

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00805

研究課題名（和文）革新技術による固体ロケットの高機能化と低コスト化に関する実証的研究

研究課題名（英文）Demonstrative research on highly functional and cost reduced solid rocket by applying innovative technologies.

研究代表者

森田 泰弘（Morita, Yasuhiro）

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：80230134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は段階的に確実に進め、計画全体として十分な成果を得た。大きな成果として、2021年度にモータ大型化設計確定、2022年度に実証ロケット用地燃モータを試作、地上燃焼試験により革新固体ロケット燃料（LTP）の有効性を実証した。最重要検証項目（製造期間の短縮と機械特性、燃焼特性）は、大型モータの特性として十分なものであり、この結果、2023年度にてフライト試験を実施、高加速度環境での燃焼特性の取得などLTPの実用化に向けて十分な成果を得た。本研究の事後評価として、5年計画の研究を計画どおりに完了してLTPの技術成熟度を高めることができ、当初の想定どおりの成果を得たと評価することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、学術ニーズを満たす（低コストで高頻度に打ち上げ可能な）次世代固体ロケットの開発を問いに据え、その答えとしてコア技術（固体ロケット燃料）の現状の課題（製造に長期間を要し高コストな上に量産できない）の解決に取り組んでいる。研究は多岐に渡るが、その中から実現可能性が高く、かつ費用対効果の高いチャレンジとして生み出されたのが、固体ロケットの常識を覆す「低融点熱可塑性推進薬（LTP: Low melting temperature Thermo-elastic Propellant）」である。LTPはこれまでの燃料と真逆の特性を持ち、製造期間を大幅に短縮することで低コストかつ量産が可能となる。

研究成果の概要（英文）：This research project was carried out step by step and with sufficient results achieved as a whole. Major achievements included finalizing the large motor design in FY2021, prototyping a natural fuel motor for a demonstration rocket in FY2022, and demonstrating the effectiveness of the innovative solid rocket fuel (LTP) through ground combustion tests. The most important verification items (reducing manufacturing time and mechanical characteristics, combustion characteristics) were sufficient for the characteristics of a large motor, and as a result, flight tests were conducted in FY2023, and sufficient results were achieved toward the practical application of LTP, such as obtaining combustion characteristics in a high acceleration environment. As a post-hoc evaluation of this research, it can be said that the five-year research plan was completed as planned, increasing the technological maturity of LTP, and achieving the results originally expected.

研究分野：宇宙システム工学、制御工学

キーワード：固体燃料ロケット 宇宙輸送

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙科学や技術の進歩と宇宙開発利用の発展のためには、低コストで高頻度な宇宙へのアクセスが喫緊の課題であるが、国や大手の宇宙メーカが背負えるリスクには限界がある。一方、新規参入のベンチャー企業は、蓄積された技術が不十分なために、推進系などコア部分については既存技術の継続利用の他に余地がない。ロケットの低コスト化開発には、革新的研究による質的な飛躍が強く求められている。本提案はこの部分に着目したものである。

固体ロケット燃料の低コスト化研究は国内外でも散見されるが、それらは現行の燃料の改良レベルにとどまっており、効果はせいぜい1割減である。一方、本研究は、過去40年間手つかずであった固体ロケット燃料の組成自体を根本から変え、製造プロセスを劇的にシンプル化する。コストの桁を変え、ロケット開発の質を変える画期的な取り組みである。

### 2. 研究の目的

本研究提案の目的は、実用規模のロケットに実装できるレベルにまでLTP技術の成熟度を高めることである。具体的には、まずLTPの特性改善を図り、溶解性(ロケットへの充填のしやすさ)と機械特性(ロケットの打ち上げに耐える強度)のバランスを最適化し、実用ロケットへの実装性を最大化する。次にLTPの充填システムを新規開発し、現有する小型のミキサーをもってして大型ロケットの製造を可能とする。最後に大型ロケットモーター(エンジン)の地上燃焼試験により技術の有効性を実証する。これらによって実用ロケットの大幅な低コスト化が可能となり、研究の意義価値が最大化できる。

