

## 1. 研究の背景と目的

### 1-1. 洲本高校

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 125 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 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。

### 1-2. 自己紹介

私は小学 1 年生の時に見た、アポロ 11 号の月面着陸をきっかけに宇宙に興味を抱くようになった。大学では数学を専攻し高校の数学教員となるが、宇宙への夢絶ち難く、1992 年 4 月、30 歳の時に、夜間定時制高校に勤務する傍ら神戸大学大学院に入学し惑星間塵の研究に打ち込んだ。大学院修了後も自分の研究を続け学会発表や論文の執筆に勤しんだ。研究を続ける中で、世界で誰よりも早く科学的な事実を知ることが、研究の醍醐味であると強く実感するようになった。そこで、ぜひ生徒にも、この研究の魅力・楽しさを伝えたい、と考えるようになり、2000 年頃より天文普及活動に精力的に取り組みはじめた。時系列で列記すると 2001 年より有馬高校科学部で 8 年間、2009 年より三田祥雲館高校天文部で 9 年間、そして洲本高校科学技術部の顧問を 2018 年より 5 年間務めている。有馬高校と洲本高校では、活動が停滞していたクラブを宇宙への興味を引き出すことで、部活動を大いに活性化させ部員を増やし再興した。有馬高校で私が指導し、流星塵を研究した一人の女子生徒は、現在、宇宙研究開発機構（JAXA）研究員となり小惑星探査機「はやぶさ」、「はやぶさ 2」計画に携わっている。また三田祥雲館高校では天文部を創設し、小惑星の自転周期や太陽活動の観測とそのデータベースを活用した研究により、世界の研究者に向け研究成果を発信した。また、国際学会 The Asteroids, Comets, Meteors conference（ACM）2012 に出場したことを記念して学校名がついた小惑星（15552） Sandashoukan が誕生したり、2017 年度全国高等学校総合文化祭で最優秀賞を受賞したりするなど学校の活性化にも大いに貢献した。現在、勤務する洲本高校では、科学技術部でモデルロケットをテーマに設定し、部活動を大いに活性化し、本原稿の中心となるハイブリッドロケットの研究を始めた。校務分掌は現在、1 学年主任を務めている。数学の教科指導においては反転学習を取り入れるなどし、校内で ICT を用いた授業改革およびアクティブラーニングの分野において先駆的な役割を果たしてきた。

### 1-3 科学技術部について

洲本高校には以前、物理部、化学部、生物部、地学部と理科系の 4 つのクラブが存在していたが、生徒減少によるクラブの再編により科学技術部と自然科学部の 2 つの部活動にまとめられた。科学技術部は物理分野の研究テーマを中心に行ってきた。5 年前に私が着任した当時は 5 名の男子部員が在籍していたが、決まった研究テーマもなく活動は停滞していた。顧問として私は生徒に科学研究の楽しさをぜひ味わってほしいと思った。“天文”

をテーマに持ち込みたい気持ちもあったが、押しつけにならぬよう在籍する部員の気持ちを大切にしようと話し合いをもった。生徒が提案するものと、私が指導できる範囲を考慮し、天体望遠鏡作り、電波望遠鏡の作成と天体観測などが候補に上がった。天体が研究対象ではなくても宇宙は根強く生徒たちの興味を引く舞台であることを実感した。最終的には“宇宙風船”で有名な岩谷圭介さんの取り組みなどを参考に自作ロケットを高く飛ばし、上空から地上の景色を写真に撮ろう、ということになりロケットの研究がスタートした。

2018年度以降の科学技術部の活動を年度列でまとめると次のようになる。

#### 2018年度

以下の外部行事に参加した。①缶サット甲子園 2018 和歌山地方大会（7月8日）、②JAXA 第25回アジア太平洋宇宙会議水ロケット大会（国内最終審査 7月21日）、③第42回兵庫県高等学校総合文化祭 自然科学部門発表会（11月17・18日）に参加し②で特別奨励賞を、③の口頭発表（物理分野）「高高度モデルロケットの開発」で優良賞、同じくパネル発表「淡路島で宇宙に一番近い場所を目指して！」で優秀賞を受賞した。また、8月12日に洲高モデルロケット教室を開催し、小中学生20名の参加があった。

#### 2019年度

以下の外部大会に参加した。①缶サット甲子園 2019 和歌山地方大会（7月14,15日）、②日本学生科学賞 兵庫県コンクール（10月20日）、③第11回坊っちゃん科学賞科学論文コンクール、④高大連携課題研究合同発表会 at 京都大学（11月4日）、⑤第43回兵庫県高等学校総合文化祭 自然科学部門発表会（11月10日）、⑥第39回近畿高等学校総合文化祭 自然科学部門に参加し、②で神戸商工会議所会頭賞を、③で入賞、⑤でパネル発表優秀賞を受賞した。また、6月16日と8月11日にロケット教室を開催した。

#### 2020年度

以下の外部大会に参加した。①缶サット甲子園 2020 和歌山地方大会（10月3,4日）、②日本学生科学賞 兵庫県コンクール（10月17日）、③第44回兵庫県高等学校総合文化祭 自然科学部門発表会（11月8日）、④令和2年度近畿高等学校総合文化連盟自然科学部合同発表会、⑤第13回兵庫県サイエンスフェア in 兵庫、⑥日本物理学会ジュニアセッションに参加し、①で4位入賞、②で県知事賞を、③で物理分野優良賞を受賞した。

#### 2021年度

以下の外部行事に参加した。①第45回兵庫県高等学校総合文化祭 自然科学発表会（11月6,7日）、②33rd International Symposium on Space Technology and Science（第33回 宇宙技術および科学の国際シンポジウム）（2022年3月1日）に参加し①ではパネル発表最優秀賞および物理分野優良賞を受賞した。また、2月から4月にかけて、クラウドファンディング「高校生がエコで安価なロケットで宇宙を目指す！！～淡路島で一番宇宙に近い場所へ～」を展開し、研究資金を調達した。また、サンテレビ「キャッチ+」（5月26日）およびTBSテレビ「あさチャン！」（8月30日）で活動の様子が紹介された。

