

令和元年6月14日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04596

研究課題名(和文)革新技術による低コスト固体ロケットの研究

研究課題名(英文)Research on low-costed solid rocket by applying highly innovated 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・教授

研究者番号：80230134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：新開発の固体燃料を搭載したロケットモータの設計をセグメント化して大型化を図り、高度1km級小型ロケットの打ち上げ実験により、低融点熱可塑性推進薬の製造性と燃焼特性の実用可能性を示した。実証した製造性レベルは固体燃料ロケットの製造プロセスを根本から変える画期的なものであり、燃料混和開始から打上げまでの日数を従来に比べ桁違いに短縮した(これまでの数か月を1日にスリム化)。ワイヤレス点火器についても予備飛行試験により実証を行い、試作モデルをベースにチップ化仕様を確定した。これらにより、革新技術の基礎研究を完了、固体燃料ロケットの低コスト化に道を拓き、次のステップの効用研究のための基礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙開発利用を本格的に活性化し、ユーザに対して宇宙利用のチャンスを拡大するためには、宇宙ロケットの低コストで高頻度な打ち上げが絶対不可欠である。我が国の固体ロケットは世界最高峰の技術(推進効率や誘導制御技術)と機動性を有し、イプシロンなどで打ち上げシステムの革新を目指しているが、国が事業として行う技術開発には限界があり、抜本的なコスト改革は実現しにくい。本研究は、自由な発想で推進系やアピオニクスの設計そのものを変えるような抜本的規模の技術革新を図り、国の事業では決してできない大きなブレークスルーを図ろうとするものである。

研究成果の概要(英文)：By increasing the size of the rocket motors loaded with the newly developed solid rocket fuel, the Low melting temperature Thermo-plastic Propellant (LTP), a 1 km-class rocket was successfully launched to establish the manufacturing process and the burning characteristics of the novel propellant. The efficiency of the entire process has been improved epoch-making. The time required from fuel mixing to launching was reduced from the several months to a single day. The effectiveness of the wireless ignition system was verified by the preliminary flight test and the flight model specifications has been determined. Beyond the scope of the research, the segmental design to upscale the motor size was added. From those results, the fundamental research has been completed on the innovative technology for cost reduction of solid fuel rockets and paved the way to the next step applied research.

研究分野：航空宇宙

キーワード：ロケット 航空宇宙システム

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発利用を本格的に活性化し、小型衛星コミュニティを含めた新規のユーザに対して宇宙利用のチャンスを拡大するためには、宇宙ロケットの低コストで高頻度な打ち上げが絶対不可欠である。M-V ロケットの完成により、全段固体ではやぶさのような惑星探査機を打ち上げるなど、我が国の固体ロケットは世界最高峰の技術レベル（推進系や誘導制御系の技術）に達した。引き続きイプシロンでは打ち上げシステム全体の革新を目指しているが、国が事業として行う技術開発には限界があり、抜本的なコスト改革は実現しにくい。超小型ロケットについては、いわゆるニュースペースと呼ばれる新規参入の民間企業による活動が活発であるが、推進系などコア部分については既存技術の延長にとどまっているのが現状である。このような現状では、ロケットのコストの桁を変えるような大転換は難しい。

一方、ロケットの開発の黎明期から今日に至るまで、誘導制御の理論や燃焼の科学などの観点で学术界からの貢献なしにロケット技術の発展はあり得なかった。世界初の小惑星探査機はやぶさを打上げた M-V ロケットの開発は、世界最高レベルの性能を追求したものであったが、それは学術研究と技術開発の融合そのものであった。ロケット技術が性能という指標ではある程度の成熟の域に達し、低コスト化が次なる目標に転換された現在、ロケット技術の革新に対する学術としての貢献が改めて求められている。本研究は、自由な発想で設計そのものを変えるような抜本的規模の技術革新を図り、国の事業ではできない大きなブレークスルーを図ろうとするものである。応募者グループは 2006 年から産学官ボランティアによる「次世代固体ロケット研究会」を主宰し、固体ロケットの低コスト化について研究を進めてきた。研究内容は多岐にわたるが、その中から実現可能性が高く、かつ費用対効果の高い技術としてスピナウトしてきたのが、上記の「熱可塑性固体推進薬」と「無線点火システム」である。この 2 つを組み合わせることにより、点火から燃焼に至るまで、固体ロケットの推進系全体の世界最高レベルの革新を図ることができる。