### 3. 研究の方法

(1) モーターの大型化を通して実用ロケットへの応用研究を完結するために、LTPを用いた観測ロケット(LTP-135s)を打ち上げ、製造性や燃焼特性などの観点でLTPの有効性をシステムレベルで実証する。特に、新規に導入した自転公転式攪拌混和装置を最大限に有効活用するブロックボンディング方式による製造方法を採用して効率的に開発を進めるとともにLTP及びモーター設計の技術成熟度を高める。

(2) ミキシング(酸化剤、アルミ粉末と樹脂の混和)およびキャスティング(モーターケースへの充填)からなるLTP製造工程の健全性および時間軸における工程短縮効果を実証する。健全性については、X線検査によりボイド(空隙等)のないことを確認した上で燃焼試験及びフライト試験を実施し、燃焼室内圧データ等から妥当性検証する。

### 4. 研究成果

MT-135級LTP小型観測ロケットモーター(仮称LTP-135)開発に先立ち、1/2スケールのLTPロケットモーターを開発、これに資するデータを取得するため、2019年度に北海道赤平市植松電機にて燃焼試験、2020年度には、LTP-135SubFMモーターの試作・製作、要素試験を実施し、組立、気密試験等から着火性、燃焼データ、モーター耐圧、セグメントモーター運用の妥当性について評価、また圧力(点火器、主燃焼室) 推力、モーター表面温度の計測、これにノズルスロート温度も加えて、EM1-1, EM1-2, EM1-3, の計3回燃焼試験を行い、構造上の問題のないことを確認できた。

上記から最終目標であるLTP-135S打ち上げ試験に向け、2023年度前期にLTP(低融点熱可塑性コンポジット推進薬)ロケットモーターの気密試験、耐圧試験及びアッセンブリ実証を行い、薬量2.5 [kg]×3セグメントのLTPロケットモーターの気密・耐圧実験を行った。安全率を1.3とし、最大燃焼室圧力6.5 [MPa]に対して目標8.45 [MPa]で問題ないことを確認した。同時にアッセンブリ実証を行い、メインケース構造及びノズル構造を問題無く組み立てられることを確認した。

ロケットモーター仕様：

1. 薬量 2.5 kg×3 セグメントモーター:2 式

LTPが充填されたグレンケースをCFRPまたは金属チューブとSUS鋼でキャップする。

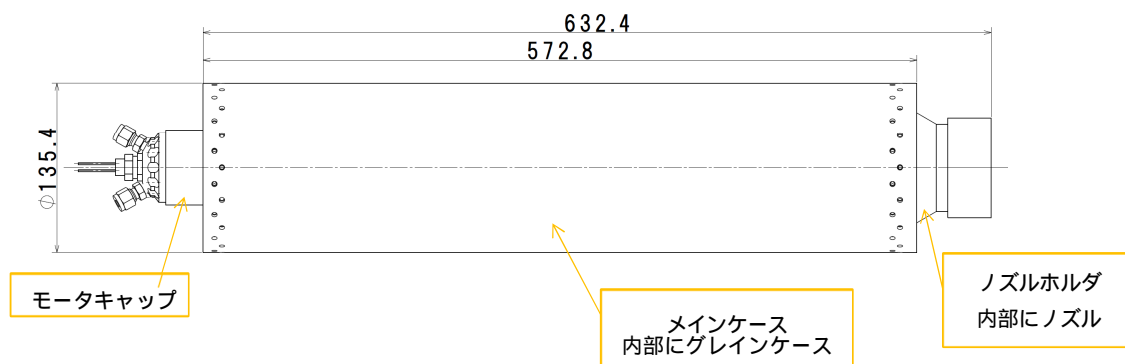
薬剤組成：

薬剤	割合
#621 バインダー	16%
粗粒・細粒過塩素酸アンモニウム(AP)	69%
アルミニウム粉末	15%

・試験に供されたロケットモータの側面図を示す。CFRP 製モータケースの両端開口部 SUS304 製モータキャップ及びノズルホルダでキャップする構造である。

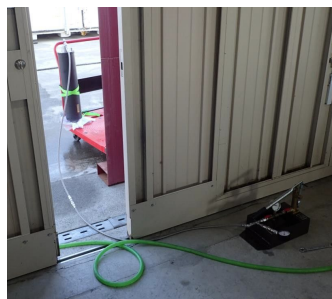
・想定される最大燃焼室圧力は 6.5 [MPa] である。

(なお、本図には点火器やスカートホルダなど本試験に不要な部品も描かれている。)



