

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14255

研究課題名(和文)非自燃固体推進薬をN20アークで着火・同ガス流でON-OFF制御する小型ロケット

研究課題名(英文)A solid propellant micro-thruster using N20 for combustion control

研究代表者

橘 武史 (Tachibana, Takeshi)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50179719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、酸化剤不足の固体推進剤に、不足分の酸化剤成分ガスの供給調整によりON-OFFを含む推力制御が可能とする機構の小型の衛星用スラスタ技術を実験と解析により確率することを目的とした。ストランド燃焼器を用いた基礎的な現象解明においては、同一の燃焼室圧力及びN20供給方法ではN20供給量の違いで燃焼速度に余り変化はないこと、通常の固体推進薬と同様に圧力の上昇に伴い燃焼速度は速くなること、試作機テストでは、まず本提案概念が成立すること、比推力は換算実験値で理論値の3/4近くまで達成されたが、理論値に及ばない理由として熱損失や燃焼に寄与しないN20の存在が考えられること、等が明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed at developing a small satellite thruster technology of a mechanism that enables ON-OFF included thrust control by supplying and adjusting the shortage of oxidizer component gas to fuel rich solid propellant by experiment and analysis. The test for fundamental phenomena using a strand combustor showed that the combustion rates were not much affected by N20 supply amount under the same combustion chamber pressure and N20 supply method, and that they increased with pressure rise like ordinary solid propellants. The test with a prototype thruster showed that the proposed concept is established, then that the corrected specific impulse was nearly 3/4 of the theoretical value, which was probably because of heat loss and the existence of wasted N20 not contributing to combustion reaction.

研究分野：燃焼学

キーワード：小型推進機 固体推進剤 燃焼制御

### 1. 研究開始当初の背景

衛星のミッションの多様化に伴い、高機能な小型ロケット(スラスタ)が求められている。その推進方法として、電気推進は高比推力には適しているがキック力が必要とされるミッションには不十分である。固体推進薬を用いることが出来れば高推力が得られるが、動作のON/OFFや推力の調整には従来の固体推進薬は不向きとされてきたが、申請者が開発してきた非自燃性固体推進薬を用い、これをN<sub>2</sub>Oなどの酸化性ガスを作動流体としてアーク等で高温着火源とし、これにより着火後は要求推力に応じてこのガス流れのみで燃焼制御することが出来れば、双方の欠点を補間し、新たなミッションに供することの出来る小型スラスタが実現される。

### 2. 研究の目的

固体推進薬を用いた推進機は構造がシンプルで小型軽量/低コスト化が実現しやすく、推進薬の保存も容易であるため優位である。他方、固体推進薬は一度点火されると燃焼を持続する自立燃焼性(自燃性)を有するため、燃焼のON/OFFを含む制御が困難で繰り返し作動を必要とする推進機には不向きであった。

そこで、従来の固体推進薬よりも酸化剤の配合比を減らし自燃性を抑制した非自燃性固体推進薬を用い、不足する酸化剤は外部から供給することで燃焼の制御を可能とする固体推進機を本研究では提案している。具体的には、燃焼室に酸化剤を供給しながら固体推進薬に点火し、点火装置停止後も酸化剤の供給を継続することで燃焼が維持され、供給を断つことで燃焼が停止される機構である。

この方式が実現できれば、固体推進機の短所であった推力のON/OFFを含む制御が可能となってくる。本研究では、外部から供給する酸化剤に亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)を適用し、N<sub>2</sub>Oで燃焼制御する固体推進機を試作し作動実験を行い、燃焼ON/OFF応答性やN<sub>2</sub>O供給量、固体推進薬の配置、ノズルが性能に与える影響を調べた。また、本研究で用いる非自燃性固体推進薬の燃焼特性を把握するため、燃焼室圧力、酸化剤供給量、酸化剤供給方法が燃焼速度に与える影響も調査した。

### 3. 研究の方法

HTPB/AP系コンポジット推進薬はFig.1に示されているように燃料成分であるHTPBと酸化剤成分であるAPの配合比により比推力性能が異なる。本研究で使用を予定する固体推進薬は、最大推進性能が得られる一般的な固体推進薬より酸化剤であるAPの含有量を幾分減らしHTPB/AP = 30/70 wt%としたものである。

この推進薬は、低圧下では自燃性が抑制されたもので、燃焼維持に不足することになる酸化剤割合は外部からN<sub>2</sub>O(亜酸化窒素)

