

ハイブリッドエンジンを用いたモデルロケットの実験

兵庫県立洲本高等学校
谷川 智康

1. 研究の背景と目的

1-1 洲本高校科学技術部

洲本高校は 1897年（明治30年）に旧制洲本中学として設置され、創立123年目を迎える兵庫県下屈指の伝統校である。「至誠、勤勉、自治、親和」が校訓である。制服が自由化されていたり、校則を必要最小限のものにとどめ制定していたりと自由な校風と昭和28年センバツ高校野球で優勝した野球部を中心に部活動が大変盛んで文武両道が特徴である。進学においても毎年60 名前後の生徒が国公立大学に合格しており、卒業生の大多数が大学に進学する。

洲本高校科学技術部は現在、男子13名で活動を行なっている。2018年度よりロケットをテーマにした研究に取り組んできた。特に2018年度後半から2019年度前半にかけて、風洞実験装置を作成し、抗力係数が少ないロケットの機体開発に取り組んできた。ノーズコーン（機体先端部）や羽根の形状・枚数について100種類以上の組み合わせについて実験を繰り返し、抗力係数が低い機体開発に成功した。この研究成果を各種コンテストで発表し、第11回坊ちゃん科学賞科学論文コンテスト「入賞」、第68回日本学生科学賞兵庫県コンクール「神戸商工会議所会頭賞」および第43回 兵庫県高等学校総合文化祭 自然科学部門発表会「パネル発表優秀賞」を受賞するなど高い評価をいただいた。

ロケットに取り組んで以来、黒色火薬を用いた固体燃料ロケットで打ち上げてきた。これまでの風洞実験により開発した機体も黒色火薬を用い総推力160N・s であるG型

エンジンを用いて打ち上げる予定であった。しかし、欧米でしか生産されていないG型エンジンの輸入環境が東京オリンピックを控えたテロ対策で厳しくなっていた上に新型コロナウイルス禍により輸入は不可能となったので、自分たちでエンジンを作成することを考えた。火薬を用いたエンジンを私たちが作成することは法令上できないので、大学のサークル等で研究されているハイブリッドエンジンロケット（図1）に目をつけた。市販のハイブリッドエンジンはプラスチック樹脂など高分子化合物が燃料に用いられるが、私たちは小説「ロケットボーイズ」（写真1）に記載があるキャンディロケットに興味を持ち、砂糖をはじめとする身近な食品を燃料にすることを考えた¹⁾。

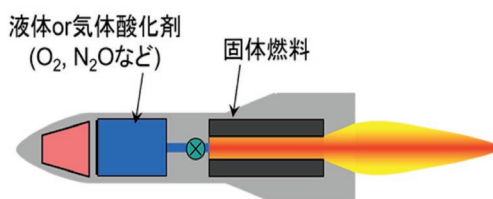


図1 ハイブリッドロケットの構造

参考サイト⁴⁾より引用

1-2 ハイブリッドロケットとは

従来のロケットは燃料の種類から、液体燃料ロケットと固体燃料ロケットの2種類に大別される。

液体燃料ロケットは燃料の液体水素に、酸化剤の液体酸素を加え燃焼させて、莫大な推進力を得る。欠点としては構造が複雑であること、故障が起こると爆発する危険



写真1 小説「ロケットボーイズ」単行本

性があること、打ち上げに多額のコストがかかることなどが挙げられる。一方、固体燃料ロケットは構造的にはシンプルだが、火薬の塊なので、危険性が高いこと、保管するためのコストがかかることなどが欠点として挙げられる。

これら2つのロケットの欠点を補う形で考案されたのがハイブリッドエンジンロケットである。ハイブリッドエンジンロケットは、燃料として合成樹脂を用い、酸化剤に液体酸素などを用いている。液体燃料ロケットに比べて構造が簡単で自作に向いている。また、合成樹脂や液体の酸化剤はそれぞれ単体では爆発する危険性がないため、安全性も高く、保管も容易である。さらに、有害物質を排出しないという利点もある。

1-3 参考にした先行研究

本研究の動機となったのは次の3点である。

(1) 小説「ロケットボーイズ」

1999年に出版されたこの小説はNASAのエンジニア、ホーマー・ヒッカム・ジュニアの自伝的小説である。高校生の際にスペースシャトル1号の打ち上げ成功に刺激され、幾多の困難に見舞われながらも自分たちの手でロケットを打ち上げようとする青春小説である。主人公たちがロケットを作る中で、シュガーロケットを作成する場面があり台

