

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：32410

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560086

研究課題名(和文) ペットボトル・ハイブリッド・ロケットの教材研究

研究課題名(英文) A Study on Plastic Bottle Hybrid Rocket as an Educational Material

## 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) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ペットボトル、ポリエチレン、アルミニウム、鉄、ニクロム線の身近な材料と酸化剤として酸素を用いた教材用小型ハイブリッド・ロケットを開発した。本小型ハイブリッド・ロケットを用いて、埼玉県熊谷市の公立中学校の通常理科授業時間と愛媛県松山市で行われた理科おもしろ教室で、ロケットに関する連携授業を行った。本教材用ハイブリッド・ロケットを用いた中学校と大学との連携授業は、理科授業と理科おもしろ教室の授業目的を達成したばかりではなく、中学生徒の工学や理科への興味を喚起させるために極めて有効であった。

研究成果の概要(英文)：A small hybrid rocket was developed as an educational material using conventional materials such as a carbonate plastic bottle, polyethylene, aluminum, steel, nichrome wire and oxygen gas. Collaboration science classes were performed using the hybrid rocket in science classes of second grade of a public junior high school in Kumagaya and fun science classes in Matsuyama. As a result, the cooperation between a junior high school and a university with the utilization of the hybrid rocket as an educational material was very effective not only to achieve the purpose of science lessons and fun science class, but also in order to evoke the interest of engineering and science.

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 ペットボトル モデルロケット

### 1. 研究開始当初の背景

平成 24 年度から施行されている中学新学習指導要領の技術分野では、材料と加工、エネルギー変換、生物育成、情報電子の内容が義務づけられている。本研究は、中学校でも安全にロケット技術教育ができる教材を提供し、エネルギー変換、材料と加工、情報電子の分野の教育で貢献するものである。

現在のロケット技術を見ると、ハイブリッド・ロケットは特に近年注目されている技術であり、民間初宇宙旅行会社 Virgin Galactic 社のロケット等には、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。したがって、ハイブリッド・ロケットは、生徒に「宇宙への夢」を与える実践的教材としては有効である。ロケット教材教育を、水ロケットや火薬ロケット、そして風船ロケット等で行うことも可能だが、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、本研究を用いた教材ロケットを開発すれば、中学校の技術教育に加え理科教育に貢献できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、中学教育指導要領の技術分野の必修とされるエネルギーの変換の教材を開発するために、身近にあるペットボトルを用い、次の点に着目した新しい概念のハイブリッド・ロケットの教材を提案することが目的である。

(1)ロケット技術は、中学校や高等学校の生徒にとって、宇宙への夢と技術的興味を引く対象であり、安価安全なより実践的な教材が求められている。

(2)環境にやさしく低コストな実用ハイブリッド・ロケットは、実社会においても今後もその利用は高まって行くが、そのハイブリッド・ロケットを教材として簡単に実験できる教材は皆無である。

したがって、本ハイブリッド・ロケットは、未来へ繋がる実践的教材となることを目指している。

### 3. 研究の方法

本研究は、誰にでも容易に手に入るペットボトルやプラスチック等の燃料および酸素ガスを用いたハイブリッド・ロケットを教材化する初めての試みである。したがって、燃料の選択、構造設計、安全確認、中学校の生徒および教諭の印象が重要となる。そこで、安全で安価な教材を提示するため、次の項目に従い研究成果を導出した。

(1)ロケット設計と使用燃料の選択

- (2)燃料形状やノズル径および点火システム等のロケット構造設計と試作実験
- (3)ロケットの推力性能の測定および安全性の評価
- (4)ロケットの飛翔試験
- (5)中学生を対象として教材ハイブリッド・ロケットの評価

### 4. 研究成果

(1)ロケット設計と使用燃料の選択

ハイブリッド・ロケットの3次元設計図を図1に示す。本実験装置は、酸素タンク、酸素ノズル、燃料(燃焼室)、ノズル等から構成される。一例として、500mLのペットボトルを用いたハイブリッド・ロケットの実物の組立前の様子を図2に示す。組立後の様子を図3に示す。図1と2における部品数は、20点以下で中学生にも組み立てが複雑すぎない構造となっている。燃料は、入手性と加工性を考慮して高密度ポリエチレンを選択した。