#### 2022年度

以下の外部行事に参加した。①日本学生科学賞 兵庫県コンクール (10 月 14 日)、②第 46 回兵庫県総合文化祭 自然科学発表部門 (11 月 5, 6 日)、③テクノ愛コンテスト 2022 (11 月 23 日)、④第 42 回近畿高等学校総合文化祭 (11 月 27 日) ⑤中谷財団 科学教育振興助成成果発表会に参加し、①で神戸商工会議所会頭賞、③で準グランプリ、④では最優秀賞、⑤では「みんなで選ぶグランプリ」を受賞した。また、第 26 回淡路文化協会文化奨励賞を受賞し、8 月 21～24 日には植松電機および北海道大学工学部で研修と燃焼実験を行った。また 9 月 10 日にはロケット教室を開催した。

## 2 研究内容

### 2-1 糖燃料の研究に至った経緯と動機

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高い評価を頂いた。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力積 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



図2 キャンディロケットエンジンの原理と打上げの様子

参考サイト[2]より引用

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、私たちが口にす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。



図1 小説「ロケットボーイズ」単行本表紙

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に目をつけた。そして次の 3 点を研究の参考にした。

#### (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 (図 1)。高校生の時にスプートニク 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

## (2) キャンディロケット

UHA 味覚糖と、秋田大学、和歌山大学、国立天文台チリ観測所が合同で Candy Rocket Project を立ち上げた。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 (図 2)。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、研究の大きな動機の一つとなった。

## (3) ペットボトルハイブリッドロケット (PHR)

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。

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対象として最適である (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。

ハイブリッドロケットは高校で研究を行っているところはなく、2020 年 1 月に徳島大学ロケットプロジェクトを見学し、基礎的なことを学ぶところから研究をスタートした。2020 年度は 4 月よりコロナ禍で 6 月半ばまで休校措置が取られていた。しかし、研究を止めず、PHR 考案者の愛媛大学 中原真也先生に ZOOM を用いた部員向けの講義を頂きハイブリッドロケットの研究活動を本格的にスタートした。学校再開後は PHR の作成と燃焼実験を開始した。PHR の基礎を学んだあとは燃料について考察を始めた。PHR は元来、燃料にポリエチレンなどの樹脂を用いている。樹脂以外に燃料として適当なものを探す中で秋田大学 (現 千葉工大) 和田 豊先生らが行ったキャンディロケットプロジェクトを知った。これを参考に食品に含まれる糖を用いたロケット燃料を開発することになった。このような経緯で 2020 年秋より廃棄食材の活用など SDGs に繋がる燃料の作成に乗り出し、燃焼実験を繰り返した。以上が糖燃料の開発にいたった経緯である。

### 2-2 活動内容と成果

#### 1 初期の研究について (2020 年 6 月~12 月)

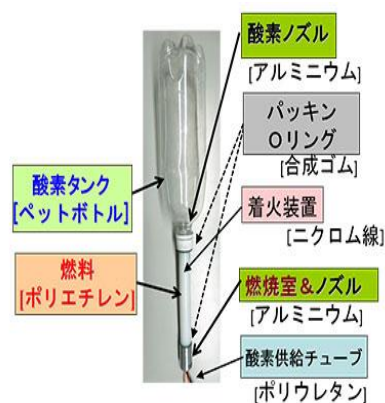
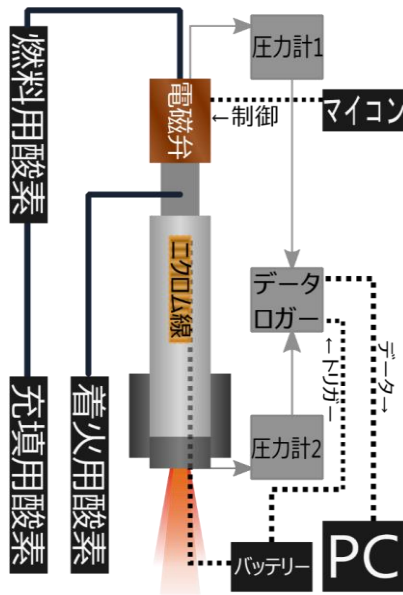


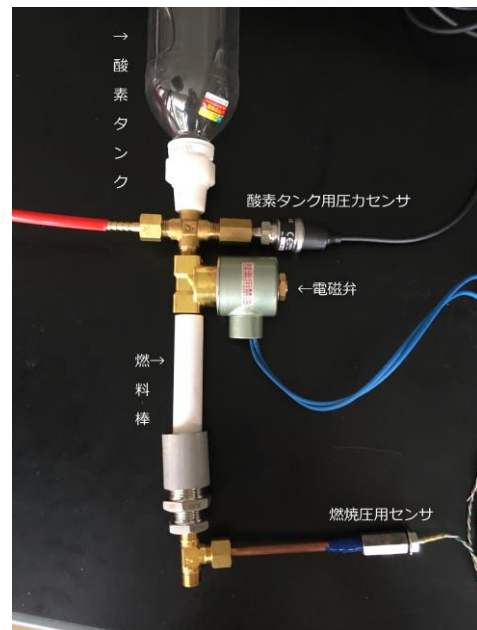
図 3 ペットボトル・ハイブリッド・ロケット (PHR) 参考サイト[5]より引用

実験を開始した 2020 年秋に用いていた実験装置の外観を図 4 に示す。図 4 の中の「充填用酸素」は 7000 リットルの酸素ボンベ、「燃料用酸素」は酸素タンクである炭酸用ペット



