

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04919

研究課題名（和文）パルス放電によるグリーンプロペラント反応ロケットの噴射・放電条件の解明と性能評価

研究課題名（英文）Clarification of Reaction Conditions between Pulsed Electric Discharge and Green Propellant in Rockets

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：取扱が比較的容易なため、比較的低コストの小型衛星とも相性のいいIHAN系グリーンプロペラントについて、その発熱反応をパルス放電で誘起して推力に変換するロケットを提案した。エレクトロスプレーインジェクタの流量を抑える改修を施して、放電エネルギー8 Jの放電反応機構内で噴射した結果、同軸型の反応機構においてグリーンプロペラントの発熱反応とみられるインパルス向上が確認できた。さらに電磁石とバネ機構を用いた噴霧インジェクタを設計、製作したが、真空中での安定作動を達成できず、その改善案を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人工衛星の軌道を調整するロケットにおいて、安全性が高く性能も良い推進剤を着火するために放電を活用する研究である。真空中での推進剤噴射精度を上げて、放電による推力発生を今まで以上に正確に評価できたり、最終的には安定した噴射ができなかったが噴射装置を試作して真空中作動試験ができたことから、安全、高信頼性、高性能のロケットの設計指針が得られた。この成果は特に、現在利用が増え続けている質量500 kg以下の小型衛星の高性能化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Green propellant is attracted to small satellites because of its lower toxicity and easy handling. I suggested a pulsed electric discharge device to induce the exothermal reaction of green propellant. An electro spray type injector was constructed and improved to reduce its feeding mass. Then, a green propellant was injected to an electric discharge reactor. As the result, improvement of impulse was observed when the green propellant was utilized in case of coaxial configuration. It was considered that effective exothermic reaction was induced from the propellant. On the other hand, a new injector was designed and constructed. Unfortunately, it was difficult to achieve stable operation about the new injector.

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 質量 100kg 以下の超小型衛星は、大型衛星と比較して特に短期間、低コストでの製作が可能で、近年は民間企業の参入も増えて利用拡大が著しく、各国政府機関も小型衛星の推奨傾向にある(SIA report, 2018)。超小型衛星はミッション遂行に必要な自身の姿勢を制御するために、磁気トルカやリアクションホイールを用いるが、これらは軌道の制御ができない。軌道変更を可能とするにはロケット推進系が必要だが、その搭載実績はまだ少なかったり、十分な性能とは言えない。ただし今後はより高度な編隊ミッションや、宇宙デブリの抑制のために、安全、低コスト、高信頼性の超小型衛星用ロケットによる軌道制御要求は増加していくと考える。

(2) ロケットで使われる一液式推進剤は、一般に予熱した固体触媒との接触によって化学反応を起こしてガス化、発熱する推進剤である。従来の大型衛星ではヒドラジン(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いため、取り扱い時の安全性確保にコストがかかる。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剤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; $(NH_4)^+(N_3O_4)^-$)系の推進剤が挙げられる。超小型衛星の低コスト化や宇宙利用拡大の観点から、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) グリーンプロペラントの化学反応を誘起するための固体触媒は、多孔質セラミック材に金属触媒が担持されたものが主流だが、反応時の高温環境への耐性が必要であり、特にヒドラジンより高温になることが期待されるグリーンプロペラントでは、その材質や形状の研究開発と耐久性評価が必要になる。一方で研究代表者はこれまでに、放電プラズマを使ってグリーンプロペラントの反応誘起する機構を提案し、研究に取り組んできた。また同時にパルス放電を使った固体推進剤ロケットの開発研究にも携わってきた。

2. 研究の目的

(1) 本研究はグリーンプロペラントの反応促進機構にパルス放電を使った固体推進剤ロケットの研究成果を応用した、安全、低コスト、高信頼性の無触媒型ロケットの実現を目的とする。

(2) 3年間の研究期間で取り組む内容は以下のとおり。

- 1) グリーンプロペラント噴霧特性の向上
- 2) 低電力、高放電エネルギーのパルス放電機構の設計、製作
- 3) 上記2)を含む作動試験と改修による、噴射条件と放電条件の解明と性能評価