を供給することで補われる。非自燃性固体推進薬の側面にはレストリクタ(燃焼抑制剤)を塗布することで、側面からの燃焼を抑制し、端面燃焼させる。

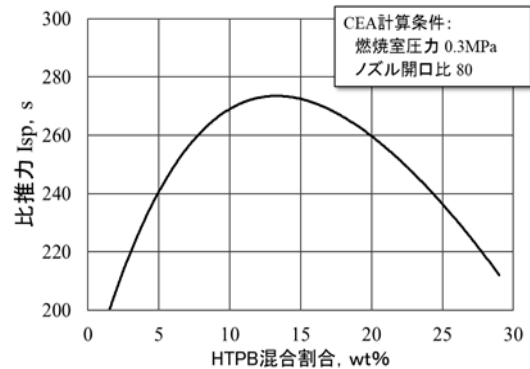


Fig. 1 混合比と比推力の関係

下の Fig.2 は横軸に固体推進薬消費に対するN<sub>2</sub>O供給量の時間当たり質量比をとり、比推力との関係を化学平衡計算によって求めた結果である。計算条件はノズル開口比80、燃焼室圧力0.3MPa(以下、圧力はすべて絶対圧)である。この結果から酸化剤としてN<sub>2</sub>Oをどの程度供給することでどの程度比推力が向上することが分かる。

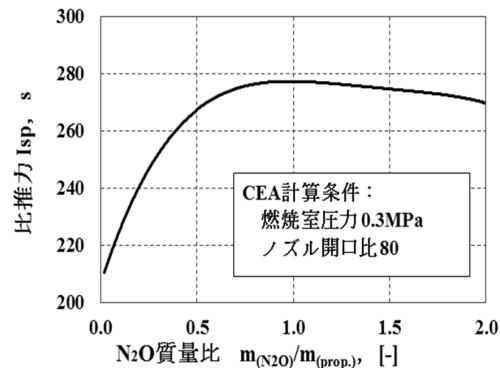


Fig.2 N<sub>2</sub>O供給比と比推力の関係

本実験では非自燃性固体推進薬の燃焼特性を評価するため、Fig.3に示す試作ストランドバーナを使って燃焼速度の測定を行う。ストランドバーナとは小型の燃焼容器で不活性ガス供給量及びバルブ開度の調整により任意の圧力下での燃焼速度を測定するための試験装置である。不活性ガスにはN<sub>2</sub>を用いる。燃焼速度の測定は燃焼の様子を撮影した動画を解析し算出する。

推進機作動実験では、Fig.4に写真で示すような推進機モデルを製作し、燃焼室圧力を0.2MPa、酸化剤供給量をN<sub>2</sub>O質量比0.9~1.5の間で変化させ燃焼試験を行った。試作機試験ではN<sub>2</sub>Oで燃焼制御する作動実証と性能向上に繋がるデータ取得を目的としている。この推進機は燃焼が進行し固体推進薬が減少しても常に燃焼面に対してN<sub>2</sub>Oが供給され、燃焼が維持される形状となっている。

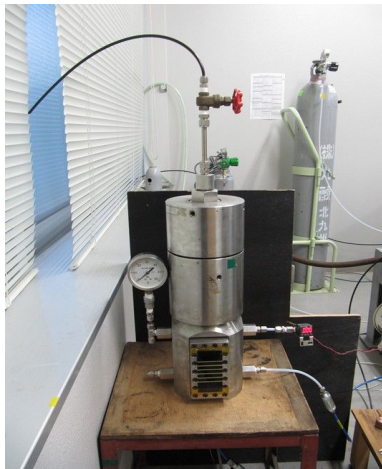


Fig.3 ストランドバーナ

ノズルは開口比1,スロート直径2mmとし,点火には非接触で点火可能な放電を用いた.  $N_2O$  供給量は Fig.1 で比推力最大となる値を目標とし 8.5NL/min に設定した. 実験は 0.01 MPa 以下に減圧された真空チャンバ内で行われ,推力は電子天秤を利用し,ノズル開口比,  $N_2O$  供給量, 固体推進剤形状が性能に与える影響を調べた.



Fig.4 推進機モデル

#### 4. 研究成果

(1) Fig.5 に  $N_2O$  供給量と燃焼速度の関係の結果を示す. 燃焼速度は今回実験したどの燃焼室圧力においても  $N_2O$  供給量には依らず一定であった. この結果から, 圧力毎に燃焼を維持するために最低限必要な  $N_2O$  の量が

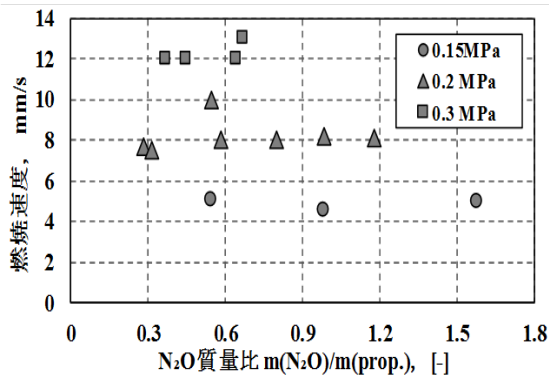


Fig.5  $N_2O$  供給比と燃焼速度の関係

あり, それ以上に供給したとしても燃焼を促進する効果はないと考えられる.