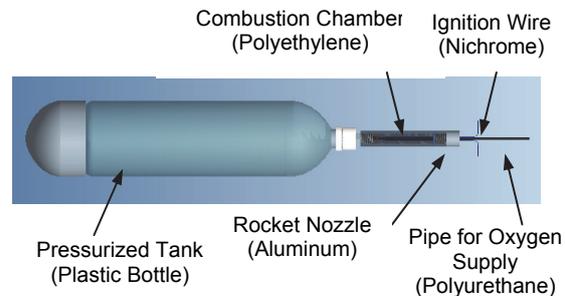


図1 ハイブリッド・ロケット概略図



図2 ハイブリッド・ロケットの実物(組立前)



図3 ハイブリッド・ロケットの実物(組立後)

(2)燃料形状やノズル径および点火システム等のロケット構造設計と試作実験

本研究では、図1に示す本ロケットを模擬した図4に示す燃焼実験装置を用いて、諸条件がロケットの性能に与える影響を検討した。図4の実験装置は、ペットボトルの代わりに金属製酸素タンクを使用し、燃料の交換により繰り返し燃焼実験が行える。さらに、燃焼室圧力  $P_c$ 、および酸素タンク圧力  $P_{O_2}$  を計測した。実験は、酸素ポンプよりノズルから挿入したチューブを通して酸素タンクに所定の圧力まで酸素を供給し、その後チューブに巻いたニクロム線へ所定の電圧を供給し、着火および燃焼を開始させ、燃焼状況を圧力センサ( $P_c$  と  $P_{O_2}$ )とビデオカメラにより観測した。

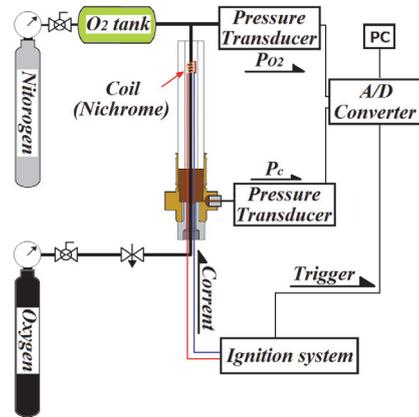


図4 ハイブリッド・ロケット燃焼実験装置図

図4の実験装置を用い、燃料形状が性能に与える影響について検討した。代表的な燃料形状を図5に示す。ここでは、燃料内径  $d_f$  や燃料長さ  $L_f$  等が総推力  $I_t$  に及ぼす影響について主に検討した。なお、ノズルスロート径  $d_{sn} = 6 \text{ mm}$  とした。その結果、図6に示すように、内径  $d_f = 10 \text{ mm}$  程度では、燃料長さ  $L_f$  に関しては、400mm程度までは長いほど推力が増大するものの、その増大率は長さとともに減少することがわかった。また、燃料内径  $d_f$  の影響は小さいこと、一方で燃焼面積はほぼ同一のもとで燃料内径に段差を付けると推力に影響を与えることも明らかにした。

一方、酸素ガス量に関しては、酸素タンク容積を1Lから2Lへ増大させるとほぼ概ね線形的に推力も増大することがわかった。ただし、2L程度になると、外径20mm内径10mm程度の燃料棒では、燃焼時間が長くなるために、燃焼終了後に燃料棒の形状変形の開始が早くなる傾向にあった。