固体推進薬は、バインダと呼ばれる燃料樹脂（ゴム）の中に、合計 80% 以上の重量を占める酸化剤・金属燃料両粒子を充填し、化学反応により硬化させて生成する。既存の推進薬はバインダに熱硬化性樹脂を採用しているため、製造は非可逆過程となり大型設備を打上げスケジュールに沿った「パルス型（バッチ方式）」で使用する必要がある。JAXA の大型モータの場合、打上げ回数は年に数回という低頻度で、大型製造設備が年間を通じほとんど使用されないという高価格体質が存在する。また、いったんモータケースに推進薬を充填すると、その品質が十分でないという理由で燃料をかき出して再充填することが困難なため、製造プロセスは非常に厳しい管理下で行われる（失敗を絶対に許さない）という現状が、高価格体質に拍車をかけている。一方、逆転の発想でバインダを熱可塑性樹脂に置き換えることができれば、製造は可逆過程となり、少量連続自動製造・保管が可能となる。ロケットの打上げ直前にモータケースに必要な量の推進薬を、倉庫から運搬・充填できるという利点（製造のスリム化）も発現する。すなわち、長年不可侵で行われてきた固体ロケット燃料の製造プロセスが改革され、重厚長大で低頻度のプロセスが小型高頻度の連続プロセスに転換できる。これにより、脆弱なロケット打上げスケジュールに振り回されることのない柔軟な製造スケジュールを組むことが可能となる。また、維持管理に高額な費用を必要とする大規模製造設備を不要とでき、ロケット燃料製造業への新たな企業の参入を容易とし、競争市場の確立による低コスト化を誘起することができる。

本研究グループは 2008 年より（株）型善と共同研究を進め、2013 年に既存の熱可塑性樹脂と比較してはるかに機械的物性を向上させた樹脂（主剤：スチレン系エラストマー、パラフィンオイル）を確立し、酸化剤・金属燃料との Compatibility、機械的物性、燃焼速度特性ともに優れた特性を発揮する新型熱可塑性推進薬の開発に成功した。

2. 研究の目的

宇宙開発利用を本格的に活性化するためには、低コストで高頻度な打ち上げが緊急の課題である。我が国の固体ロケットは世界最高峰の技術レベルにあるが、価格水準が高く国際競争力は低い。大型固体ロケットの場合、推進薬（燃料）コストが全体コストの大半を占めるため、推進薬の低価格化が肝要である。本研究では新規開発された熱可塑性樹脂を推進薬の燃料兼結合剤（バインダ）に使用することで製造プロセスを改革し、大規模バッチ方式を小規模連続生産に変換することにより、燃料製造コストの大幅な低減を目指す。一方、固体燃料、液体燃料を問わず、ロケットの低コスト化のためにはアビオニクス改革も必須である。このため機内通信をワイヤレス化して機内配線をコンパクトにする目的で無線点火システムの開発も平行して進め、組み立て・整備・運用コストの低減を狙う。

本研究は、固体ロケットの低コスト化のための革新技術（低融点熱可塑性推進薬とワイヤレス点火器）を確立し、試作モデルの飛行実験により基礎研究を完了し、次のステップの研究（31 年度以降 5 年計画の科研費による応用研究）の基礎を築くことにある。

3. 研究の方法

平成 28 年度

小型連続生産を可能とする防爆対応型攪拌試作装置を開発、これを用いて新規熱可塑性樹脂を用いた固体推進薬の組成を決定し、製造条件の最適化を図る。推進薬外径 60mm 程度の小型ロ

ケットの燃焼実験装置を設計，製作及び、無線点火システムの設計．

平成29年度

前年度に決定した推進薬組成について、小型ロケット燃焼実験装置を用いて燃焼試験を行い、モータシステムとしての燃焼・推進特性を検証する．小型飛翔ロケットの設計，無線点火システムの試作製作．

平成30年度

小型飛翔ロケットを製作，打上げ実験を実施．得られたデータを基に固体ロケットの低コスト化のための革新技術（低融点熱可塑性推進薬とワイヤレス点火器）を確立．

4．研究成果

本研究は、産学官の英知を結集し、これまで宇宙に参画してこなかった新規メーカーや民生分野（いわゆるニュースペース）も巻き込んで、自由かつ柔軟な発想で製造方法や設計そのものを根本から変えるような技術革新に挑戦し、JAXAの研究開発では成し得ない（コストの桁を変えるような）大きなブレークスルーを図ろうという独創的かつ先駆的な研究である．具体的には、低融点熱可塑性推進薬と無線点火システムの要素研究を試作研究段階までレベルアップし、固体ロケット推進系の改革を