**図 4 実験装置全体図**  
エンジンの推力は圧力計 2 の値から求めている。

ボトルである。この間の酸素の流れは電磁弁を用いて制御している。先行研究として愛媛大学中原先生の研究はあったが、実験器具は全て一からの手作りであった。



**図 5 実験装置の中心部**  
配管パーツを組み合わせて自作している。燃料棒は糖燃料の時は塩ビパイプを利用した。



**図 6 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。

図 5 は燃焼実験の本体となるエンジン部分周辺の写真であるが、これらはホームセンターやインターネットで入手できる配管パーツを組み合わせて作成した。また燃焼台は木材を用いて部員が手作りした。

**表 1 機器一覧**

| パーツ名                | 型番                  |
|---------------------|---------------------|
| 圧力センサ 1<br>(酸素タンク用) | キーエンス AP13V         |
| 圧力センサ 2<br>(燃焼圧力用)  | 東京測器研究所 PWF0-PB     |
| データロガー              | キーエンス NR500+NRHA08  |
| 電磁弁                 | 甲南電機 YS301AF8809BD7 |

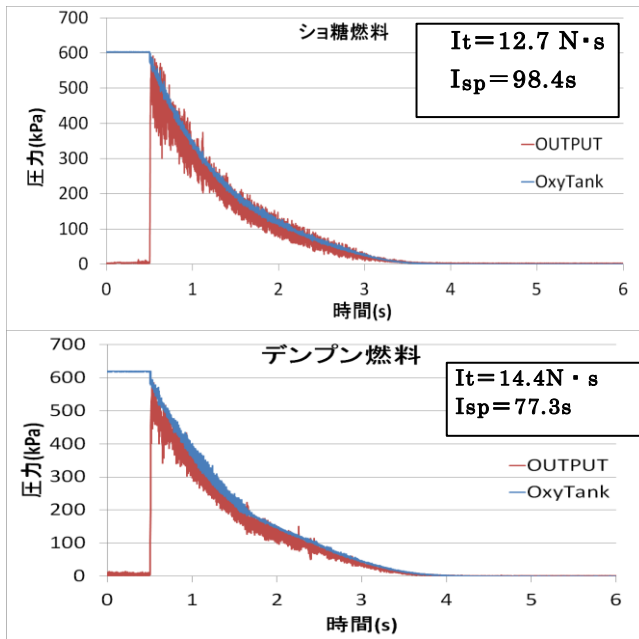


図7 各燃料の燃焼室圧力と  $I_t$  値、 $I_{sp}$  値  
 グラフは燃焼開始の 0.5 秒前からのデータで、各グラフの縦軸、横軸のスケールはそろえている。

弁を開放し圧縮純酸素を燃料に送り本燃焼させる (図 6)。

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。

一般にロケット燃料の総推力  $I_t$  (N·s) は①式で求められる。

$$I_t = P_c \cdot A_t \cdot C_f \cdots \textcircled{1}$$

ここで  $P_c$  は燃料室内圧力 (Pa)、 $A_t$  はノズルスロート断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $C_f$  は推力係数である。 $A_t$  は噴射ノズルの直径が 6mm なので、 $2.8 \times 10^{-5} \text{m}^2$ 、また  $C_f$  は噴射ノズルからのガスの流出のし易さを示す指標であり、本格的なロケットエンジンでは 1.2 程度になる。しかし、私たちが作成しているエンジンは愛媛大学工学部の中原先生らのものをモデルにしている。中原先生らの検証では  $C_f=1$  であるので、本研究では  $C_f=1$  として計算した。

推力は 1ms の時間分解能で記録しているので、エクセルによって (推力)  $\times 0.001$  秒を燃焼時間全体にわたって数値積分することによって、総推力を求めた。また、ロケットエンジンの性能を計る指標として比推力がある。比推力は単位重さ、単位時間の燃料で単位重さを何秒間空中に浮遊させ得るか、という指標である。比推力  $I_{sp}$  は②式で求められる。

$$I_{sp} = \frac{I_t}{g \Delta m} \cdots \textcircled{2}$$

$\Delta m$  は消費された燃料の質量、 $g$  は重力加速度である。各糖について燃焼実験の結果をまとめたのが次の図 7 である。図 7 より総力積  $I_t$  は 10N·s を超えており、黒色火薬の C 型燃料を

自作以外のセンサや電磁弁など、実験に用いた市販品のパーツの一覧を表 1 に示す。

燃焼実験を行っている様子が図 6 である。安全のため縦型の実験台を作成した。発生した推力はエンジン内の圧力から変換した。

燃焼実験のシーケンスは以下の通りである。

- ①酸素ポ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、充填した酸素を排出する。排出した時点で、酸素タンク内には外気圧と等しい酸素が滞留している。
- 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

上回っている。

また、ロケット燃料の性能は総力積の大きさだけでなく、比推力の大きさも重要になってくる。図 8 にその関係を示した。私たちが今まで使用してきた固体燃料についても、総推力、比推力を出し、比較の対象とした。

最後に、1円あたりに出せる総推力を各燃料で比較した。その結果が図 9 である。この図から、自作エンジンは既製品の黒色火薬と比べて非常に経済的であることがわかる。また、同じハイブリッドエンジンでも、ABS 樹脂や PLA 樹脂を用いるよりも糖類を用いるほうが、コストが低くなることも確認できる。

初期の研究成果は次のようにまとめることができる。

- (1) 糖を用いたハイブリッドロケットの燃料開発に成功した。
- (2) 現在ハイブリッドロケットエンジンとして一般に使われている ABS 樹脂と比較したところ、ショ糖を用いて作った燃料は性能面では劣るが、経済性では優れていることが分かった。