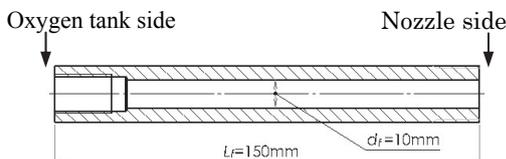


図5 燃料形状

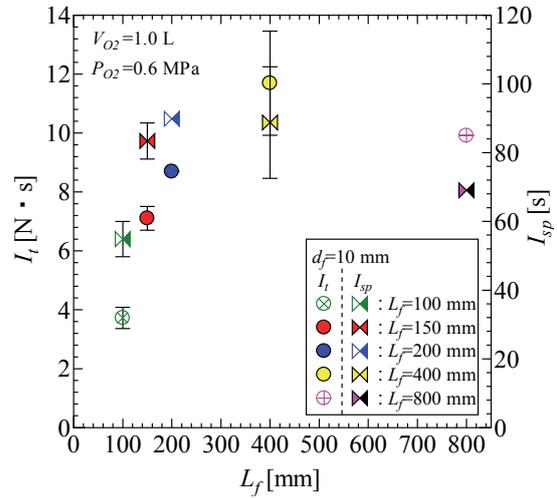


図6 燃料長さとの総推力の関係形状

(3)ロケットの推力性能の測定および安全性の評価

図7に、一例として、燃料内径が異径( $d_f$  12-8)の場合での燃焼室圧力  $P_c$  と酸素タンク圧力  $P_{O_2}$  の時系列変化を示す。図7から、点火後、着火遅れが0.9 s程あるものの(図7中①)  $P_c$  が急激に増加しつつ(図7中②)、 $P_{O_2}$  の減少が始まり、燃焼が開始することがわかる。そして、 $P_c$  が最大値となる(図7中③)時刻付近では、燃料全体から強い発光が観察され、燃料内で激しく燃焼が開始したことが確認できた。その後、 $P_c$  は急激にいったん低下し(図7中④)、その後、激しく噴出物が排出されながら定常的に  $P_{O_2}$  が持続的に行われ、推力を発生していると推測できる。

本研究では、推力係数  $C_f$  を1および適正膨張と仮定し、ノズルスロート断面積  $A_t$  と  $P_c$  から推力  $F$  を推定すると、最大10kN有ることがわかった。

以上のように、着火から燃焼の過程が安全に実施できるロケット燃焼システムを構築できた。

確実な着火を可能にする点火システムを確立するために、コイルの電圧と抵抗および赤熱の関係の検討を行った。その結果、ロケットの着火に必要な電圧計算式を試案することができた。

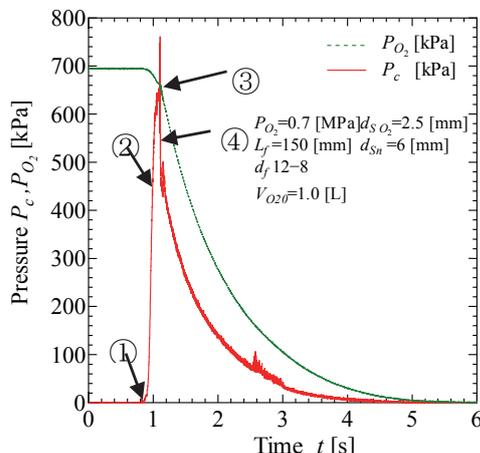


図7 ロケット圧力履歴

#### (4) ロケットの飛翔試験

提案するペットボトル・ハイブリッド・ロケットが安全に打上かつ飛翔可能かを検討した。図8にその様子を示す。その結果、射角80°に設定し打ち上げたところ、直線で40m前後の距離を安全に弾道飛行可能であることが確認できた。



図8 ハイブリッド・ロケットの飛翔実験

#### (5) 中学生を対象として教材ハイブリッド・ロケットの評価

埼玉県熊谷市で2015年12月9日に、愛媛県松山市で2015年1月10日および2016年1月9日に中学生を対象にし、本研究で提案するペットボトル・ハイブリッド・ロケットを用いた理科教室を実施した。授業内容は、中学の教科書の単元に関連させたロケットの説明の座学、生徒によるロケットの組立、そして生徒自身で組み立てたロケットの模擬打上実験である。組み立ての様子を図9および10に、理科教室での打ち上げの様子図11および12に示す。その際に調査した中学生のアンケート結果を図13および14を示す。本ハイブリッド・ロケットは、中学生はもとより教員からも教材としての高い評価を与えることができた。



図9 ロケットの組立 (埼玉)