図1 地上燃焼試験

実現した。本研究の集大成として、当初の計画どおり、新開発の固体ロケット燃料（低融点熱可塑性推進薬）を搭載したロケットモータの大型化を進め、大樹町航空公園内の敷地にて高度1km級の小型ロケットの打ち上げ実験（LTP ロケット2号機）に成功した。これにより、低融点熱可塑性推進薬の製造性と燃焼特性について実用可能性が明らかになった。最も重要な製造性のレベルは固体燃料ロケットの製造プロセスを根本から変える画期的なものであり、燃料の混和開始から打ち上げまでに要するトータル日数を桁違いに短縮した（従来数か月要していた作業をわずか1日にスリム化）。ワイヤレス点火器についても植松電機の敷地内で行った飛行試験（当初予定を前倒して打ち上げたLTP ロケット1号機）により実証を完了し、試作モデルをベースにチップ化仕様を確定した。なお、モータ設計をセグメント化して大型化に道筋をつけるなど、当初の計画を上回る大きな成果を得た。これらにより、革新技術（低融点熱可塑性推進薬とワイヤレス点火器）の基礎研究を完了し、固体燃料ロケットの低コスト化と民間活動の活性化に道を拓いた。また、次のステップの研究（31年度以降5年計画の科研費研究で、本研究で完了した基礎研究の成果をもとに应用研究を進め、実際のロケットに実装できるレベルまで技術水準を高める研究）のための基礎を築いた。

低融点熱可塑性推進薬

最大のチャレンジは固体燃料ロケットの根幹をなす推進薬の改革である。固体ロケットの推進薬は、バインダと呼ばれる燃料樹脂に合計80%以上の重量を占める酸化剤（過塩素酸アンモニウム）と金属燃料（アルミニウム）を混和し、化学反応により硬化させて成形する。既存の推進薬はバインダに熱硬化性樹脂を採用しており、硬化のプロセスが非可逆な熱硬化反応（化学反応）であるため、製造にあたっては大型設備が必要となる（推進薬の全量を一気に製造しなければならないため）。JAXAの大型モータの場合、打上げは年に数回程度の低頻度であることから、大型製造設備が年間を通じほとんど使用されない。この重厚長大で低頻度な製造プロセスこそ固体ロケットの高コスト体制の主要因である。さらに、化学反応による熱硬化に時間を要するため、混和開始からロケットへの充填完了までの全工程に長時間（数週間）を要していた。本研究で取り組んだ低融点推進薬はこれとは全く逆転の発想であり、バインダに熱可塑性

樹脂（低融点樹脂）を用いることで、製造プロセスそのものを刷新しようというものである。

この新たな推進薬（低融点推進薬）の場合、硬化のプロセスは可逆となり、少量ずつ製造し備蓄することができるうえ、小型設備による連続生産が可能となる。本研究では、民間と共同で実験室規模の大きさの混和器を試作、この混和器は自転と公転を組み合わせる方式であり、混和時に発生する熱により自動的に低融点樹脂（融点80程度）が溶解するため、特別な加温を必要としない。さらに、常温で硬化する過程は化学反応ではなく、熱が後出されれば完了するため、製造時間も桁違いに短縮される。

