

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01537

研究課題名（和文）高加熱燃焼場のガス計測と反応解析に基づくハイブリッドロケット燃料の高性能化

研究課題名（英文）Research on the high performance hybrid rocket fuel based on the gaseous species concentration measurement and the reaction mechanism analysis at high heating rate

研究代表者

堀 恵一（HORI, Keiichi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・専任教授

研究者番号：40202303

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：ハイブリッドロケット燃料の表面後退速度（燃焼速度）向上を目的とし、実際のロケット燃焼場を模擬する熱分解・質量分析器システムを構築した。燃焼速度の高い熱可塑性樹脂を1MPa、高加熱速度下で熱分解し、生成物濃度を精確に同定した。結果、分解で生成するエチレンが芳香族化し、煤が生成するパスが存在することが判り、高燃焼速度化を阻害する一因となっていることを明らかにした。五酸化バナジウムの添加が有効であることが実験的に明らかになった。実際にハイブリッドロケットを用いて燃焼実験を実施したところ、燃焼速度は従来と比較して50%以上向上し、観測ロケット用であれば実用化が可能な領域まで高まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低コスト、低環境負荷、高性能とハイブリッドロケットシステムは高度にバランスのとれた宇宙輸送システムである。しかし固体燃料となる高分子材が燃焼性が低く大推力の発生が難しく大型ロケットへの適用が難しい。本研究では、実際のロケット燃焼場での高分子燃料の熱分解を精確に計測できる装置系を開発し、燃焼反応の詳細を調べた。その結果五酸化バナジウムの添加が有効で、燃焼速度をこれまでの50%以上向上することができた。これにより、小型観測ロケットクラスであればハイブリッドロケットで置き換えることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：Advanced pyrolysis-mass spectrometer system has been developed in order to realize high surface regression rate hybrid fuel. Thermoplastic fuel pyrolysis at high heating rate and 1MPa was conducted and the product concentration was measured precisely. Ethylene gas is generated at the pyrolysis and causes aromatic compounds and finally soot formation, which is considered one of the reasons of low regression rate of hybrid fuel. V205 was found experimentally effective to suppress the ethylene pass, which was made sure at the hybrid rocket testing. The regression rate was enhanced more than 50% than the same fuel without V205, which enables the hybrid sounding rocket.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：ハイブリッドロケット 熱分解 高分子燃料 燃焼 反応動力学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

低コスト、低環境負荷、高性能とハイブリッドロケットシステムは高度にバランスのとれた宇宙輸送システムである。しかし固体燃料となる高分子材の燃焼性が低いために大推力の発生が難しく、大型ロケットへの適用が難しい。この難点を解決するためには、高分子材料の実際のロケット燃焼場での熱分解・燃焼現象が正しく理解できていなければならない。実際の燃焼場は、固体燃料固相中の加熱速度が 10,000K/s、圧力場が MPa のオーダーに達する非常に特殊な場となっており、その場を模擬した上で気相分解生成物の詳細観測を可能とする装置は存在しなかった。

研究者グループの本研究以前の活動から、高分子材の急速加熱場での熱分解の観察を可能とする質量分析装置が開発できていたが、圧力は大気圧に限られており実際のロケット燃焼場の現象を正しく理解できていなかった。そのため、ハイブリッドロケット用固体燃料の燃焼速度向上に関しての正しい方法論を持っていない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、実際のロケット燃焼場での高分子燃料の熱分解を正確に計測できる装置系を開発し、燃焼反応の詳細を調べることであった。さらには、その知見を活かし、燃焼速度向上に有効な手段を開発し、観測ロケット (JAXA S-520 ロケットクラス) 打ち上げに必要な推進性能を獲得することを最終的な目的とした。尚、燃焼速度に関する具体的な数値目標は、研究開始段階で達成されていた固体燃料表面後退速度 (燃焼速度) 1mm/s を 50% 向上させて 1.5mm/s まで高速化することであった。

### 3. 研究の方法

質量分析装置・実験条件の高圧化から着手した。燃焼室構造を気密化し、1MPa を目標に高分子燃料試料片を燃焼させるべく装置改良が進められた。既に 1mm/s の燃焼速度を達成していた熱可塑性樹脂を試料として、当装置で熱分析の実験が進められ、高加熱速度、高圧下での熱分解生成物濃度の計測が行われた (担当: 産総研、神戸工業試験所、千葉工大)。