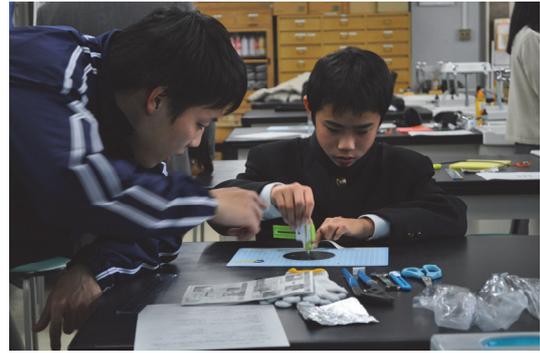


図10 ロケットの組立 (愛媛)

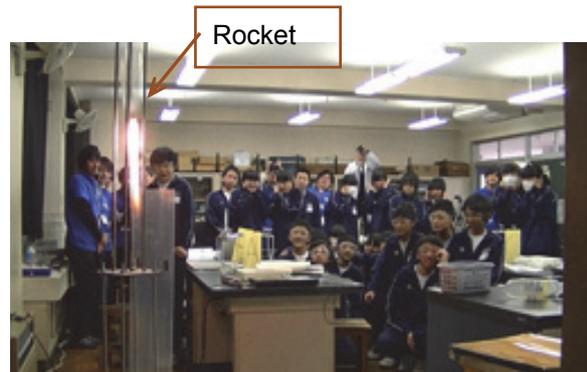


図11 ロケットの打ち上げ (埼玉)

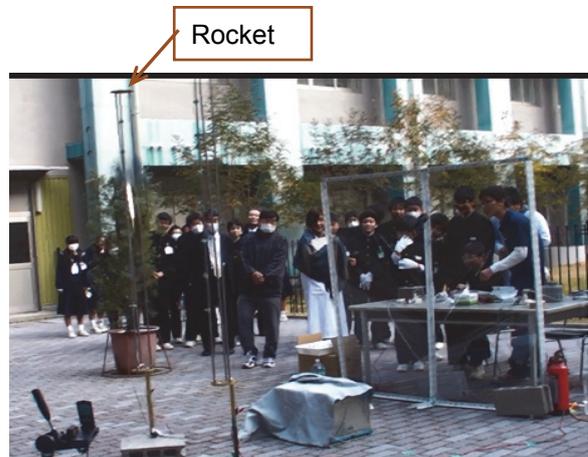


図12 ロケットの打ち上げ (愛媛)

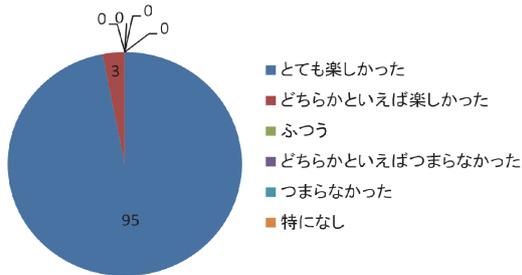


図13 理科授業のアンケート（熊谷）

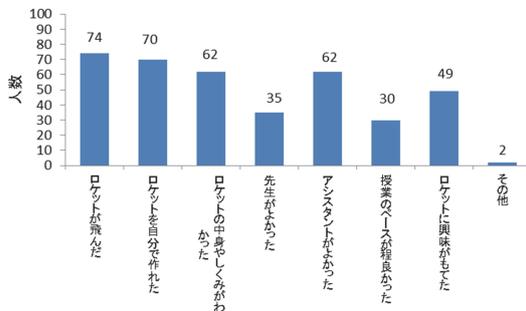


図14 理科授業のアンケート（熊谷）

#### (6)今後の展望

本教材は、技術科単元のエネルギーの変換の教育教材の利用をはじめ、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、点火装置で電気回路教育等の分野で実践的な教育に発展させることが期待でき、中学校や高等学校での授業外課外活動等でも使用できる。

したがって、本ロケットは実践的な教材として応用範囲が広く、その教育的意義も大きいと言える。

さらにセンサー付きハイブリッド・ロケットに発展させることにより、より実践的な理科・技術科教材として利用が可能で、理科離れが進む生徒に対して有効な教材と成り得ることが考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) 石原 敦, 百瀬 貴暁, 伊倉 良明, 中原 真也, 新井 健, 公立中学校・理科連携

授業における教材ロボットの利用, 日本ロボット学会, Vol.33, No.8, pp.613-622 (2015). [査読有]  
DOI:10.7210/jrsj.33.613