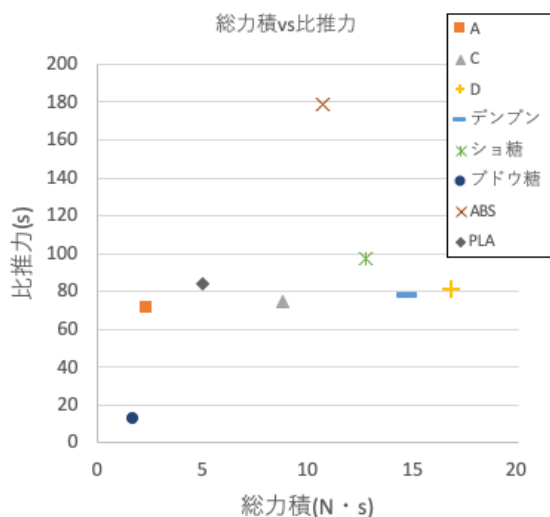


図 8 総推力と比推力の相関図

比推力は単位質量の燃料で単位質量の機体を浮遊させ得る時間を示す。右上に位置するほど、優秀な燃料である。

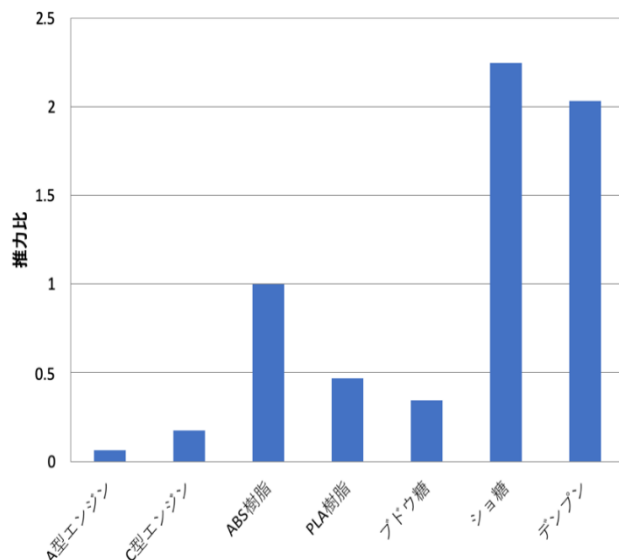


図 9 各燃料のコスト面での比較

1円あたりの ABS 樹脂燃料が生み出す出力を 1 としたときの各燃料の出力である。ショ糖は ABS 樹脂の約 2.2 倍の出力が得られる。この値が高いほど、経済的な燃料であると言える。

②大型エンジンの作成を目指して（2021年1月～8月）

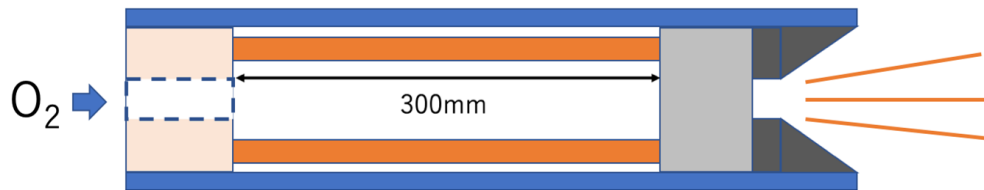
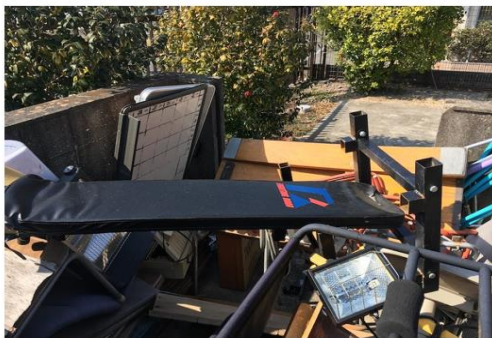


図 10 大型エンジンの概要図

青色は外径 60mm（厚さ  $t=5\text{mm}$ ）、橙色は外径 44mm  $t=2\text{mm}$ ）の亚克力パイプ、桃色はコネクタパーツ、及び灰色は邪魔板パーツである。試算では  $1.5\text{g/cm}^3$  の密度の糖で酸化剤に  $0.8\text{Mpa}$ 、 $0.3\text{L}$  の酸化剤を用いれば総力積  $200\text{N}\cdot\text{s}$  を発生させることができる。

直径  $2\text{cm}$ 、長さ  $10\text{cm}$  の塩ビパイプを用いた小型のハイブリッドロケットエンジンの開発に成功した。その後は先行研究の一つとして注目していたぷっちょロケットと同程度の総力積  $200\text{Ns}$  を超える大型エンジンの開発をしようということになった。2019年度は、研究費用は中谷医工計測技術振興財団及び下中記念財団より研究費の補助を受けた。その後も研究を継続したかったのだが、ロケットの作成、打ち上げまで考えると費用が全く足りない状況であった。2020年度、私たちの研究は助成金を受けていなかった。そこで、クラウドファンディングに挑戦しよう！ということになり、クラウドファンディングサイトを利用し、プロジェクトを立ち上げるということになった。このコロナ禍で世界中の人が大変な苦勞をしている中、いったいどれだけの方が支援してくださるだろう？と不安で一杯だったが、寄付金や広告賛助金まで含めると最終的に目標額を達成するご支援を頂くことが出来た。



捨ててあった状態



実験装置の土台にしました！

図 11 実験台の制作過程

感謝の気持ちに加えて、気持ちが引き締まる思いであった。クラウドファンディングについては顧問も経験がなかったので、これについても1から勉強し、立ち上げに漕ぎ着けた。既成の助成金に頼らず、クラウドファンディングという手段を用いて研究資金を調達したことも生徒にとっては大変良い社会勉強になった。大型エンジン開発の第1段階として、2月



