

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00974

研究課題名(和文) ペットボトル・ハイブリッド・ロケットの教材的利用の研究

研究課題名(英文) A Study on Educational Utilization of Hybrid Rocket

研究代表者

石原 敦 (Ishihara, Atsushi)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：50245247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、教材ハイブリッド・ロケットの性能を向上させ、通常学内クラス(埼玉県加須北中学校、埼玉県立三郷工業高校)そして募集で開催された理科教室(ひらめき・ときめきサイエンス、さいたま市青少年宇宙科学館、松山市理科おもしろ教室、ISTS理科教室、愛媛ゆめ教育協会ワクワクゆめ実験教室)で本ロケット体験教室を行った。その結果、本教材は生徒の理科や工学への興味喚起に有効であった。加えて3Dプリンターによる燃料形状の製作により、ロケット性能も向上させることができた。さらに6軸加速度・ジャイロセンサーとパラシュート機構によって、飛翔中データを取得でき、本ロケットの教材としての利用の可能性も広がった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケット教材には、風船ロケット、水ロケット、そして火薬ロケット等が存在するが、風船ロケットは玩具的要素が大きく、水ロケットは噴煙を伴わず、火薬ロケットは、推力を発生するエンジンの改良を禁じられており、暴発や保管で危険性が伴う。本ハイブリッド・ロケットは、火薬を全く使わず、どこでも入手可能な材料を利用したものであるため、保管の安全性に優れ、生徒自身で改良でき、天候や環境に関係なくロケット発射実験を実施できる特徴を有する。加えて、6軸加速度・ジャイロセンサーとパラシュート機構によって、安価にロケット飛翔中のデータを取得でき、中学校・高校の理科・技術科・物理化学の実践的教育に大いに貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, an educational hybrid rocket using conventional materials such as a carbonate plastic bottle, polyethylene, aluminum, steel, nichrome, and wire and oxygen gas was improved and demonstrated in normal science classrooms of a school (Kazokita Public Junior High School and Misato Technological High School) and outreach programs (Hirakaki Tokimeki Science supported by JSPS, Saitama Municipal Youth Astronomical Museum, a fun science class held in Matsuyama, a science program supported by JSAA). As a result, the utilization of the hybrid rocket as an educational material was very effective to evoke the interest of science and engineering. In addition, using a 3D printer, the rocket performance was also improved. Furthermore, data from the flying rocket was cheaply obtained using 6 axis gyro sensor and accelerometer, and a parachute system. Therefore, these results could expand the utilization for the hybrid rocket in science and technology education.

研究分野：ロケット工学

キーワード：ハイブリッド・ロケット 理科教材 技術科教材 ペットボトル モデルロケット 体験教室

## 1. 研究開始当初の背景

新指導要領の理科分野では、科学を学ぶ意義や有用性を実感させ、科学への関心を高めることをより求められ、効率的な教材がより必要とされる。一方技術科分野では、材料と加工、エネルギー変換、生物育成、情報電子の内容の実施が義務づけられている。中学2学年・3学年理科教科書には、国産ロケットHIIの打ち上げの写真が掲載され、理科の実社会での実用性応用性をイメージさせている。加えて中学3学年理科では、作用・反作用の実例として、ロケット推進が利用されている。現在のロケット技術を見ると、ハイブリッド・ロケットは、民間初宇宙旅行会社 Virgin Galactic 社のロケット等で、酸化剤に亜酸化窒素、燃料にポリブタジエンを用いたハイブリッド・ロケット技術が使用されている。また国内では、小型衛星などの打ち上げを目指したハイブリッド・ロケットの開発が JAXA や北海道大学グループで進められている。加えて、「はやぶさ2」や宇宙実験棟「きぼう」は、マスメディアに時々紹介され、中学・高校生徒の宇宙技術への関心も高く、ロケット教材は、生徒に理系科目への興味や将来技術への夢を喚起する有効な実践的教材である。ロケット教材として、水ロケットや火薬ロケット、そして風船ロケット等も存在するが、水ロケットでは噴煙を伴わず、火薬ロケットでは危険性や保管の問題が伴う。風船ロケットは玩具的要素が大きい。本研究ハイブリッド・ロケットは、火薬を使わず、どこでも入手可能な材料を利用したものであるため、本教材ロケットを発展させることができれば、中学校の理科教育に加え技術科教育に大いに貢献できると考え、未来へ繋がる実践的教材となることを目指している。