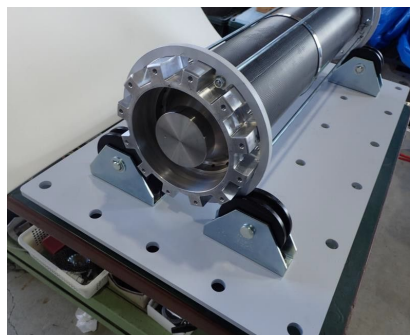
気密・耐圧試験においては、手動水ポンプを用いて耐圧実験を行った。

ロケットモータの安全率を 1.3 とし、最大燃焼室圧力 6.5 [MPa] に対して目標 8.45 [MPa] の内圧負荷をかけ、結果として 8.5 [MPa] に一定時間耐え、また水の漏洩も無く問題ないことを確認した。

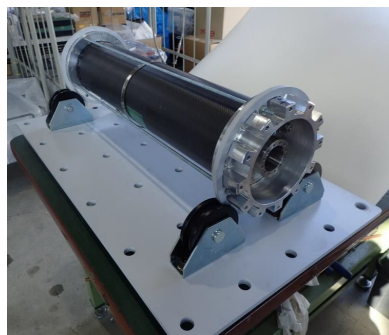


併せて、組立治具を用いてアッセンブリ実証を行い、メインケース構造及びノズル構造を問題無く組み立てられることを確認している。

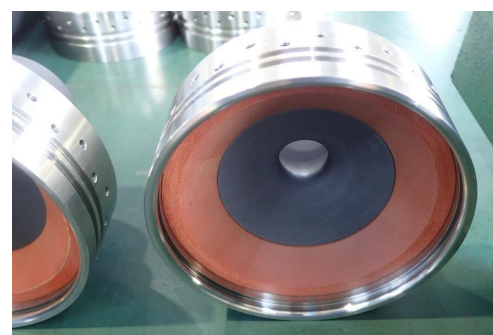
組立前：



ノズルホルダ



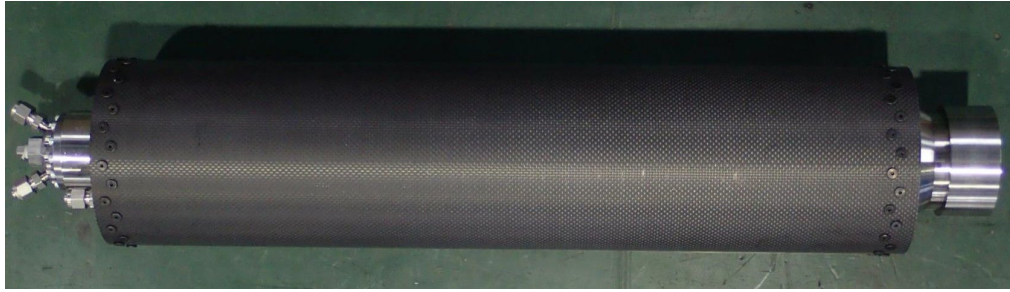
モータキャップ



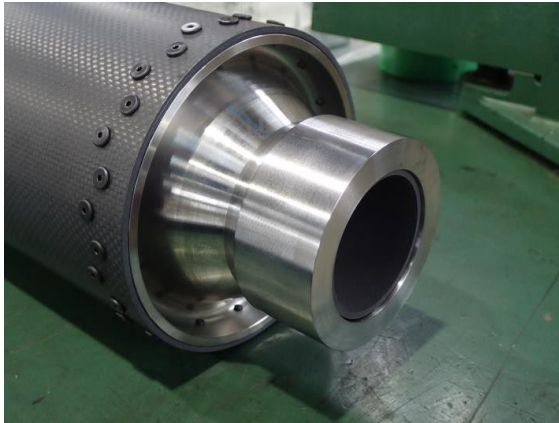
ノズル構造



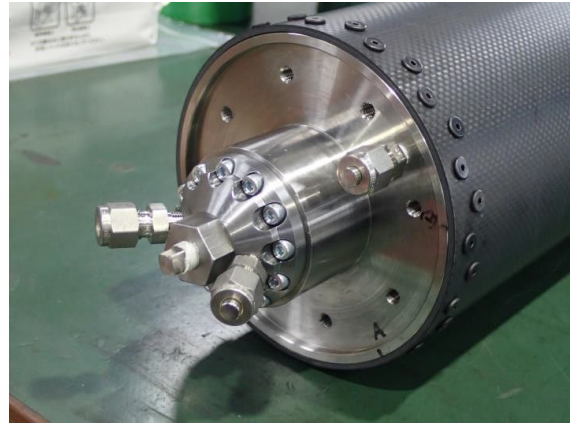
組立後：



全体



ノズル側



モータキャップ側

上記結果を受け、最終目標である LTP-135S ロケット打ち上げ試験を 2024 年 3 月大樹町北海道スペースポートに行い、当初の計画通りの実証を得ることができている。以下に打ち上げ試験結果を記し、報告とする。

#### 打上げ試験結果

- ・ 打上げ日時：2024 年 3 月 19 日 10 時 50 分
- ・ 実施場所：北海道大樹町 多目的航空公園滑走路

上記のように LTP-135S ロケット打ち上げ実験を実施した。

ロケットは計画通り最大約 14G の高加速度環境下で飛行し、大樹町沖合に設定された海上警戒区域内に着水した。

次にテレメトリによる打上げ試験の計測データ及び画像を示す。

表 1 打上げ試験結果

項目	結果	備考
到達高度 [m]	4741.6	気圧高度計による
最大上昇速度 [m/s]	480.1	GNSS による
最大加速度 [G]	13.91	加速度計による
燃焼時間 [s]	約 5.5	GNSS による
機体着水点位置情報	北緯 42.50029 東経 143.4943	



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 Hikaru ISOCHI, Naoto ADACHI, Tsutomu UEMATSU, Nobuji KATO, Keiichi HORI, Yasuhiro MORITA and Ryojiro AKIBA
2. 発表標題 "Study on Low Melting Temperature Thermoplastic Propellant and Its Demonstration Flight Test"