3. 研究の方法

(1) ステンレス細管インジェクタの安定供給を目的とした改修と真空中作動試験を実施した。

(2) パルス放電機構を設計、製作し、インジェクタと組み合わせた放電作動検証および力積測定試験を実施した。

(3) 噴霧インジェクタを設計、製作し、真空中での作動検証を実施した。

(4) グリーンプロペラントは HAN 系推進剤を使用した。また比較参考のために発熱反応を伴わない水とエタノールを用いた。

4. 研究成果

(1) 図1に示すステンレス細管を使ったエレクトロスプレーインジェクタについて、従来の供給流量が過剰だった懸念があったため、流路配管を改修することで供給量を従来の4割に低減することができた。より適切な放電条件の評価ができると期待できる。

(2) 図2に示す放電反応機構を設計、製作した。これらに(1)で記したインジェクタを挿入して真空中における放電確認試験を実施した。放電エネルギーは8Jとした。いずれの反応機構においても各推進剤供給によって放電が起きて、インパルスの発生を確認した。図3に平行平板型反応機構におけるインパルス測定結果を示す。インジェクタ改修前に比べて改修後もインパルスが低下していないことから、改修前の供給量が過剰で、改修によってより適切な量の供給になったことが分かった。またエタノールと HAN 系推進剤でインパルスの差が見られなかったため、HAN 系推進剤による発熱反応を有効に活用できなかったと考えられる。

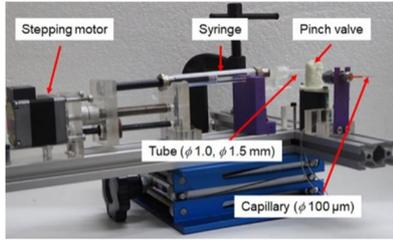
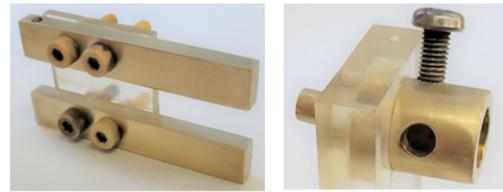
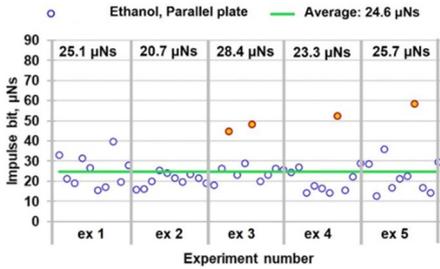