## 2. 研究の目的

本ハイブリッド・ロケットは、理科教育の理科単元では、圧力と力、化学反応の利用（燃焼）、作用と反作用、電気回路、一方技術科単元では、エネルギーの変換、情報電子等の分野で実践的な教育に発展させることが期待できる教材であり、次の点に着目した新しい概念のハイブリッド・ロケット教材である。本研究の目的は、そのロケット教材の性能を向上させるとともに、教育効果を検証することである。

- (1) ロケット技術は、中学・高校生徒にとって、科学的技術的興味を引く対象であり、安全な実践的教材により、指導要領に沿った授業を効果的に実施することができる。
- (2) 実社会においても今後も利用が高まって行く環境にやさしい実用ハイブリッド・ロケットを、教室内で身近に実践体験実験できるようにした教材は皆無であり、生徒たちの学習意欲の向上にも繋げることができる。

## 3. 研究の方法

本研究は、容易に手に入るペットボトルやプラスチック燃料および酸素ガスを用いたハイブリッド・ロケットを教材化したものであり、燃料の選択、構造設計、安全性、中学校の生徒および教諭の印象が重要となる。そこで、次の項目に従い研究成果を導出した。

- (1) ロケット燃焼性能向上
- (2) ロケットの推力性能の測定および安全性の検討
- (3) 教材ハイブリッド・ロケット用アビオニックスの開発および飛翔データの取得
- (4) 通常授業および特別授業における教材ハイブリッド・ロケットの評価

## 4. 研究成果

### (1) ロケット燃焼性能向上

様々な形態や年齢層の授業や理科教室に対応するために、提案するハイブリッド・ロケットの燃焼性能に与える諸因子の影響を検討した。具体的には、新たな教材としても興味深い3Dプリンターを用いた燃料形状が、または酸素ノズル径やスロート径が総推力に与える影響を検討した。

まず、図1に機械加工では困難な形状であるマルチポート型燃料を3Dプリンター検討した結果を示す。燃料長  $L_f$  を 150mm と固定し、内径 10mm 単孔で燃料長が 150~800mm に相当する内表面積  $A_f$  を有するマルチポート型燃料では、総推力  $I_t$  が最大で 1.4 倍程度増大することなどを明らかにした。

次に、燃料内の流れの乱流化および燃焼反応の活性化を図るために、燃料内部形状を図2に示すようにマルチポートよりさらに複雑化した螺旋型および衝突型を開発し、燃焼実験を実施した。その結果、同一燃料長および同一内部表面積でもさらに総推力を向上させることができる可能性を明らかにした。

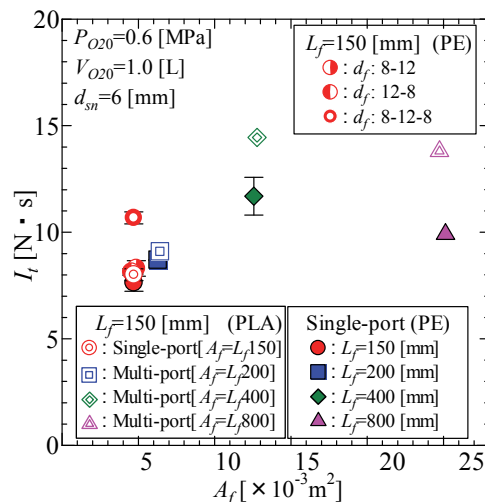


図1 マルチポート型燃料に対する燃料内部表面積  $A_f$  と総推力  $I_t$  の関係

さらに、図3に、酸素ノズル径  $d_{O_2}$  やスロート径  $d_{sn}$  が総推力  $I_t$  に与える影響を検討した結果を示す。図3のように、酸素ノズル径およびスロート径を小さくすることによって総推力が増加することを明らかにした。