反応解析ソフト ANSYS 2023R1 CHEMKIN-PRO を用い、燃焼化学解析を実施した。使用した化学動力学スキームは、上記熱分解実験で得られた生成物化学種、濃度を基に、CRECK Modeling Group のケロシンサロゲート燃料用燃焼機構簡略化モデル version1410(3)\_121 化学種、2613 素反応版を用いた (担当: 東大)。

燃焼解析で得られた知見を基に、燃焼速度向上に資すると考えたいくつかの添加材候補を熱可塑性樹脂に添加し、実際にハイブリッドロケットシステム (図 1: 推力 500N 級) を用いて燃焼実験を実施、燃焼速度を計測・確認した (担当: 千葉工大、JAXA)。

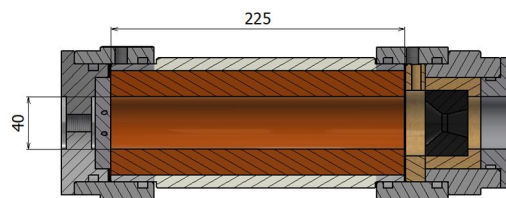


図 1 ハイブリッドロケットモータ概要図

### 4. 研究成果

実際のロケット燃焼場での高分子燃料熱分解を正確に計測できる装置の開発に世界で初めて成功した (図 2 装置全体写真)。燃焼反応の詳細を観察した結果、分解で生成するエチレンが芳香族化し、煤が生成するパスが存在することが判り、高燃焼速度化を阻害する一因となっていることを明らかにした。

CHEMKIN-PRO による数値シミュレーションを成功裏に実施した (図 3 に樹脂主要成分 C16H34 熱分解の代表的生成物の経時変化を示す)。五酸化バナジウムの添加が有効であることを数値計算から明らかにした。図 4 に示すように五酸化バナジウムの添加により煤生成の中間体であるナフタレン濃度が大幅に低下することが確認できる。

実際に推力 500N 級ハイブリッドロケットを用いて燃焼実験を実施した (図 5 燃焼実験風景)。燃焼速度は、五酸化バナジウムの添加により従来と比較して 50% 以上向上し、観測ロケットでハイブリッドロケットの実用化が可能な領域まで高ねることに成功した。

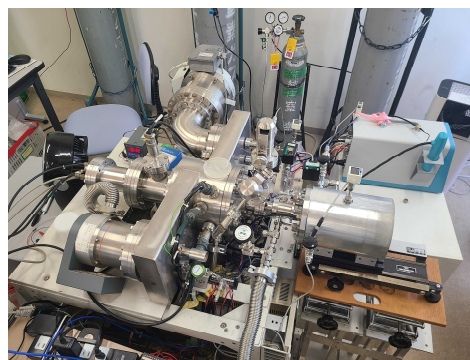


図 2 高加熱速度高圧質量分析装置概要写真

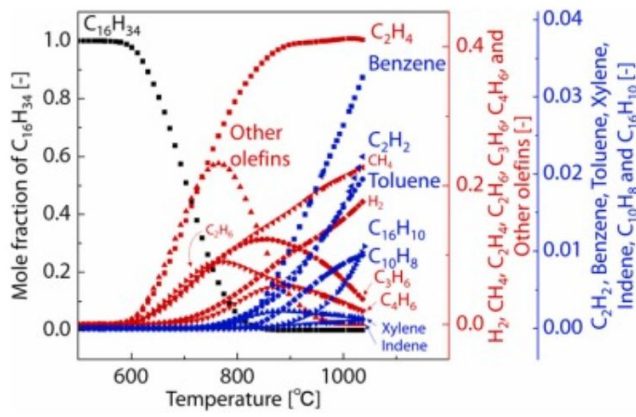


図3 代表的生成物濃度変化 (数値計算結果)

