

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05883・19K21064

研究課題名(和文) 金属/水を用いたハイブリッドスラスタの燃焼機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of Combustion Mechanisms in Metal/Water Hybrid-Thruster

研究代表者

齋藤 勇士 (Saito, Yuji)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50828788

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)：非粉体である塊状金属と水反応は、無毒で安全かつデブリ回避・軌道投入に必要な高速マヌーバを実現する大推力推進機として注目されている。本研究は、超小型衛星用スラスタの宇宙作動実証を目指し塊状金属/水 燃焼機構の解明を行うことを目標として研究を進めた。塊状金属をロケット燃焼器内部で溶融させ水を共有させる本研究独自の手法を構築し、複数回の燃焼実験を行った。ノズルから溶融したアルミニウムを確認した後、水を供給したが、アルミニウムと水の反応を確認することはできなかった。これはアルミニウムの高い熱伝導率によってアルミニウムを効率的に加熱することができないためである。塊状金属/水反応の難しさが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非粉体である塊状金属と水反応は、無毒で安全かつデブリ回避・軌道投入に必要な高速マヌーバを実現する大推力推進機として注目されている。本研究は、超小型衛星用スラスタの宇宙作動実証を目指し塊状金属/水 燃焼機構の解明を行うことを目標として研究を進めた。塊状金属をロケット燃焼器内部で溶融させ水を共有させる本研究独自の手法を構築し、複数回の燃焼実験を行った。ノズルから溶融したアルミニウムを確認した後、水を供給したが、アルミニウムと水の反応を確認することはできなかった。これはアルミニウムの高い熱伝導率によってアルミニウムを効率的に加熱することができないためである。塊状金属/水反応の難しさが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The combustion of aluminum/water is of relevance to many propulsion and energy conversion applications. The authors propose a concept for realizing aluminum/water hybrid rockets using PMMA (polymethyl methacrylate)/oxygen hybrid rocket combustion for heating. Three experiments were conducted to examine aluminum/water combustion, and the feasibility of heating by PMMA/oxygen combustion. Results show that melting and combustion of rod-aluminum was achieved, however the aluminum/water reaction could not be confirmed before combustion extinction.

研究分野：総合工学

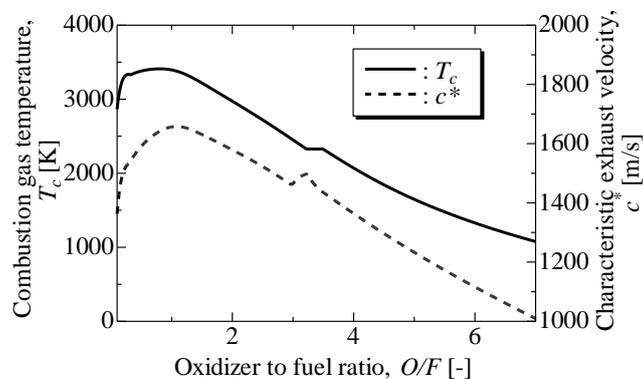
キーワード：超小型衛星 ハイブリッドロケット 金属燃焼

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、超小型衛星 (100 kg 以下の人工衛星) はその高機能化により、途上国や民間企業での利用が急増している。超小型衛星は主に主衛星との相乗りで上げられるために軌道選択の自由が無い場合、高度なミッションには多様な推進能力が求められる。超小型衛星用スラスタとしては、高効率なコールドガスおよびイオンスラスタが主流であるが、低推力である。大推力推進機としては、燃焼を伴う化学推進機が有望視されている。その中で、無毒かつ高圧ガス等の危険を取り除いた安全な推進機として、金属/水ハイブリッドスラスタが注目されている。

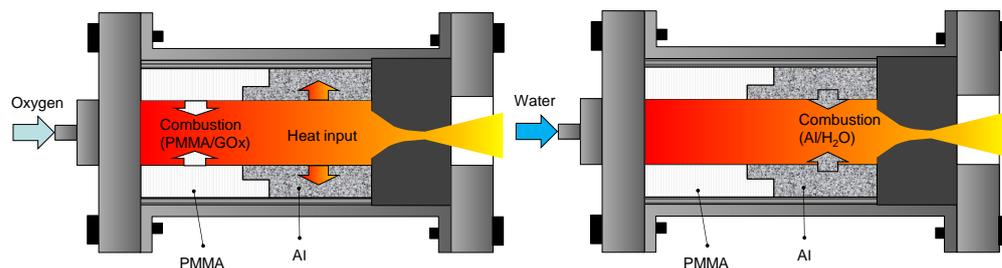
水と反応することのできる物質として、アルミニウムおよびマグネシウムがある。本研究ではマグネシウムと比べて安価なアルミニウムを燃料として選定し、以降の議論ではアルミニウムのみに着目する。第1図は、NASA-CEA によって取得されたアルミニウムと水の各 O/F (酸化剤と燃料の比) での燃焼温度と特性排気速度を示す。一般的なハイブリッドロケット推進剤と同程度の特性排気速度を取得できる。アルミニウムと水の反応を用いたロケット研究は、 μ -nm 級粉体アルミニウムが一般的で、塊状での燃焼実験は存在しない。これは、アルミニウム粉末にすることで、アルミニウム表面に存在する酸化被膜を破裂させることができ、アルミニウムと水の反応を容易にすることができるためである。しかしながら、粉体金属は消防法により危険物に該当する。目開きが $150 \mu\text{m}$ の網ふるいを通すものが 50% を超える場合、アルミニウム粉体は第二類危険物に該当する。また、これらは火薬類取扱法の粉塵爆発の危険性の高い金属粉に該当する。主衛星の相乗りで搭載される超小型衛星にとって、主衛星に影響を与えかねない粉体金属を燃料として使用するの厳しい。また、微小重力下での非粉体金属供給は非常に複雑な機構を要する。そこで、本研究では非粉体である塊状アルミニウムと水の反応機構に着目した。