以上の成果により、教材としての用途に応じた推力のバリエーションを増やすことが可能になることが確認できた。

## (2) ロケットの推力性能の測定および安全性の検討

本研究者は、上述のようにロケットの性能評価のために総推力を燃焼室圧力  $P_c$  または歪みゲージを使用し計測した。しかしながら、 $P_c$  からの推力  $F$  の計測では次式を用いる。

$$F = C_F A_t P_c \quad (1)$$

ここで、 $C_F$  は推力係数で、ノズルの性能を表す無次元数であり、 $A_t$  はノズルスロート断面積を表す。従来は、燃焼室圧力から推力を求める際、 $C_F = 1$  と仮定してきたが、ロードセルを用いることにより推力を直接もとめ  $C_F$  を実験的に確定できる。そこで、ロードセルを用いた実験装置の構築を試み開発した(図4(a)参照)。その結果得られた  $C_F$  を図4(b)に示す。図4(b)から、 $C_F$  は1以上あり、少なくとも従来のように  $C_F = 1$  として燃焼室圧力波形から推力を求めることは過剰見積もりしていないことを明らかにできた。したがって、中学校での理科学科「力と圧力」等に対して実践的教材として使用する際、簡易的に  $C_F = 1$  として扱っても良いことが確認できた。

次に、本ロケットを教材として使用するにあたって重要な安全性について検討するために、再利用燃料を用いて、一般的にハイブリッド・ロケットで可能な再着火ができるかどうかや、燃料の再利用性についても検討した。図5に、一例としてPE(ポリエチレン)を燃料とした燃焼実験回数  $N_c$  に対する燃焼室圧力波形  $P_c$  を示す。図5から、同一燃料を使用し実験を重ねても燃焼特性に変化はしないことがわかる。また、 $N_c = 3$  となっても燃料側面に穴があき火炎が噴出することもなかった。以上から、PEを燃料とした本ロケットは再着火可能であり、 $N_c = 3$  までは燃焼特性および性能は変化せず、本ロケットの安全性および再利用性が確認できた。