末ごろから燃焼試験の実験台を作成し始めた。クラウドファンディングも立ち上げた直後で、集まる資金の総額も不透明だったので、学校のゴミ捨て場にあった、トレーニング器具を再利用することから始めた。今まで縦型実験装置で行っていた実験を、より正確に推力が測れる横型実験装置で燃焼実験を行うことができるようになった。

当初の目的は南あわじ市沼島港から、論鶴羽山を超える高度 600m 台を目指し海上へ向け発射を予定していたが、自分たちだけで、いきなり大目標に挑戦するのは危険がある、との助言を頂き、今まで打ち上げ実績のある団体や先生方の指導を仰ぐことにした。サポート陣としてお願いしたのは、以前から見学などで訪れ、指導を受けていた徳島大学ロケットプロジェクト (TRP) の松尾泰成さん、谷川琉雨太さん、原田凌汰さん、私たちの先行研究であるぷっちょロケットに関わっていた福岡大学 川端 洋先生、株式会社うちゅう 八島京平さんである。これらの先生方とは 4 月より週 2 回を目処に定期的に ZOOM を用いメンタリングを行いロケットや燃料作成の相談に乗って頂いた。また、実験をする際の安全指導もお願いした。一連の指導から打ち上げ場所と打ち上げ時期を和歌山市コスモパーク加太で 6 月半



図 12 強度テストの様子

ロケットのボディには土木工事に用いられる紙製ボイド管を採用した。打ち上げの衝撃に耐えられるか、バーベルのウエイトを置いてテストしている様子。



図 13 ロケット回収機構

最高点に達した後、マイコンの指令で扉を開け、パラシュート（ピンク色の布）を機体外へ放出する。

ばに、そして、到達目標高度についても 200m 程度と変更になった。燃料はこれまでの実験結果からブドウ糖を用いて作成することにした。ブドウ糖を少量の水と混ぜて鍋で煮て塩ビパイプの型に流し込んで作った。エンジン全体の構造は図 10 のようなイメージである。塩ビパイプからアクリル製にケースを変え、

周辺パーツは 3D プリンタを用い自作した。

エンジン開発とともにロケットの機体作成も並行して行った。機体は土木工事で型枠に用いられる紙製ボイド管（直径 132mm）を用いた。ボイド管は軽量で強度もあるためモデルロケットの機体にはよく用いられる。しかし、モデルロケットより出力が大きいハイブリッドロケットにはあまり用いられない。図 12 のように強度試験を行って安全性を確認した。

ロケットは最高高度の 200m に達した後、パラシュートを開き安全に地上へ軟着陸させる。そのため上空で最高点に達したことをセンサで感知しマイコンの制御で扉を開きパラシュートを開放させる仕組みである。その一連の制御回路は電子パーツを組み合わせて自作し

た。(図 13)

また、ロケット先端部のパーツ、ノーズコーン は巨大すぎて学校の 3D プリンターでは作れないので、淡路市の三和製作所の大型 3D プリンターで作成をお願いした。このように資金面の支援以外にも地域の方々のご協力を得てロケットの完成に漕ぎ着けた。完成したロケットは淡路島にちなんで Izanagi (イザナギ) と名付けた。(図 14)

打ち上げは 7 月 18 日を目標に頑張り機体は完成したが、期限までに肝心のエンジンの開発が間に合わず 7 月の打ち上げを断念せざるを得ない状況になった。悔しい気持ちと打ち上げ成功を期待し下さっていた支援者の皆様には申し訳ない気持ちで一杯であった。しかし、度重なる失敗にもくじけずねばり強くがんばった部員たちは大きな成長を遂げたことは大きな成果であった。



図 14 完成したロケット Izanagi と記念撮影。

### ③CAMUI 型エンジンとの出会い (2021 年 9 月～2022 年 8 月)

13 名いた 3 年生が 2021 年夏に引退したあとは 2 年生の部員がいなかったため 1 年生の 2 名だけで研究を引き継ぐことになった。クラウドファンディングを通じ知り合った北海道大学宇宙環境システム工学研究室のケンプス・ランドン先生が私達の研究活動に助言を下さるようになった。エンジンの仕様を見直す中でケンプス先生の勧めで CAMUI 型エンジンに取り組みようになった。CAMUI 型エンジンは北海道大学工学部 永田晴紀先生によって開発された燃料の形状である。略称の CAMUI は CAscaded Multistage Impinging-jet (縦列多段衝突噴流) の頭文字を取ったものである。ハイブリッドロケットのエンジンは通常は竹輪型をしているが CAMUI 型燃料は図 15 に示すように燃料モジュールを回転し、次段のモジュールに酸化剤が衝突するようにしている。このようにすることによって酸化剤が燃料に効率よくふきつけられ 燃料が燃える速度 (燃料後退速度) が向上する、という特長がある。また、エンジンケースをアクリル製からアルミ製のものに変更することにした。エンジンケースの作成は Izanagi のノーズコーンを作ってくださった三和製作所が再び無償で引き受け

てくださった。三和製作所はその後何度かエンジンケースの改良に協力をしてくださり手厚い支援を賜っている。

図 15 上段のように CAMUI 型燃料のモジュールには酸化剤を通すため 2 つの穴が開けられている。成型がしやすい事から私たちは 1PORT の燃料を用いている。穴の数が 1 つや 3 つの場合はどうなるのだろう？ということに興味を持ち、穴の数と推力の関係を研究対象とした。簡便のため本稿では通常の 2 つの穴が開いた形状の CAMUI 型燃料を 2PORT と呼ぶことにする。同様に 1 つ穴、3 つ穴のものを各々、1PORT、3PORT と呼ぶことにする（図 16）。