第1図 アルミニウムと水の燃焼温度と特性排気速度

2. 研究の目的

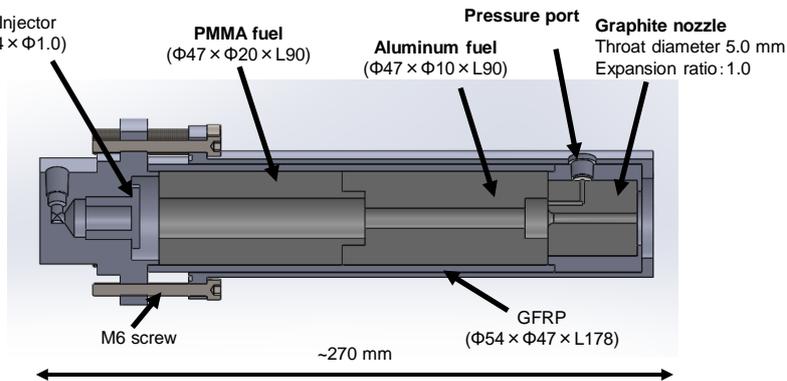
本研究では、塊状アルミニウムの酸化被膜を取り除きアルミニウムと水の反応を実現するために、PMMA (Polymethyl methacrylate)-GOx (Gaseous oxygen) ハイブリッドロケット燃焼を用いたアルミニウム-水ハイブリッドロケットを提案する。第2図に本研究のコンセプトを示す。本研究では、塊状アルミニウムと水の反応を実現することを目的として研究を進めてきた。



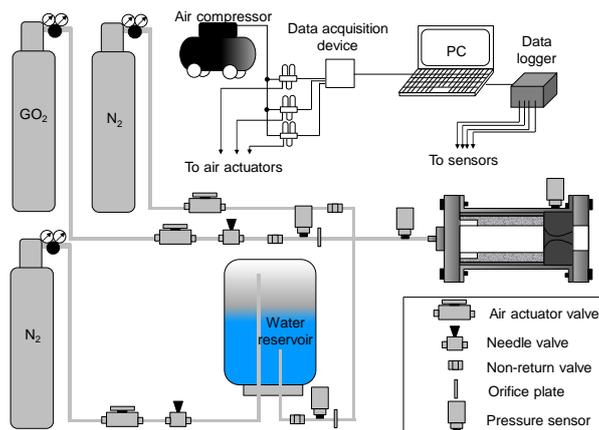
第2図 PMMA-GOx 燃焼を用いたアルミニウム-水ハイブリッドロケットのコンセプト

3. 研究の方法

第3図および第4図に燃焼器および燃焼実験装置の概要を示す。塊状アルミニウムに十分な熱量を供給し酸化被膜を取り除くために、燃焼器前部に PMMA 燃料を、燃焼器後部にアルミニウム燃料を設置した。燃焼前半で PMMA-GOx ハイブリッドロケット燃焼を行い、任意時間後バルブ制御で燃焼器内に水を供給する燃焼実験系を構築し、燃焼実験を進めた。