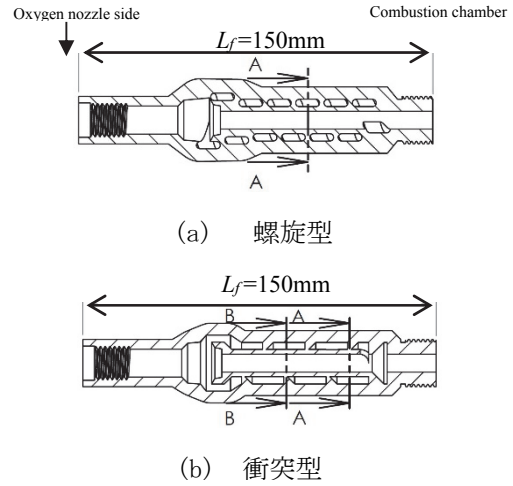


図2 3Dプリンターによる螺旋型&衝突型燃料の開発

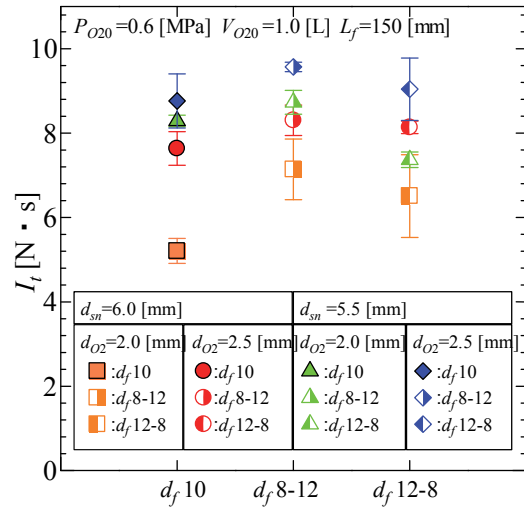


図3 酸素ノズル径  $d_{O_2}$  やスロート径  $d_{sn}$  と総推力  $I_t$  との関係

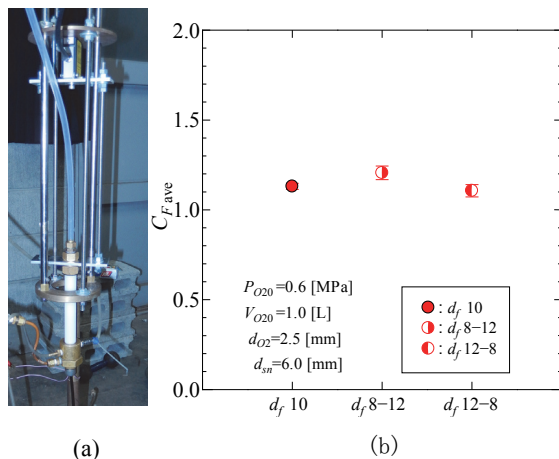


図4 (a)ロードセルを用いた実験装置  
(b)ロードセルから求めた推力係数  $C_F$

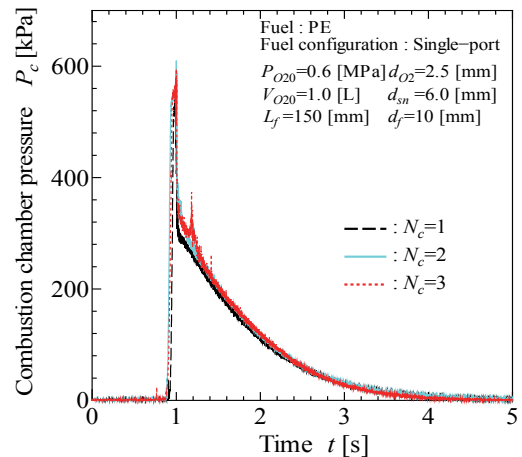


図5 PEを用いた再実験性の確認

### (3)教材ハイブリッド・ロケット用アビオニックスの開発

本研究では、加速度と角速度を測定するために6軸センサーMPU6050を使用した。動作電圧は3.3v/5v、加速度検出範囲は「±2/ ±4/ ±8/ ±16g」、角速度検出範囲は「±250 / ±500 / ±1000 / ±2000 ° /s」、フルスケールは符号付16bit整数(+32767~-32767)である。6軸センサーを動作させるマイコンはArduino Nano 互換(価格約500円)を使った。大きさは43×18mmである。マイコンの内部SRAMは、2KBと容量が少ないため、センサーから検出されたデータの保存には容量125KBの外部メモリSRAM23lc1024を使用した。メモリからパソコンにデータを転送する方法として、SDカードに保存する方法と、Bluetoothで転送する方法を試した。SDカードは発射、または落下の衝撃等の原因でデータが確実に保存されない場合があったため、Bluetoothは発射前のデータ取得の確認ができデータの保存が安定していたBluetoothで転送する方法を選択した。電子基板は、電子回路CADのkicadで回路設計をし、基板加工機用いて図6の基板作成した。図7にロケットに乗せた回路と組み込んだロケット上部を示す。ロケットには製作した電子回路、パラシュートが詰まれている。側面にバッテリーとデータ収録開始押しボタンがある。製作にかかった値段は約2500円である。図8は、垂直発射した本ハイブリッド・ロケットに搭載された動画カメラで撮影された映像で地上の発射担当者が撮影されている。その際、ロケットが発射し飛翔方向の加速度が0.8gになるとパラシュートが放出される構造になっている。ロケットは上空でパラシュートを放出し、安全にカメラや計測回路を回収した。計測時間は約20秒と設定した。ロケット回収後再びボタンが押されたらパソコンにデータを転送する。