所にある砂糖と硝酸カリウムを材料に燃料を調合し上空2000mに到達するロケットを作成する場面がある。普段、私たちが口にしている砂糖がロケットエンジンの材料になり得ることに大きな興味を覚えた¹⁾。

(2) キャンディロケット

UHA味覚糖、秋田大学、和歌山大学、及び国立天文台チリ観測所が合同でCandy Rocket Projectを立ち上げた^{2) 3)}。研究の末、開発されたCandy Rocketは全長1800mm、直径150mm、重量は10kgであった。2015年3月ソフトキャンディ「ぷっちょ」20個を燃料として使ったハイブリッドロケット「Candy Rocket」を高度248mまで打ち上げることに成功した。図2はその打ち上げの様子である。(1)のシュガーロケット同様に普段、お菓子として口にしているものがロケットの燃料となる事を知り、研究の大きな動機となった。



図2 キャンディロケットエンジンの原理と打ち上げの様子

参考サイト²⁾より引用

(3) ペットボトル・ハイブリッド・ロケット

液体ロケットよりは簡単なシステムで打ち上げることができるハイブリッドロケットであるが、一般に地上の打ち上げシステム一式を購入すると100万円程度の出費を要し、経済的には高校生の部活動としては過大な負担である。埼玉工業大学工学部・石原敦教授及び愛媛大学工学部・中原真也教授らは2005年気体酸素を酸化剤とし、PLA（ポリ乳酸）樹脂を燃料として飛行するハイブリッドロケット“ペットボトル・ハイブリッド・ロケット（以下PHR）”を児童生徒向けの教育用に開発した^{4) 5)}。

PHRは、ペットボトルやナイロンチューブなど身の回り品を材料として作ることが出来る。またPLA樹脂は、3Dプリンターを使って自分たちの手で燃料棒に成型することができるので、技術的にも予算的にも高校生の研究として非常に適当である(図3)。PLA樹脂の燃料を私たちのオリジナル燃料（ショ糖やデンプン）に置き換えることによってPHRを飛ばすことができないか模索することにした。これら3点の先行研究を元にハイブリッドエンジンの開発に着手した。

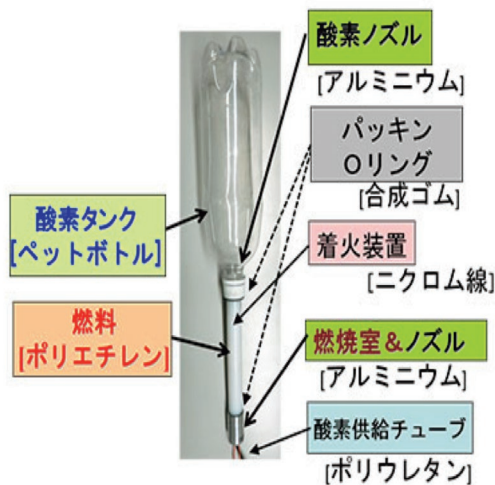


図3 ペットボトル・ハイブリッド・ロケット
参考サイト⁵⁾より引用

2. 実験

2-1 実験装置

最終的にはPHRの形で飛行させるが、ロケットとしての飛行時の形ではなく、燃料の燃焼圧力測定用に図2に示す装置を中心としてガス配管パーツや木材を用いて自作した。実験装置の全体図を図4、中心部分拡大図を図5に示す。図4で、点線は酸素