(2) Fig.6 に燃焼室圧力の時間変化を燃焼が開始した時間を  $t=0s$  として示す.  $t=0s$  以前の燃焼室圧力は点火前の  $N_2O$  供給ガスによるものである. 燃焼開始後, 燃焼室圧力は徐々に上昇し,  $t=6\sim 8s$  付近で一定となった.  $t=7.5s$  で  $N_2O$  の供給を停止すると燃焼室圧力は減少し始め,  $t=12s$  で燃焼室圧力は真空チャンバと同程度となり, 燃焼が停止したと判断される. また, 燃焼後に固体推進剤が残っていたことから燃焼の中断が確認できる. 以上のことより,  $N_2O$  で燃焼制御する固体推進機の作動が実証できた. 実験値から算出した比推力  $I_{SP}$  は約 90 s であった.

性能改善を目的として, 流路などの余分な容積を縮小し改良した結果, 燃焼の立ち上がりと停止にかかる時間が短縮され, 比推力  $I_{SP}$  は約 122 s となった. 燃焼の ON/OFF 応答性が向上した理由は, 燃焼室及び  $N_2O$  供給路容積を減少させたことで, 燃焼室圧力の上昇収束時間を短縮でき, さらに  $N_2O$  供給停止後に燃焼室に流入する未反応  $N_2O$  の量が減ったためであり, 比推力が向上した理由は, 推進機の小型化により, 熱損失や燃焼に寄与せず排出される  $N_2O$  の量を低減できたためと考えられる.

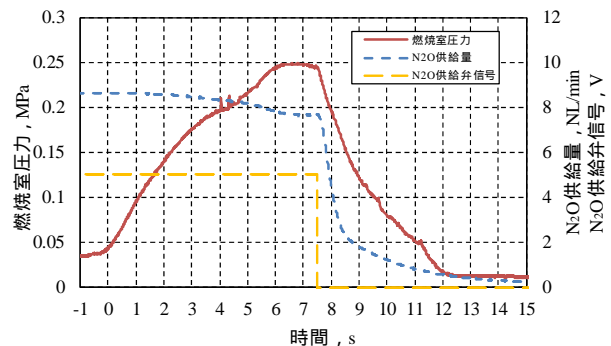


Fig.6 燃焼室圧力と推力の時間変化

(3) 推進機実験では開口比 80 のノズルを用いているので, これと実験結果から得られる推力係数  $C_F$  を算出すると  $C_F=1.0$  となる. 今回の実験で実際に得られた圧力から圧力比は 30 程度であり, その場合の最適な開口比は 5 であり 80 では性能が大幅に低下していたことになる. つまり最適開口比のノズルを用いた場合に計算によって見積もられる理論値を求めると, 推力係数  $C_F$  は 1.4, 比推力  $I_{SP}$  は 220 s となる. 実験で実際に用いたノズルでは, 推力係数  $C_F$  が低いため理論補正した比推力は約 170 s 程度となる. 実験から算出された比推力は約 130 s であり, 実験値は理論値の約 3/4 となる. 補正しても未だ理論値に及ばなかった理由として, 燃焼器への熱損失や燃焼に寄与せず排出される  $N_2O$  の量が未だ大きく, これが性能の低下をもたらしていると考えられる.

(4) 以上まとめとして

- ・ N<sub>2</sub>O で燃焼制御する固体推進機の作動を実証することができた。
- ・ 燃焼速度は酸化剤(N<sub>2</sub>O)供給量の影響は受けず、燃焼室圧力には依存する。
- ・ 改良型では燃焼の ON/OFF 応答性と比推力が向上し、比推力は理論値の約 3/4 まで達成された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 1 件)(国際学会)

Burning characteristics of non-self-combustible solid propellants controlled by N<sub>2</sub>O supply, K. Fukuda, T. Tachibana, 6th Int'l Symposium on Energetic Materials (ISEM), 2017

6. 研究組織

(1)研究代表者

橘 武史 (TACHIBANA, Takeshi)  
九州工業大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：50179719

(2)研究分担者

各務 聡 (KAKAMI, Akira)  
宮崎大学・工学部・准教授  
研究者番号：80415653