水が入っていない空のロケット本体の質量350g、水の質量400gの水ロケットで、ペットボトル内の圧力3気圧とし飛翔実験を行った。その結果、加速度、角速度のデータを収録した。その6軸データ(3軸加速度、3軸角速度)の生データを図9に示した。図9のデータ校正や実験映像データとの同期解析等は今後行っていくが、実験の再現性もよく初期段階としては、充分の成果と言える。しかし、飛翔データの取得の確実性の向上やパラシュート機構の教材としての単純化を今後も継続的に検討していかなければならない。

### (4)教材ハイブリッド・ロケットの評価

学校内の通常のクラス単位の授業では、埼玉県加須市立加須北中学校(2017年10月11日、2018年10月10日)と、埼玉県立三郷市総合技術高校(2018年2月15日)で、休憩をはさみ50分2時限連続授業を実施した。また、参加者の募集を行った授業は、ひらめき・ときめきサイエンス(2017年7月8日、2018年7月8日)、さいたま市青少年宇宙科学館(2018年8月7日)、そして、愛媛県松山市おもしろ理科教室(2017年1月7日、2018年1月6日@愛媛大学)、愛媛県ISTS理科教室(2016年12月19日@宇和島市立玉津小学校)や愛媛ゆめ教育協会ワクワクゆめ実験教室(2019年2月3日@えひめこどもの城)などで本研究でのペットボトル・ハイブリッド・ロケットを用いた理科教室を実施した。組み立ての様子を図10-14に、理科教室での打ち上げの様子図15に示す。参加者のアンケート調査も実施した、本ハイブリッド・ロケットが、中学生はもとより教員や保護者からも教材としての高い評価をえることができた。

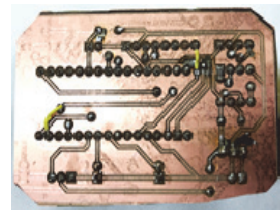


図6 試作基板

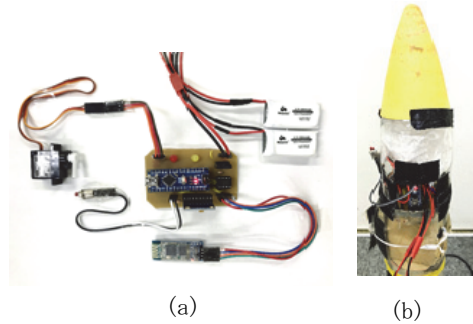


図7 (a)データ収録回路と(b)ロケット上部



図8 ロケット搭載カメラからの撮影映像

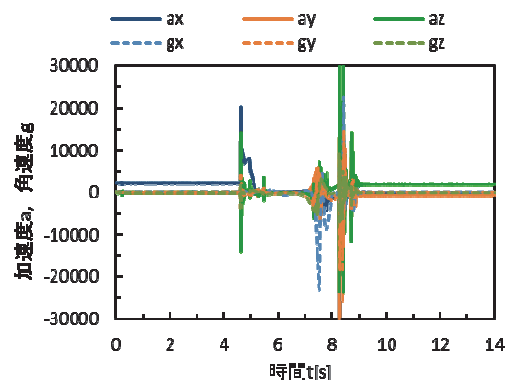


図9 ロケット飛翔データ



図10 加須北中学校 (埼玉)

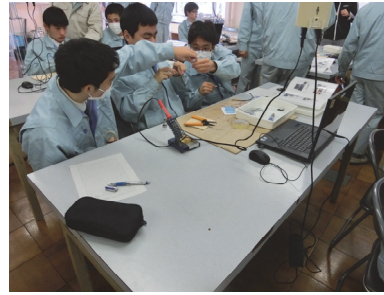


図11 三郷総合技術高校 (埼玉)



図12 ひらめき・ときめきサイエンス (埼玉)



図13 さいたま市青少年宇宙科学館 (埼玉)



図14 おもしろ理科教室 (愛媛)



図15 ロケットの打ち上げ (愛媛)