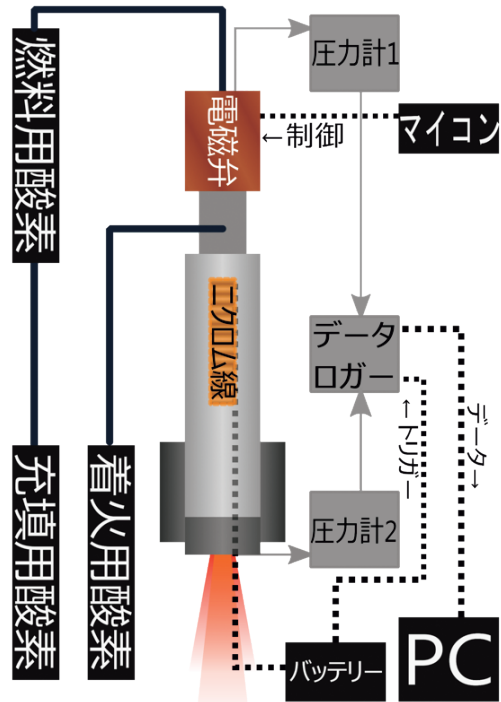


図4 実験装置全体図

の流路、実線は回路の配線を表している。酸素ポンベより酸化剤である純酸素をペットボトルに所定の圧力で充填する。ペットボトルと燃料をつなぐ酸素ノズルの部分は燃焼実験専用ホームセンターで購入できる流体管用のパーツを用いて作成した。

酸化剤として圧縮された純酸素を用いるため、大型の酸素ポンベを用意した。酸素タンクはPHRと同じく炭酸飲料用の500ml及び1Lペットボトルを用いた。燃料は3Dプリンターによって竹輪状にPLA樹脂やABS

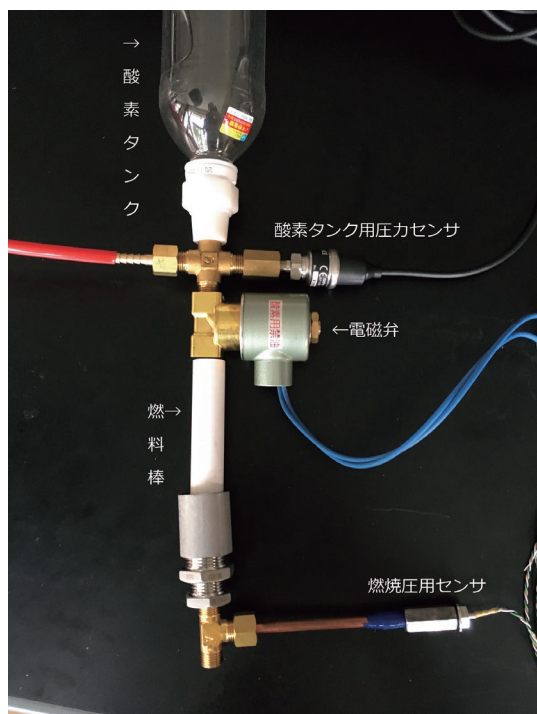


図5 中心部分拡大
実験装置の中心部分。現在は燃料棒の上に酸素注入口をもう一つ追加し点火用酸素を供給している。

樹脂を成型した上、ねじ切りタップ、ダイスを用いてネジ溝を作り配管パーツに固定できる様にした（図6）。また酸化剤としての圧縮純酸素とは別に、燃料点火用に微量の酸素を本番の燃焼前に送れるように配管してある。

燃料の点火は、まずイグナイタのニクロム線にバイク用のバッテリーで12Vの電圧をかけると直ちに発火する。ある程度燃え広がった数秒後に電磁弁を開け数気圧の圧縮純酸素を一気に送り込み燃料を激しく燃焼させる。イグナイタはワセリンを染みこませた綿球を紙ウエスで包み、それにニクロム線を巻き付けて作った。センサの値は1ミリ秒間隔でデータロガーに記録している。センサは酸素タンクの圧力を記録するものと、燃焼室の圧力を測定するものと2

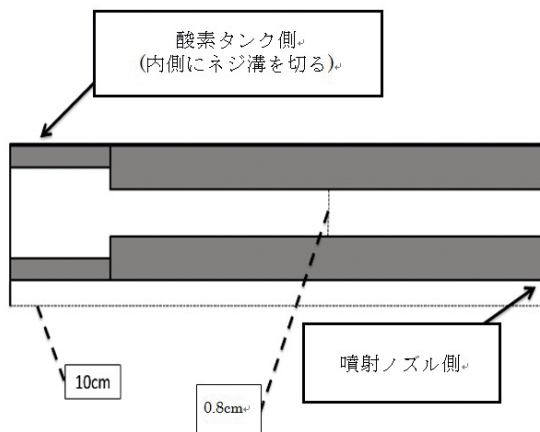


図6 燃料棒の形状

パーツ名	型番
圧力センサ1 (酸素タンク用)	キーエンスAP13V
圧力センサ2 (燃焼圧力用)	東京測器研究所 PWFD-PB
データロガー	キーエンス NR500+NRHA08
電磁弁	甲南電機 YS301AF8809BD7