3. 学会等名 the 32nd International Symposium on Space Technology and Science, 2019-a-39, June 2019, Fukui, Japan. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十地 輝、安達 直人、植松 努、加藤 信治、堀 恵一、森田 泰弘、秋葉 隼二郎
2. 発表標題 低融点熱可塑性推進薬の研究と飛行実証
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
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
研究分担者	佐伯 孝尚  (Saiki Takanao)  (10415903)	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・教授   (82645)	
研究分担者	堀 恵一  (Hori Keiichi)  (40202303)	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   (82645)	

## 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	三浦 政司  (Miura Masashi)  (80623537)	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・准教授    (82645)	

	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
研究協力者	植松 努  (Uematsu Tsutomu)	株式会社植松電機	
研究協力者	真野 毅  (Mano Takeshi)	I H I エアロスペース	
研究協力者	五十地 輝  (Isochi Hikaru)	株式会社植松電機	
研究協力者	名出 智彦  (Naide Tomohiko)	I H I エアロスペースエンジニアリング	
研究協力者	安達 直人  (Adachi Naoto)	株式会社植松電機	
研究協力者	佐藤 豊  (Sato Yutaka)	I H I エアロスペースエンジニアリング	

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
研究協力者	和田 豊  (Wada Yutaka)	千葉工業大学・工学部・教授	
研究協力者	加藤 信治  (Kato Nobuji)	株式会社型善	

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