## (5) 今後の展望

3Dプリンターによるロケット燃焼室の改良と推力測定技術の開発により、ロケット推力性能を向上させることができた。さらに6軸センサー内蔵ハイブリッド・ロケットにより飛行中のデータの取得も可能となった。したがって、本教材は、理科単元の圧力と力、化学反応の利用(燃焼)、作用と反作用、点火装置で電気回路教育等の分野、および技術科単元のエネルギーの変換に加え、情報技術分野の実践的な教材としても利用可能になったため、本ロケットの応用範囲を拡大させることができた。そのため、本ハイブリッド・ロケットは、その教育的価値も高く、理科離れが進む生徒に対しても有効な教材と成り得る。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 田口 将隆, 石原 敦, 中原 真也, 教材ハイブリッドロケットの体験教室での利用, 日本理科教育学会第57回関東支部大会, 宇都宮大学, 2018年.
- (2) 時川凌一, 中原真也, 栗田明秀, 阿部文明, 石原敦, PLAを燃料とした教材用小型ハイブリッド・ロケットの開発に関する基礎研究, 第56回燃焼シンポジウム, 堺市産業振興センター, 2018年.
- (3) Akihide Kurita, Ryoichi Tokigawa, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe, Kenichi Tokunaga and Atsushi Ishihara, A Study on Developing an Eco-friendly Hybrid Rocket with PLA Fuel as an Educational Material, The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology(JCREN2018).

- (4) Masaya NAKAHARA, Ryouichi TOKIGAWA, Keisuke WATADA, Kohki BANDEN, Fumiaki ABE, Kenichi TOKUNAGA, Atsushi ISHIHARA, A Study on Development of a Small Hybrid Rocket as an Educational Material, 31st ISTS(国際学会), Matsuyama, 2017 年.
- (5) Atsushi Ishihara, TianWen Zhang, Brian Teoh Kai Shen, Masaya Nakahara, A Hybrid Rocket for Usual Science Classes in a Public Junior High School, 31st ISTS(国際学会), Matsuyama, 2017 年.
- (6) 綿田 圭佑, 中原 真也, 時川 凌一, 阿部 文明, 石原敦, PLA を燃料とした教材用ハイブリッドロケットに関する基礎的研究, 第 55 回燃焼シンポジウム, 富山国際会議場, 2017 年.
- (7) 瀧澤 保鷹, 石原 敦, 村石 亘, 中原 真也, 高大連携を利用した小学校プログラミング教育, 日本理科教育学会第 56 回関東支部大会, 千葉大学, 2017 年.
- (8) Atsushi Ishihara, TianWen Zhang, Brian Teoh Kai Shen, Wataru Muraishi, Masaya Nakahara, Atsushi Ohashi, Akiyo Kobayashi, Utilization of a Robot as an Education Material for A Public Junior High School, 11th annual International Technology, Education and Development Conference
- (9) 張 天文, 張 凱勝, 石原 敦, 中原 真也, 大橋 淳史, 小林 明代, 公立中学校・連携授業における教材ロボットの利用, 日本理科教育学会関東支部大会, 埼玉大学, 2016 年.
- (10) 晩田 光貴, 中原 真也, 綿田 圭佑, 阿部 文明, 石原敦, 教材用ハイブリッド・ロケットに関する基礎研究, 第 54 回燃焼シンポジウム, 仙台国際センター, 2016 年.
- (11) 辻角信男, 石原敦, 張 天文, N2O/ポリエチレンハイブリッドロケットの研究, 第 54 回燃焼シンポジウム, 仙台国際センター, 2016 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 2 件)

(1) 名称：空気ハイブリッドロケットロケット

発明者：石原 敦・中原 真也

権利者：石原 敦・中原 真也

種類：特許

番号：特許第 6500171 号

取得年月日：平成 31 年 3 月 29 日

国内外の別：国内

(2) 名称：小型ロケット発射台

発明者：石原 敦・中原 真也

権利者：石原 敦・中原 真也

種類：特許

番号：特許第 5927459 号

取得年月日：平成 25 年 5 月 13 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

中原 真也 (NAKAHARA, Masaya)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20315112

※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。