表1 実験装置の詳細

つ用意した（表1）。

燃焼実験のシーケンスは以下の通りである。

- ①酸素ボンベから数気圧の酸素を酸素タンク（ペットボトル）へ送る。
- ②一旦、充填した酸素を全て排出する。
- ③タンク内の酸素濃度を上げるため①②の操作を3回繰り返す。
- ④3回目の充填が終わった後で引火用の酸素を低圧で燃料に送り込む。
- ⑤ニクロム線に通電し、3秒後に電磁弁を開放し圧縮純酸素を燃料に送り本燃焼させる（図7）。
- ⑥燃焼室の圧力変化をデータロガー経由でパソコンに記録する。

燃料は燃焼前と燃焼後に質量を計測し、消費された燃料質量を記録する。

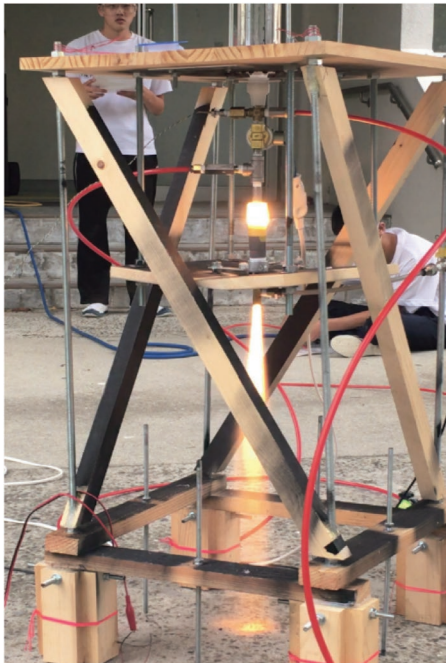


図7 燃焼実験の様子
燃料が赤熱し、燃焼ガスが勢いよく噴射されている。

2-2 予備実験

装置の妥当性を検討するために3DプリンターでPLA及びABS燃料を作成し、燃焼実験を行った。作成した燃料は直径2cm、長さ10cmである。図6のように中央の直径8mmの穴に、イグナイタを挿入し点火させる。この穴の中が燃焼室となる。

・予備実験の結果

図8は燃焼試験の結果を示すグラフであるが、私たちが圧力センサーによって求めた結果は圧力である。まず燃料の燃焼によって得られた推力を求める。一般にロケット燃料の総推力 $F(N \cdot s)$ は次で求められる。

$$F = P_c \cdot A_t \cdot C_f \dots \textcircled{1}$$

ここで P_c は燃焼室内圧力(pa)、 A_t はノズルスロート断面積(m^2)、 C_f は推力係数である。

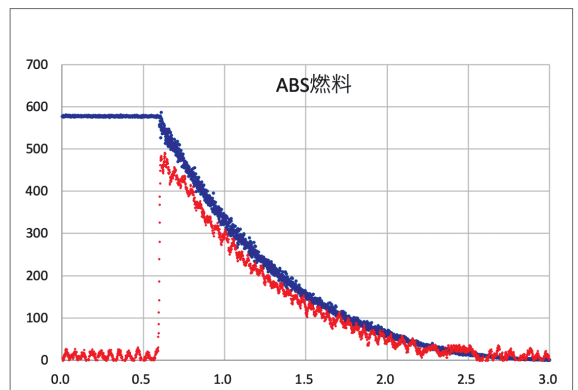
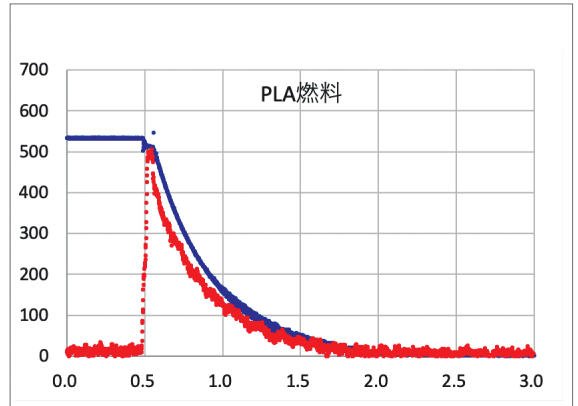