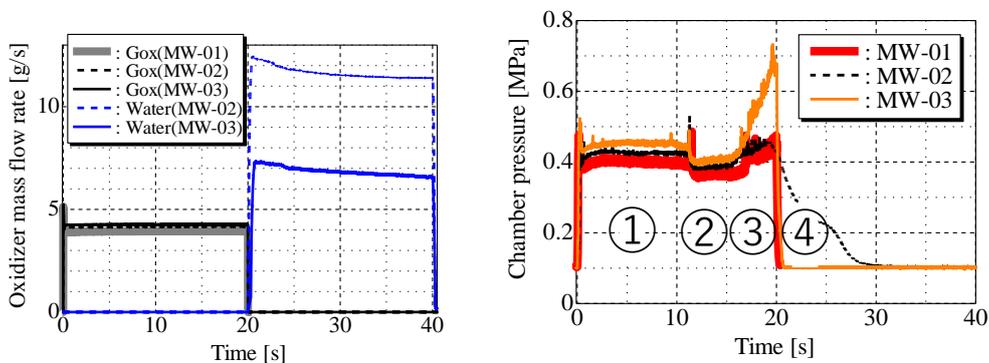
第3図 燃焼器概要



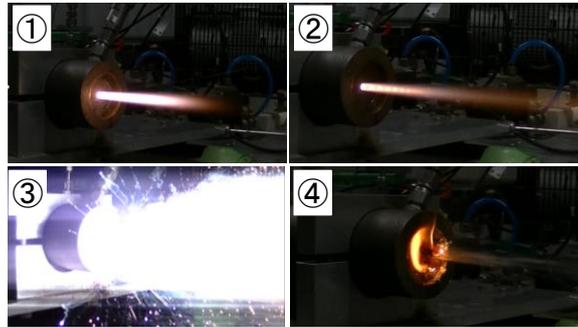
第4図 燃焼実験装置概要

4. 研究成果

第5図に燃焼実験で取得された酸化剤質量流量および燃焼室圧力の各履歴を示す。水供給前の燃焼時間 20 秒以前の燃焼室圧力に着目すると、酸化剤の質量流量の違いによって若干の増減はあるものの似たような燃焼室圧力履歴を取得することができた。しかしながら、MW-03 に着目すると、酸素燃焼後半にかけて燃焼燃焼室圧力履歴が際立って増加している。第6図は、MW-03 の第5右図に該当する時間の燃焼中の様子を示す。燃焼室圧力が急激に増加している③に着目すると、ロケットノズルから白色光を観測した。これは熔融したアルミニウムであると推測され、それがノズルに付着することでノズルスロート面積が減少し燃焼室圧力が急激に増加したと考えられる。これは、燃焼終了時のノズルにアルミニウムが付着している結果からも上記の仮説が支持される。



第5図 燃焼実験結果 左：酸化剤質量流量履歴，右：燃焼室圧力履歴



第6図 MW-03 の燃焼中の様子

第5図および第6図の④では、熔融したアルミニウムに水を供給したときの燃焼室圧力履歴およびその様子を示す。燃焼室圧力は急激に減少し、ノズルから水が噴射され消炎していることが分かる。水供給を行わなかった燃焼実験とアルミニウムの燃料消費量、燃焼室圧力履歴および燃焼中の様子を比較して、アルミニウムと水の持続的な反応が起きたとは判断できない。

アルミニウムはプラスチック燃料と比較して高い熱伝導を有する。そのため、PMMA-GOx 燃焼による熱は、高い熱伝導によってアルミニウム全体を加熱してしまったと考えられる。比較的低い熱伝導を有するプラスチックのように燃料表面で気化させるために、熱伝導を遅らせるような燃料の工夫が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Saito Yuji, Kimino Masaya, Tsuji Ayumu, Okutani Yushi, Soeda Kentaro, Nagata Harunori	4. 巻 35
2. 論文標題 High Pressure Fuel Regression Characteristics of Axial-Injection End-Burning Hybrid Rockets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 328-341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37135	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 齋藤 勇士	4. 巻 68
2. 論文標題 ラボスケール端面燃焼式ハイブリッドロケットの点火装置の模索	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 31-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14822/kjsass.68.2_31	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 秋山茉莉子, 齋藤勇士, 西井啓太, 小泉宏之, 小紫公也
2. 発表標題 CubeSat用ハイブリッドロケットのためのテルミット反応を用いた点火手法の提案
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 齋藤勇士, 秋山茉莉子, 西井啓太, 小泉宏之
2. 発表標題 真空下テルミット反応を用いたハイブリッドロケットの点火手法の提案
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2019年講演会ならびに第20回再使用型宇宙推進系シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mariko Akiyama, Yuji Saito, Keita Nishii, Hiroyuki Koizumi, Kiyomiya Komurasaki
2. 発表標題 Application of an Al/Fe ₂ O ₃ Thermite Reaction to an Igniter of a Hybrid Rocket
3. 学会等名 32nd ISTS(International Symposium on Space Technology and Science) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Saito, Landon Kamps, Ayumu Tsuji, Masashi Wakita, Koizumi Hiroyuki, Keisuke Asai, Harunori Nagata
2. 発表標題 Initial Firing Tests of Aluminum Rod/Water Hybrid Rockets
3. 学会等名 2020 AIAA Propulsion & Energy Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Saito, Landon Kamps, Ayumu Tsuji, Masashi Wakita, Hiroyuki Koizumi, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Harunori Nagata
2. 発表標題 Initial Firing Tests of Aluminum-Water Hybrid Rockets using PMMA-Oxygen Hybrid Rocket Combustion
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤勇士, Landon Kamps, 津地歩, 脇田督司, 小泉宏之, 野々村拓, 浅井圭介, 永田晴紀
2. 発表標題 PMMA/O ₂ ハイブリッドロケット燃焼を用いたAl/H ₂ Oハイブリッドロケットの検討実験
3. 学会等名 第2回ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤勇士
2. 発表標題 端面燃焼式ハイブリッドロケットの推力制御特性に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第50期 年会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019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