表1 従来方式との製造期間の比較

所要日数	従来方式	本研究方式
推進薬製造開始から燃焼試験まで	数週間	数時間
推進薬製造開始から打ち上げまで	数か月	1日

本研究 2 年目に実施した燃焼試験では、混和開始から燃焼終了に至るまでの全工程をわずか 2 時間程度で実証することができた。従来の推進薬ではこの規模でも数週間程度を要することを考慮すると、製造工程は時間軸で 1/100 以下に短縮されたことになる。これは固体ロケットの開発史上、エポックメイキングな大改革である（表 1）。飛行試験ではさらに効果が大きいことが明らかになり、燃料の混和開始から打ち上げまでに要するトータル日数を桁違いに短縮した（従来数か月要していた作業をわずか 1 日にスリム化）。製造性（溶融性と流動性）や燃焼特性（燃焼速度）などについては、地上燃焼試験（薬量 330g 級、図 1）と超小型ロケットによる飛行試験（当初予定を前倒して打ち上げた LTP ロケット 1 号機、図 2）により問題のないレベルに達したことを確認している[2]。一方、機械的物性（引張強度等）についてはイプシロン用の現行推進薬に比べて改良の余地があることが示されている。本研究で実施したモデルロケットクラスの小型ロケットにおいては全く問題がないが、実用ロケットへの応用を考えた場合、機械的物性の改良が必要であり、次年度以降の研究（実用ロケット - 高度 50km 級の観測ロケットへの実装）で取り組む課題として識別できた。

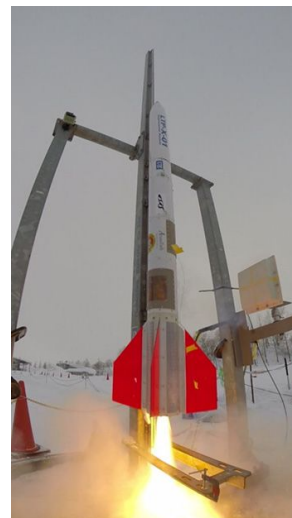


図 2 飛行試験
(LTP ロケット 1 号機)

ワイヤレススマート点火システム

固体ロケットの低コスト化という研究方針を踏まえて、電力・信号伝送機能の試作には民生の汎用技術（国内での利用が可能な UHF 帯 RF-ID 開発キット）を活用し[3]、交通系 IC カード程度の小型軽量の試作品を完成、モデルロケットによる飛行試験（当初予定を前倒して打ち上げた LTP ロケット 1 号機）を通して有効性を実証し、要素研究レベルを終了した。このワイヤレス点火システムは、点火指令等のデータだけでなく、電力そのものもワイヤレスで伝送するものであり、ロケットへの応用としては世界でも初めての革新的な取り組みである。さらに、このシステムは機能の点検を自律的に行う機能（スマート機能）も搭載している。これにより、この点火システムはコンパクトなスタンドアロン方式となり、他の機器との有線結合がないため実装が格段に容易になるばかりでなく、点検等の運用に関わる人手と時間を大幅に短縮し、大幅なコストダウンを図ることができる。なお、ワイヤレス点火システムは、安全上の観点からロケットの中で最も設計変更のしにくい部分に汎用技術を導入することに相当し、ロケットの搭載機器全体への応用に道を拓くものである。本研究により、実用ロケット（高度 50km 級の観測ロケット）への実装に耐えられる特性改善を図る準備が整った。具体的には、試作試験（要素研究）レベルで実証された機能をチップ化し小型軽量化を追求するなどしてロケット実装レベルでの研究を行ない、多段式ロケットの段間分離や上段ロケットの点火など応用範囲の拡大を進めることが可能となった。

本研究の研究成果をまとめると、以下のとおりである。すなわち、固体ロケットの低コスト化は宇宙開発利用の将来にとって重要な課題であり、その一環として固体燃料の現行の製造方法を効率化しようという研究は国内でも散見されるが、本研究のように固体ロケット燃料の組成自体を根本から変えるような革新的研究は、国内外において他には見られない。すでに世界最高レベルにある我が国の固体ロケット技術の水準をさらに上げる世界でも画期的な研究である。一方、ロケットの搭載機器をワイヤレス化する研究は国内外でも検討段階であり、実際に応用された例はない。加えて、安全上の観点からロケットの中で最も新規技術の投入しにくい点火システムという基幹コンポーネントにおいて、ワイヤレス化の研究の推進は世界でも唯一のものである。本研究によって世界でも初めて点火システムのワイヤレス化を実現したことで、世界的にもロケットの搭載機器全体のワイヤレス化に道が拓かれたと言える。

本研究では、固体ロケットを低コスト化するための根本にかかわる革新技術（低融点熱可塑性推進薬とワイヤレス点火器）の有効性を実証し、基礎研究のレベルを完了することで、実用ロケットに適用するための応用研究の段階（令和元年からの 5 年計画の科研費研究）に移行する基礎を固めた。

【参考文献】

1. Yasuhiro Morita, “Challenge in solid fuel rocket technologies beyond the enhanced Epsilon”, 15th International Space Conference of Pacific-basin Societies, July 2018, Montreal, Canada.
2. Hikaru ISOCHI, Hikaru OTABE, Tsutomu UEMATSU, Nobuji KATO, Keiichi HORI, Yasuhiro MORITA, and Ryojiro AKIBA, “The Low-Cost Rocket with Low Melting Temperature Thermoplastic Propellant”, The 31st ISTS Special Issue of Transaction of JSASS, 2017 .