図8 PLA及びABS燃料の燃焼圧力
横軸は時間(s)、縦軸は酸素タンク内圧力と燃焼室圧力を示す(単位kPa)、赤線が燃焼室圧力、青線が酸素タンク内圧力である。

A_t はノズルの直径が6mmなので $2.8 \times 10^{-5} m^2$ 、また C_f については中原先生らの検証より $C_f = 1$ として計算した⁶⁾。ABS燃料では $8.94 N \cdot s$ 、PLA燃料では $5.04 N \cdot s$ となった。また燃焼後の質量変化は、表2の通りである。

先行研究と同様の結果を得る事ができた

ので、私たちの実験装置と計測方法については妥当であると判断した。

	燃焼前 (g)	燃焼後 (g)	差 (g)
PLA	43.80	42.23	1.57
ABS	41.30	38.99	2.31

表 2 各燃料の質量の変化

2-3 本実験

私たちのオリジナル燃料の素材は糖を想定しているので、単糖類、二糖類、多糖類の3つについて燃焼実験を行うことにした。それぞれ単糖類としてグルコース（ブドウ糖）、二糖類としてスクロース（ショ糖）及びアミロース（デンプン）を用いることにした。燃料となる糖は粉末なので、燃料として使える形に成型しないとイケない。糖を一旦、水に溶かし練り固めたものを内径20mmの塩ビパイプに詰め、ABSでキャップを作成し燃料の形とした（写真2）。

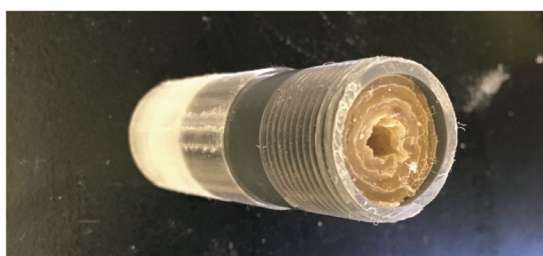


写真 2 オリジナル燃料の外観

・本実験の結果

3種類の糖の燃焼試験を行ったが、残念ながら単糖類については点火に失敗するなどして燃焼圧力データを得る事ができなかった。そこで、図9は二糖類、多糖類のオリジナル

燃料の実験結果を示す。①式を用いて総推力を求めると、スクロースは8.29N・s、アミロースは2.07N・sだった。

燃焼後の質量変化は、表3の通りである。

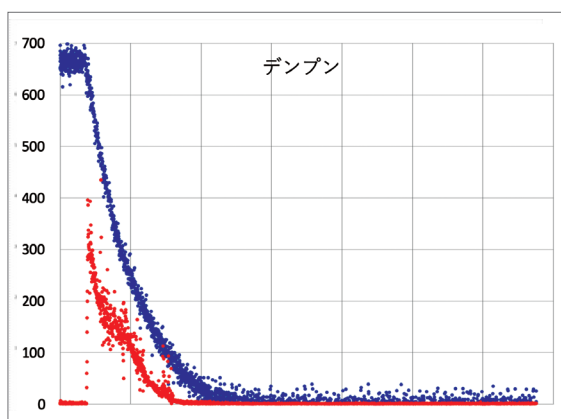
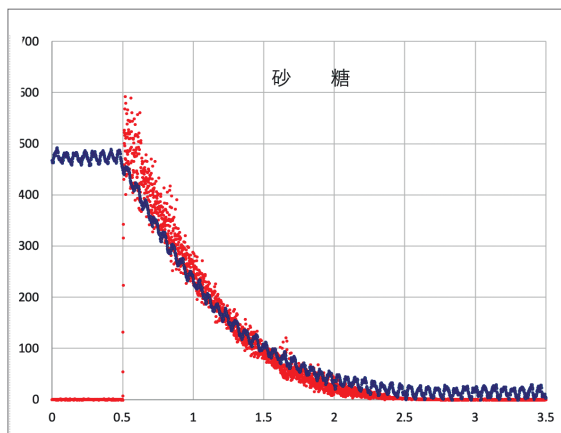