形状がポイントである実験になるので、高い精度での成型が容易なポリエチレン樹脂を用いる実験を行うことにした。糖燃料では精度の高い成型が難しいからである。ポリエチレンの燃焼実験には酸化剤の流量を多くする必要があり数十気圧に及ぶ酸素を取り扱うため、校内での実施は難しい。そこで安全に実験を行うため 2022 年 8 月 21 日-24 日、私たちは部員全員で北海道赤平市にある植松電機を訪れ、実験設備をお借りして実験をおこなった。2022 年 4 月に新入部員 4 名を迎え、このころは総勢 6 名で活動していた。植松電機は本業のリサイクル機器の開発のかたわら宇宙開発にも力をいれており、学生団体の燃焼実験など



図 16 CAMUI 燃料モジュール  
左から 1PORT、2PORT、3PORT 燃料

にも理解があり、非常に手厚いご協力とご指導を頂いた。植松電機で行った燃焼実験の結果を図 17 に、各項目のデータを表 2 に示す。これらが示すように通常の 2PORT の燃料が一番優秀であることが分かった。図 17 より、私たちが用いている 1PORT CAMUI を 2PORT に改良できれば 20%程度推力を向上させられることもわかった。なお、私たちが行った 1~3 の PORT 数の燃料の推力の比較はこれまで行われたことがなく、その結果自体がロケット工学の世界では新しい知見である。

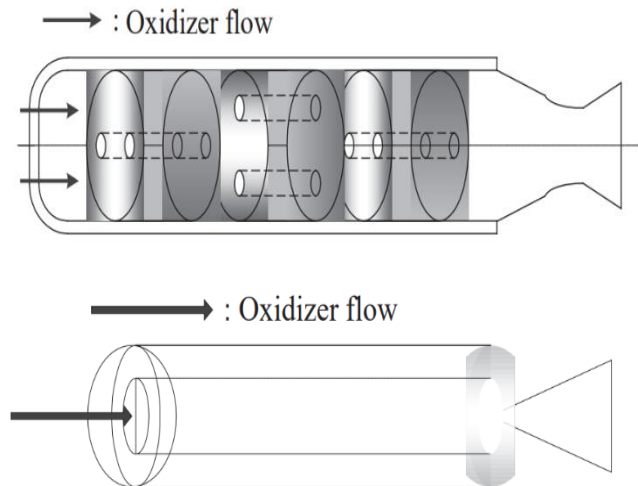


図 15 CAMUI 型（上段）と通常（下段）の燃料  
通常の竹輪型燃料は酸化剤がストレートに燃料内を流れるのに対し、CAMUI 型は酸化剤の通り道を複数段で回転させ酸化剤と燃料が衝突するしくみになっている。

にも理解があり、非常に手厚いご協力とご指導を頂いた。植松電機で行った燃焼実験の結果を図 17 に、各項目のデータを表 2 に示す。これらが示すように通常の 2PORT の燃料が一番優秀であることが分かった。図 17 より、私たちが用いている 1PORT CAMUI を 2PORT に改良できれば 20%程度推力を向上させられることもわかった。なお、私たちが行った 1~3

④大型糖燃料の完成へ（2022年8月～2022年10月）

CAMUI型燃料を取り入れても今ひとつ推力を上げることができなかった私たちは、さらに理論的な研究を進め、夏休みの終わりになってロケット工学の教科書より大きなヒントを得た。現状より大きな推力を得るために、抛り所とした理論は次のとおりである。エンジンが生み出す推力  $F$  (N) は次の③式で求められる。

$$F = \dot{m} \times C^* \times C_f \dots \textcircled{3}$$

ここで、 $\dot{m}$ は質量流量で気体酸素と燃料の単位時間あたりの合計消費量、 $C^*$ は特性排気速度でブドウ糖の場合は  $C^*=1400\text{m/s}$  と求められている。 $C_f$ は推力係数で、通常  $C_f = 1.2$ 程度でありそれ以上上げるのは難しい。すなわち③式から、質量流量 $\dot{m}$ を大きくすると、推力を上げることができることがわかる。

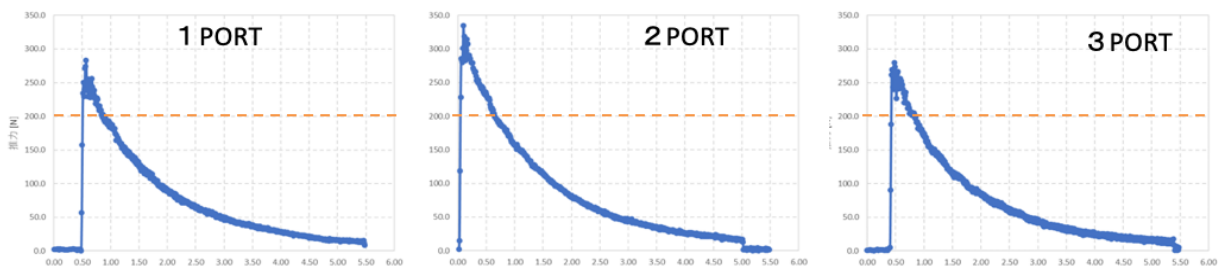


図 17 各形状の推力履歴

それぞれの、燃料形状の推力の履歴をまとめた。横軸は時間 [s]、縦軸は推力 [N] を示す。比較のため縦軸のスケールは共通にし、200N のところに点線を入れた。この結果から 1PORT と 3PORT の間には有意な差は見られず、それらより、通常用いられる 2PORT 燃料モジュールの推力が高いことがわかる。

表 2 形状の違いによる燃焼試験の諸データ

| 項目     | 単位    | 1Port   | 2Port   | 3Port   |
|--------|-------|---------|---------|---------|
| 最高出力   | [N]   | 283.0   | 334.8   | 279.7   |
| 燃料消費量  | [g]   | 81.2    | 87.5    | 75.5    |
| 作動時間   | [s]   | 3.46    | 3.46    | 3.21    |
| 総力積    | [Ns]  | 344.325 | 413.327 | 332.912 |
| 燃料後退速度 | [g/s] | 23.5    | 25.3    | 23.5    |