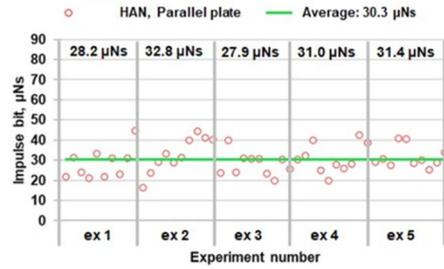
図 1. エレクトロスプレーインジェクタ



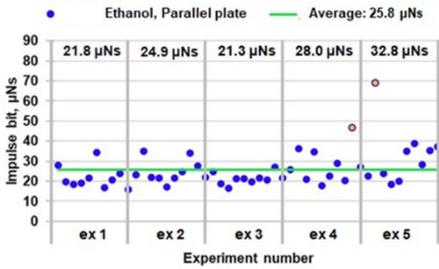
(a) 平行平板型 (b) 同軸型
図 2. 放電反応機構



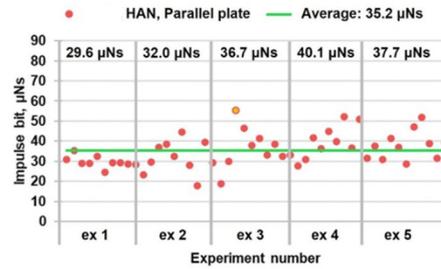
(a) インジェクタ改修前、エタノール



(b) インジェクタ改修前、HAN 系推進剤



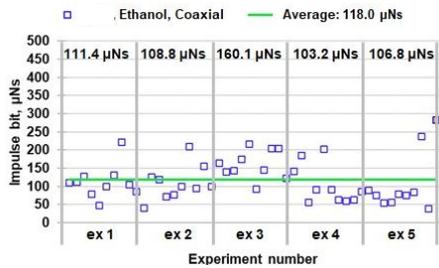
(c) インジェクタ改修後、エタノール



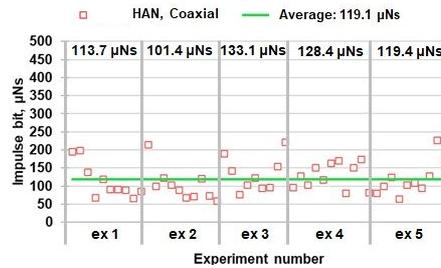
(d) インジェクタ改修後、HAN 系推進剤

図 3. 平行平板型反応機構を用いたインパルス測定結果

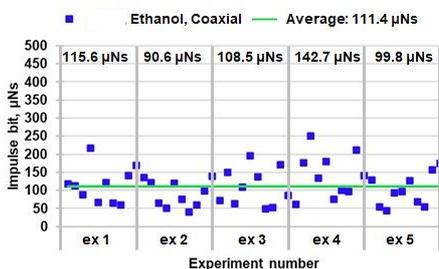
(3) 同軸型反応機構におけるインパルス測定結果を図 4 に示す。改修前は推進剤の過剰供給によって推進剤の違いによるインパルスの差は確認できなかったが、インジェクタ改修によってエタノールより HAN 系推進剤のインパルスの方が大きく得られた。よって、同軸型反応機構は HAN 系推進剤による発熱反応を有効にインパルス向上に寄与できたと考えられ、パルス放電機構の設計のために有用な実験結果が得られた。



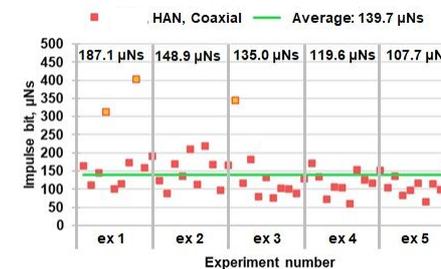
(a) インジェクタ改修前、エタノール



(b) インジェクタ改修前、HAN 系推進剤



(c) インジェクタ改修後、エタノール



(d) インジェクタ改修後、HAN 系推進剤

図 4. 同軸型反応機構を用いたインパルス測定結果

(4) 放電エネルギー 8J に加えて 2J の放電部について、電極の同軸配置を詳細に検証した。中心軸電極と外縁部電極の極性が推進性能に与える影響や、電極損耗の影響を明らかにできて、グリーンプロペラント反応促進ロケットへの適用に有用な結果が得られた。

(5) (1)に示したインジェクタでは、改修後も真空中でのリークや閉塞する場合があります、長期の作動試験ができなかったため、電磁石とバネ機構を用いた噴霧インジェクタを設計、試作した。図5に示すように真空中での作動試験を繰り返し、改修を継続したものの、最終的にバルブ開閉による安定した推進剤噴射を確認できなかった。



図5. インジェクタ作動試験

(6) そこで研究期間の終盤に、加圧ガスによる供給方法について検討し、噴霧ノズル、貯蔵タンク、バルブの選定活動を実施した。噴霧ノズルはコスト抑制のため市販品から選定し、微小の粒子径および流量に対応するものを選定した結果、8J級のパルス放電装置で想定する供給量にも対応できることが分かった。また、貯蔵タンクは小型で耐圧性を確保する仕様を、バルブも適用圧力と感度・精度の仕様をもとに選定した。将来的な実験系構築において有用な知見を整理することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiro Mori, Nobuhiro Ogihara and Junichiro Aoyagi
2. 発表標題 Fundamental Study of Electropray Injection of HAN Based Propellant to Pulsed Plasma Thruster
3. 学会等名 The 15th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山梨大学 工学部機械工学科 青柳・宇宙工学研究室 https://aoyagispace1ab.com/

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