題 エレクトロスプレー噴射パルスプラズマスラスタのエタノールを用いた基礎研究
3. 学会等名 平成30年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichiro AOYAGI and Kento NAKAYAMA
2. 発表標題 Ignition Capability of Pulsed Plasma Thruster with Green Liquid Propellant
3. 学会等名 The 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究テーマ：青柳研究室-山梨大学/工学部/機械工学科/宇宙工学研究室 <a href="http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/aoyagi/research.html">http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/aoyagi/research.html</a>
---

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
---------------------------	-----------------------	----