図9 砂糖（二糖類）及びデンプン（多糖類）の燃焼圧力
（横軸、縦軸については図8と同様のグラフである）

	燃焼前 (g)	燃焼後 (g)	差 (g)
二糖	65.65	62.65	3.00
多糖	56.92	48.08	8.84

表 3 各燃料の質量の変化

3. 考 察

燃料の性能を評価する指標に燃料後退速度 v (g/s)がある。これは単位時間あたりの燃料の質量流量であり次式で求める事ができる。

$$v = \frac{m_0 - m_1}{t} \dots \textcircled{2}$$

ただし m_0 : 燃焼前の燃料の質量 (g), m_1 : 燃焼後の燃料の質量 (g), t : 燃焼時間 (s)である。

②式より計算すると、今回の実験で用いた燃料の燃料後退速度 v (g/s)は表4のようになる。

燃 料	燃料後退速度 (g/s)
PLA	1.05
ABS	1.16
スクロール	1.71
アミロース	11.79

表4 各燃料の燃料後退速度

この結果から総推力は小さかったがアミロースの燃料後退速度が極端に大きく燃えやすい燃料である事がわかる。

今回求めることができたデータをまとめると、総推力と燃焼質量流量の相関図は図10のようになった。このグラフで右上にあるデータほど、燃焼しやすく、総推力も大きい高性能な燃料であるといえる。

アミロースについては燃焼した質量が大きいにも関わらず、総推力があまり出なかった。この原因には2つの可能性が考えられる。1つ目は、単純にアミロースの単位質量あたりに得られるエネルギーが小さいのではないかとこの可能性、2つ目は、アミロースの燃焼

で得られたエネルギーが熱エネルギーや音エネルギーなど、圧力と関係のないエネルギーに変換され、結果として単位質量当たりのアミロースが生み出す推力が小さくなった、すなわちアミロースのエネルギー変換効率が悪いのではないかという可能性である。今回の実験では原因の特定まではいかなかった。

ロケットをより高く飛ばすためにより重要となるのは総推力なので、現段階では、オリジナル燃料のうちより優秀なのは二糖類のスクロールであるといえる。

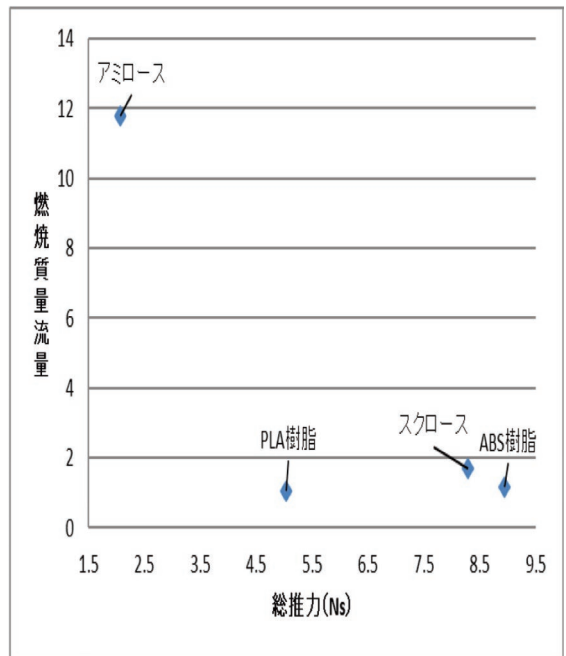


図10 総推力と燃焼質量流量の相関図

横軸は総推力 (Ns)、縦軸は燃焼質量流量を示す。

4. 今後の課題

今回の実験では、オリジナル燃料の材料として二糖類のスクロールと多糖類のアミロースを用いたが、単糖類などのその他の糖類を用いることで、結果が変わると考えられる。今後の実験では、これらを用いた燃料を作成

・実験し、比較していきたい。もちろん、現時点で原因を特定できていないアミロースの総推力の低さについても実験を重ね、原因を特定したいと考えている。

また、燃料棒の形成方法についても、今回は1パターンしかできていないので、実験中に思いついた以下の方法で作成した燃料棒でも実験を行い、データを比べていきたい。

(1) 寒天による製法

寒天は海藻を材料として作られる糖類の一種であり、寒天自身が燃料となり得る。燃料としたい糖を寒天とまぜ温水に溶かした後、トレーに薄く広げて冷ます。ゲル状になった燃料を約2日間自然乾燥しシート状にする。シート状になった燃料を円筒状に丸め内径2cmの塩ビパイプに詰める。3Dプリンターで作ったPLAのキャップをし、ねじ穴を切り図1のような形状の燃料にする。