ブドウ糖の場合、理想的な燃焼下では、酸化剤と燃料の消費質量はほぼ等しいことがわかっている。すなわち、 $\dot{m} = 2\dot{m}_{ox}$ である。酸素タンクの圧が大気圧より十分に高い時、酸素タンクからエンジンに酸素を送るチューブの内径を  $d_{inj}$  (m) とすると次の④式が成立する。

$$\dot{m}_{ox} = \left(\frac{\pi}{4}\right) d_{inj}^2 P_{ox} \sqrt{\frac{\gamma_{ox}}{R_{ox} T_{ox}} \left(\frac{2}{\gamma_{ox}+1}\right)^{\frac{\gamma_{ox}+1}{\gamma_{ox}-1}}} \dots \textcircled{4}$$

ここで、酸素圧力 $P_{ox} = 9.0 \times 10^5$  (N/m<sup>2</sup>) , 酸素の気体定数 $R_{ox} = 260$  (J/ (kgK) ) , 温度 $T_{ox} = 300$  (K) , 酸素の比熱比  $\gamma_{ox} = 1.4$ 。私たちの現状のエンジンでは $d_{inj} = 7.5$ mmである。市販されていて、私たちが手にすることが出来るチューブ内径の上限は $d_{inj} = 13.0$ mmである。これらの理由からチューブの内径を13mmにし、最大限の酸化剤の酸素の流量を確保



図18 燃焼実験の様子  
中央のエンジンは滑走台の上に乗っており推力が発生すると前方のロードセルを押し推力が記録される仕組みである。

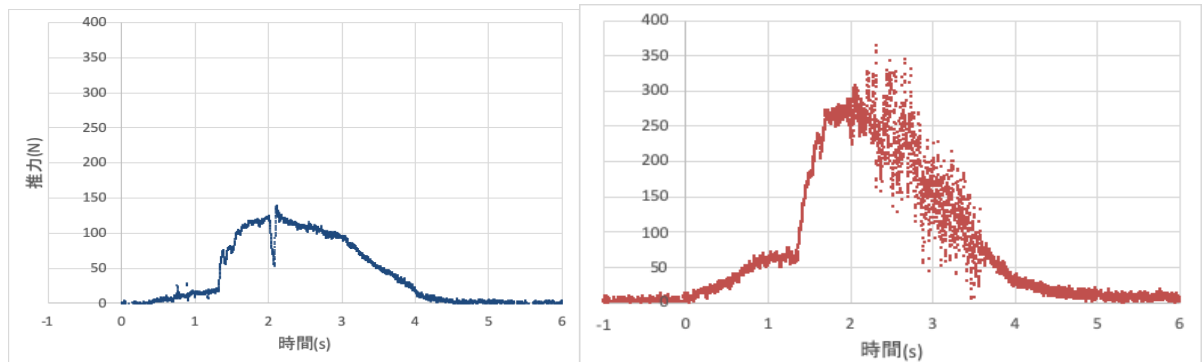


図19 燃焼実験で得られたエンジンの推力履歴  
左が $d_{inj} = 7.5$ mm (実験 A)、右が $d_{inj} = 13.0$ mm (実験 B) の推力履歴である。比較のため縦軸のスケールは揃えてある。酸素を送り込むチューブの直径を7.5mmから13.0mmに拡大することによって、理論式通り約3倍の推力をもつエンジンの開発に成功した。

実験動画のリンク

実験 A



実験 B



<https://youtu.be/62XqgLziehs>

[https://youtu.be/9aKH4V4xg\\_s](https://youtu.be/9aKH4V4xg_s)

して燃焼実験を行った。③、④式によると3倍程度推力の向上が期待できる。そこで、私たちは「酸素供給口のチューブの内径を7.5mmから13mmにすることによって推力は3倍上

げることが出来る」という仮説をたて、燃焼実験を行った。チューブの内径 7.5mm の場合を実験 A、13mm の場合を実験 B とする。その結果を図 19 および表 3 に示す。これらの実験の様子は動画に記録した。

表 3 実験により得られた諸データ

|        | 7.5mm    | 13mm     |
|--------|----------|----------|
| 最高出力   | 138 N    | 364N     |
| 燃料消費量  | 127g     | 184g     |
| 燃焼時間   | 2.3s     | 3s       |
| 総力積    | 240 Ns   | 560 Ns   |
| 燃料後退速度 | 55.2 g/s | 61.3 g/s |

図 19 に示すように酸素供給のチューブ内径を 13mm に広げることによって総力積 560Ns、最大推力 364N のエンジンを開発することに成功した。ロケットの飛行シミュレーションソフト OPEN ROCKET によれば 3kg の機体を 641m の高度まで打ち上げられることがわかった。3 年がかりでやっと十分な推力をもったエンジンの完成にこぎつけることが出来た。

この実験は 1 PORT 型の CAMUI 燃料を用い実験を行っている。図 17 に示すように燃料モジュールの形状を 2PORT にすれば、さらに推力を 20%程度向上させることができる。現在、2PORT 燃料を安定して燃焼させることが出来るように研究を進めている。なお一点、注意だが私たちの実験装置と植松電機の実験装置の仕様や酸化剤の圧力の違いにより、図 17 と図 19 の結果について、単純な比較は出来ない。

### 3 まとめ

#### 3-1 科学的意義

##### ○糖燃料の実用化

この研究の成果の一つとして燃料の成型方法の確立があげられる。今まであまり注目されることのなかった糖燃料に光を当てることができた。私たちが先行研究の一つとしたぷちゅロケットではキャンディをそのまま燃料にしたものである。私たちは粉末の糖を溶かして成型しロケット燃料とすることに成功した。これは廃棄食品から粉末の形で取り出した糖が、ロケット燃料として使えることを示唆している。燃料の材質に着目し成型方法を確立した点で新規性がある研究である。