〔学会発表〕（計 11 件）

- (1) Atsushi Ishihara, Takaaki Momose, Zhang TianWen, Brian Teoh Kai Shen, Masaya Nakahara, and Kenji Arai, Utilization of Hybrid Rocket as an Educational Material for Science Classes in a Public Junior High School, The Sixth Edition of the International Conference “New Perspectives in Science Education”, 16 - 17 March 2016( Florence, Italy).
- (2) 晩田光貴, 鎌田暁, 三宅正紘, 中原真也, 阿部文明, 石原敦, 小型ハイブリッド・ロケットの性能に与える燃料形状の影響に関する基礎的研究, 日本機械学会, 中国四国支部第 54 期総会講演会, (2016), 愛媛大学 (愛媛・松山)
- (3) 百瀬貴暁, 張天文, 石原敦, 鎌田暁, 三宅正紘, 中原真也, 公立中学校理科連携授業におけるハイブリッド・ロケットの利用, 理科教育学会第 54 回関東支部, (2015), 茨城大学 (茨城・水戸).
- (4) 百瀬貴暁, 張天文, 石原敦, 鎌田暁, 三宅正紘, 中原真也, 公立中学校連携授業におけるハイブリッド・ロケットの利用, 埼玉工業大学第 13 回若手研究フォーラム(2015), 埼玉工業大学 (埼玉・深谷).
- (5) 三宅正紘, 中原真也, 鎌田暁, 晩田光貴, 阿部文明, 石原敦, 教材用ハイブリッド・ロケットシステムの開発に関する研究, 第 53 回燃焼シンポジウム, (2015), つくば国際会議場(茨城・つくば).
- (6) 辻角信男, 石原敦, 百瀬貴暁, N<sub>2</sub>O/ポリエチレンハイブリッドロケットの研究, 第 53 回燃焼シンポジウム, (2015), つくば国際会議場(茨城・つくば).
- (7) 百瀬貴暁, 伊倉良明, 石原敦, 中原真也, 鎌田暁, 新井健二, 公立中学・理科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, 第 53 回関東支部大会, 研究発表要旨集, p.97(2014), 群馬大学 (群馬・前橋).
- (8) 鎌田暁, 中原真也, 阿部文明, 渡邊竜也, 三宅正紘, 石原敦, 教材用ハイブリッド・ロケットシステムの開発に関する基礎的研究, 第 52 回燃焼シンポジウム 178-179(2014), 岡山コンベンションセンター (岡山・岡山).
- (9) 辻角信男, 石原敦, 百瀬貴暁, N<sub>2</sub>O/ポリエチレンハイブリッドロケットの研究, 第 52 回燃焼シンポジウム, pp.560-561(2014), 岡山コンベンションセンター (岡山・岡山).
- (10) 鎌田暁, 中原真也, 阿部文明, 石原敦, 教材用ペットボトル・ハイブリッド・ロ

ケットの基礎研究, 日本理科教育学会,  
第 54 回全国大会, p.420(2014), 愛媛大  
学 (愛媛・松山).

- (11) 辻角信男, 石原敦, 中川慎理, N<sub>2</sub>O/ポリ  
エチレンハイブリッドロケットの研究,  
第 51 回燃焼シンポジウム, pp.472- 473  
(2013), 大田区産業プラザ(東京・太田).

[図書] (計 2 件)

- (1) 萩原時雄, 皆川圭祐, 萩原隆明, 石原敦  
他 16 名, 埼玉工業大学出版会, 新・工  
学部って面白い, (2016), pp.27-38.  
(2) 石原敦, 中原真也, 技術評論社, ファー  
ストブック「熱力学がわかる」, (2013),  
189.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- (1) 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: 特願 2015-117843  
出願年月日: 平成 27 年 5 月 25 日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

- (1) 名称: ペットボトルハイブリッドモデル  
ロケット  
発明者: 石原 敦  
権利者: 石原 敦  
種類: 特許  
番号: 特許第 5326136 号  
取得年月日: 平成 25 年 8 月 2 日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

石原 敦 (ISHIHARA, Atsushi)  
埼玉工業大学・工学部機械工学科・教授  
研究者番号: 50245247

(2)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

(3)連携研究者

なし