(2) 圧縮機による製法

粉末の糖を内径2cm塩ビパイプに詰めた上で油圧式の圧縮機により約1トンの力をかけ個体状に固める。(1)同様にPLAのキャップをつけ燃料の形にする。

(3) 煮込み製法

水飴を作る要領で、フライパンで糖を煮込む。ある程度粘り気が出て半固体状になったところで塩ビパイプに流し込み、燃料の形にする。

5. 本研究の教育的効果

背景にも述べたが洲本高校科学技術部は2年前に研究テーマにモデルロケットを取り入れて以来、入部者も増え、非常に活動が活発化してきた。さらに生徒の成長につながる活動にするため、本研究を取り入れた。

研究のスタート時期である2020年4月にコロナの感染拡大防止のための長期休校という事態になってしまった。自宅学習を余

儀なくされたのと同様、部活動も停滞する状況であったが、オリジナル燃料の開発に大きな期待を寄せていた部員たちはLINEで連絡を取り合い、新入部員勧誘のための部活紹介ビデオを完成させた。

また、学校再開後は愛媛大学工学部・中原真也先生、福岡大学工学部・川端洋先生からリモート講義を受けて基礎勉強を行った。その他、各種情報や知見をネットを使って積極的に収集する事ができた。

また、先生方から指導を受けた事柄をそのまま模倣するのではなく、自分の実態に合うようしっかり咀嚼し、実験台の作成やオリジナル燃料の製法を編み出して行った。このように生徒たちのモチベーションが上がることによって、自主性が身に付いた。

非常に高校生にとっては高度な研究内容であるので、自分たちの能力ではカバーしきれない部分を研究者の先生方に自分たちで相談し、学習できる研究上のコミュニケーション能力を身につけさせたいと考えている。

謝辞

本研究は公益財団法人下中記念財団の助成を得て遂行する事ができました。また実験の実施にあたっては愛媛大学工学部・中原真也先生、埼玉工業大学工学部・石原敦先生、福岡大学・川端洋先生、株式会社うちゅう代表・八島京平先生より有益な助言をいただきました。この場をお借りし、心より御礼申し上げます。

【参考文献・サイト】

- 1) ホーマー・ヒッカム・ジュニア「ロケットボーイズ」草思社 1999年
- 2) UHA味覚糖「Candy Rocket Project」
<https://www.uha-mikakuto.co.jp/candyrocket>
- 3) 和田豊 et al, 「Candy Rocket用ハイブリッドロケット推進器の開発」(第59回宇宙科学技術連合講演会講演集) 日本航空宇宙学会 2015年
- 4) 国立大学56工学系学部ホームページ「ペットボトル・ハイブリッド・ロケット (PHR) を作ってみよう！」
<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/170203.php>
- 5) A.Ishihara et al., “A Hybrid Rocket for Usual Science Classes in Public Junior High School” 2017. The 31st International Symposium on Space Technology and Science
- 6) 石原敦「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」(科研費研究成果報告書) 2019年



谷川 智康先生
(たにがわ ともやす)

<略歴>

- 1962年 兵庫県生まれ
- 1986年 北海道大学理学部数学科 卒業
兵庫県立小野工業高等学校 勤務
- 1992年 西宮市立西宮西高等学校 勤務
- 1995年 神戸大学大学院 理学研究科
(惑星科学専攻) 修了
- 1998年 兵庫県立尼崎高等学校 勤務
- 2001年 兵庫県立有馬高等学校 勤務
- 2009年 兵庫県立三田祥雲館高等学校 勤務
- 2018年 兵庫県立洲本高等学校 勤務
現在に至る

<受賞歴>

- 2017年 兵庫県優秀部活動指導者表彰
- 2018年 兵庫県優秀教員表彰
- 2019年 第68回読売教育賞
理科教育部門 最優秀賞受賞

<研究歴>

- 2004年 アマチュア無線電波帯3周波数による流星観測 日本学術振興会
- 2007年 流星電波エコーを利用した流星速度の計測 日本学術振興会
- 2015年 インターネット望遠鏡を用いた小惑星の観測 武田科学振興財団

- 2015年 インターネット望遠鏡を用いた小惑星の観測 科学研究費助成事業
日本学術振興会
- 2016年 自作望遠鏡による小惑星測光観測
中谷医工計測技術振興財団
- 2019年 モデルロケットを用いたクラブ活動の活性化及び地域貢献活動
中谷医工計測技術振興財団

<勤務校>

兵庫県立洲本高等学校

〒656-0053 兵庫県洲本市上物部2-8-5

電話 0799-22-1550