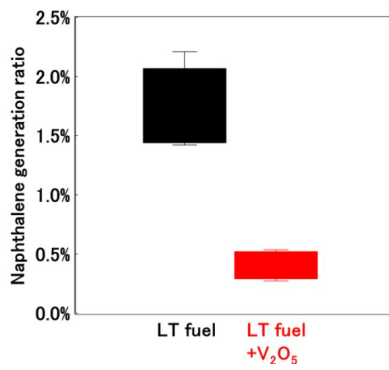


図4 ナフタレン生成に関する V2O5 添加の効果

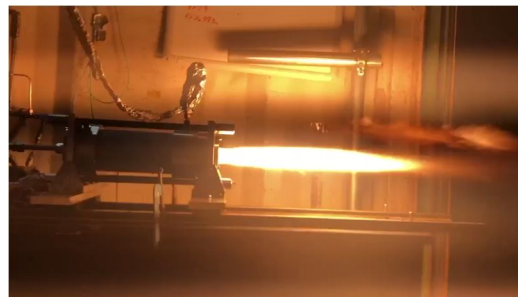


図5 500N 級ハイブリッドロケット燃焼

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ayana Banno, Yutaka Wada, Yuji Mishima, Takahisa Tsugoshi, Nobuji Kato, Keiichi Hori, Ryo Nagase
2. 発表標題 Flash pyrolysis behaviour for rocket fuels by Py-IA/MS with a skimmer interface
3. 学会等名 23rd edition of the International Conference on Analytical and Applied Pyrolysis (PYR02022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田道也, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野倉賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料用低融点熱可塑性樹脂材料の熱分解生成ガス分析
3. 学会等名 火薬学会2022年度春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野文菜, 藤原克昭, 和田豊, 三島有二, 津越敬寿, 堀恵一
2. 発表標題 末端水酸基ポリブタジエンの熱分解挙動
3. 学会等名 火薬学会2022年度春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 津越敬寿, 加藤信治, 堀恵一, 長瀬亮
2. 発表標題 ハイブリッドロケットに用いる低融点熱可塑性樹脂燃料の燃焼機構に関する研究
3. 学会等名 2022年度火薬学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 津越敬寿, 加藤信治, 堀恵一
2. 発表標題 試料観察TGとEGA-IA/MSによるロケット燃料用多成分系熱可塑性樹脂の相変化反応の解析
3. 学会等名 第27回高分子分析討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野文菜, 小松健, 和田豊, 三島有二, 津越敬寿, 加藤信治, 堀恵一
2. 発表標題 ロケット燃料の燃焼反応プロセス解明に向けた瞬間熱分解生成物の計測手法の研究
3. 学会等名 2022年度火薬学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田道也, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野倉賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料用低融点熱可塑性樹脂/含酸素添加剤の熱分解生成ガス分析
3. 学会等名 2022年度火薬学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田道也, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野倉賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料用低融点熱可塑性樹脂材料/アルコール混合系の熱分解反応機構解析
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田道也, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野倉賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料用低融点熱可塑性樹脂材料の熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田道也, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野倉賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料用低融点熱可塑性樹脂材料の熱分解生成ガス分析
3. 学会等名 2022年度火薬学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野 文菜, 和田 豊, 三島 有二, 津越 敬寿, 加藤 信治, 堀 恵一, 長瀬 亮
2. 発表標題 ハイブリッドロケットに用いる低融点熱可塑性樹脂燃料の燃焼機構に関する研究
3. 学会等名 2022年度火薬学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayana Banno, Yutaka Wada, Yuji Mishima, Takahisa Tsugoshi, Nobuji Kato, Keiichi Hori, Ryo Nagase.
2. 発表標題 Flash pyrolysis behaviour for rocket fuels by Py-IA/MS with a skimmer interface
3. 学会等名 Pyro 20222
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野文菜, 藤原克昭, 和田豊, 三島有二, 津越敬寿, 堀恵一
2. 発表標題 末端水酸基ポリブタジエンの熱分解挙動
3. 学会等名 2022年度火薬学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田道也, 小野悠貴, 坂野文菜, 和田豊, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 戸野賢一
2. 発表標題 ハイブリッドロケット推進剤用低融点熱可塑性樹脂/含酸素化合物混合系の熱分解機構解析
3. 学会等名 第61回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2023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	戸野倉 賢一 (TONOKURA Kennichi)  (00260034)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授  (12601)	
研究分担者	津越 敬寿 (TSUGOSHI Keijyu)  (20277271)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員  (82626)	
研究分担者	和田 豊 (WADA Yutaka)  (20553374)	千葉工業大学・工学部・教授  (32503)	

6. 研究組織（つづき）

	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	三島 有二  (MISHIMA Yuji)  (30501689)	株式会社神戸工業試験場（生産本部技術開発部）・技術企画室・研究員    (94507)	
研究分担者	坂野 文菜  (BANNO Ayana)  (40961735)	山口大学・大学院創成科学研究科・講師    (15501)	

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