3. 名出 智彦, 森田 泰弘, 堀 恵一, 植草 康之, “新点火システムの開発 モデルロケットでの実証にむけて -”, STCP-2016-002, 宇宙輸送シンポジウム, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

“The Low-cost Rocket with Low Melting Temperature Thermoplastic Propellant”, Hikaru Isochi, Hikaru Otabe, Tsutomu Uematsu, Keiichi Hori, Yasuhiro Morita and Ryojiro Akiba, The 31st ISTS Special Issue of Transaction of JSASS, 2019, 17 巻 3号 p. 350-353

〔学会発表〕(計 6件)

“Flight Results of Solid Propulsion System for Epsilon Launch Vehicle from the Third Flight”, Koki Kitagawa, Shinichiro Tokudome, Keiichi Hori, Kyoichi Ui, Masahiro Kinoshita(JAXA), Junichi Hashimoto, Kotaro Ichimura, IAC-18-C4.2.2, 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018.

“低融点熱可塑性推進薬の侵食燃焼”, 長谷川宏(日油)五十地 輝, 太田部晃, 植松努(植松電気), 加藤信治(型善), 堀恵一, 森田泰弘, 秋葉録二郎(HASTIC), 平成29年1月, 宇宙輸送シンポジウム, 神奈川県相模原市

“新点火システムの開発-モデルロケットでの実証にむけて-”, 名出 智彦(ISE), 森田 泰弘(JAXA), 堀 恵一(JAXA), 植草 康之(IA), 平成28年度宇宙輸送シンポジウム, 平成29年1月

“低融点熱可塑性推進薬の製造方法に関する研究”, 五十地輝(植松電機), 大田部晃(植松電機), 植松努(植松電機), 加藤信治(型善), 堀恵一(JAXA), 森田泰弘(JAXA), 秋葉録二郎(HASTIC), 平成28年度火薬学会秋季研究発表会, 平成28年11月

“次世代固体ロケットに向けた低融点熱可塑性推進薬に関する研究”, 五十地 輝, 大田部晃, 植松 努(植松電機), 加藤 信治(型善), 堀 恵一, 森田 泰弘(JAXA), 秋葉 録二郎(HASTIC), 第60回宇宙科学技術連合講演会, 平成28年9月

“新点火システムの開発”, 名出智彦(IHI エアロスペースエンジニアリング), 森田泰弘, 堀恵一, 植草康之(IHI エアロスペース), 平成28年9月6日, 宇宙科学技術連合講演会, 北海道・函館市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：秋葉 隼二郎

ローマ字氏名：Ryojiro Akiba

所属研究機関名：国立研究開発法人・宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：名誉教授

研究者番号（8桁）：00013631

研究分担者氏名：堀 恵一

ローマ字氏名：Keiichi Hori

所属研究機関名：国立研究開発法人・宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：40202303

研究分担者氏名：上杉 邦憲

ローマ字氏名：Kuninori Uesugi

所属研究機関名：国立研究開発法人・宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：名誉教授

研究者番号（8桁）：40013693

研究分担者氏名：佐伯 孝尚

ローマ字氏名：Takanao Saiki

所属研究機関名：国立研究開発法人・宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：助教

研究者番号（8桁）：10415903

研究分担者氏名：三浦 政司

ローマ字氏名：Masahi Miura

所属研究機関名：国立大学法人・鳥取大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：80623537

(2)研究協力者

研究協力者氏名：吉田 裕二

ローマ字氏名：Yuji Yoshida

研究協力者氏名：長谷川 宏

ローマ字氏名：Hiroshi Haegawa

研究協力者氏名：五十地 輝

ローマ字氏名：Hikaru Isochi

研究協力者氏名：安達 直人

ローマ字氏名：Naoto Adachi

研究協力者氏名：植松 努

ローマ字氏名：Tutomu Uematsu

研究協力者氏名：加藤 信治

ローマ字氏名：Nobuji Kato

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。