##### ○CAMUI 型燃料の形状の研究

私たちが CAMUI 型燃料に出会った当時から気になっていた疑問である PORT 数の違いによる実験はこれまで行われたことがなかった。図 17 の結果はロケット工学の分野では新規の知見となる。

2022年3月に国際学会「第33回宇宙技術および科学の国際シンポジウム（ISTS）」において英語で発表し、専門家からも、私たちの研究はロケット燃料の素材およびロケット燃料の形式の開発という2点において、大変意義深いものであるという指摘をいただいた。

### 3-2 教育的意義

私たちの取り組みは高校生のグループがハイブリッドロケットの燃料開発に挑んだ珍しいものである。このような研究を実現させたのは、大学生のグループでも希である。卒業していった生徒達も含め大変な達成感を味わうことができたプロジェクトである。

一般にロケットの開発には失敗がつきものである。失敗の度に生徒たちは原因をつきとめその対策を相談し解決してきた。周りの教員達からも「良くもまあ、嫌にならないで続けられますね」と声をかけられた。科学技術部でロケット研究に関わり多くの失敗を経験し乗り越えていくことで、生徒達は人としての成長を遂げることができた。

また、この研究では化学や数学で学んだ知識をフルに活用してする場面が多くあった。理数系教科のみならず、2022年3月のISTSでは、エントリーのための英語論文の執筆や本番の口頭発表、質疑も全て英語でやりとりすることで英語力を鍛えた。この研究はまさに全ての教科を横断したSTEAM教育の実践である。さらにクラウドファンディングでの資金調達や返礼品の準備の交渉、支援者への謝辞をまとめるなど、社会と広く関わる機会が多く、社会性も身につけることができた。

2022年4月に卒業した、昨年度の3年生のうち2名が大学でもハイブリッドロケットの研究に携わっている。現役の部員たちも大学の先生方との交流や、8月の北海道での実験を通して、専門の技術者の方々の仕事内容に触れ、自分の進路を決めた者もいる。このように生徒のキャリア感の育成にも貢献できた。

科学技術部の活動を経ての感想文を卒業した生徒の分も含め紹介する。

#### ○ロケット研究を開始した当時の生徒

2018年度からロケットをテーマに持ち込むことによって部活は部員全員が共通の目標を持つことにより協力することができ、協調性等が生まれました。自分自身がこの2年間、部長を務めることによりクラブ活動を通して、リーダーシップを執れるようになりました。また、部員全員に気を配ることで、周りを見る力がつきました。何回かの研究発表会やロケット教室のプレゼンテーションを経験して、人に分かりやすい資料をつくる力が身に付きました。これらのコミュニケーション能力が身に付き、人の前で話す事が苦手ではなくなりました。部活動でこれらの力がついたことが大きな収穫だと思います。

#### ○クラウドファンディングを実施した当時の生徒1

私はこのプロジェクトを通して試行錯誤する楽しさを学びました。私はこのプロジェクトが始まって以来、燃料開発に携わってきました。最初は何の知識もない状態だったので手探りで燃料の作製をしては何度も失敗をしました。その度に「どうすれば上手くいくのか」、「どうすれば成功するのか」を考え細かな目標を立て制作に取り組んできました。その改良で実験が上手くいったときはとても嬉しかったです。また、この部活動を通して、論文の書き方、プレゼンテーションの作り方、スケジュールの組み立てなど社会に出て使える実践的な技能も学ぶことができました。最初何の知識もないまま入った部活ですが、自分たちでロケットを設計して最後にはオリジナルの燃料を作るというとても貴重な体験をすることができました。今後は、この経験を生かして、自分の将来の目標に向かって進んでいきます。

と思います。最後になりましたが、僕たちの実験を支えてくださった皆様、本当にありがとうございました。

### ○クラウドファンディングを実施した当時の生徒 2

僕は洲本高校科学技術部に入ってロケットの知識はもちろんのこと社会に出て必要な1人それぞれの力では出来ないけれど複数で協力してひとつの事を最初から最後まで成し遂げる達成感を学びました。1年生の時はロケットなんてテレビで打ち上げを見た事があるぐらいの何の知識もないところからスタートし、先輩、顧問の先生、大学の方々からご指導を頂こうちに自分たちでインターネットの先行研究や図書によって1から調べ少しずつですが出来る範囲が広がっていきました。僕は3年間を通して主に減速機構と広報を担当させてもらいました。初めは簡単なパラシュートでさえ上手く開くことが出来ませんでした。3年には引退イベントのパラシュートを設計し落下実験では上手く開くことに成功しました。3年間の努力が無事実り嬉しく思いました。引退してからは受験勉強に専念していくこととなります。部活で培ったひとつのことに集中し周りとは協力して最後までやり遂げる力を受験だけでなく社会に出てからも活かしていきたいと思っています。

### ○現役部員 1

私は宇宙が大好きなので、宇宙に関係する部活動に所属したいと思い、入部を決意しました。この部活は、生徒主体となっており、物事を進めており、毎日が新しい発見です。もちろん分からないこともたくさんあり、部員全員でたくさんの考えを出し合い、解決策を見つけています。1人1人がしっかり意見をもつことと、1人では諦めてしまいそうなことでも、部員で励まし合い、協力し合うことの大切さ、仲間の大切さを学びました。まだまだ勉強することはたくさんありますが、いろんな企業や大学も支援をしてくださったり、市と協力をしてロケット教室を開いたり貴重な体験をしています。私たち自身の技術を向上させるために研究を繰り返し、成長していきたいと思っています。

### ○現役部員 2

私が科学技術部に入部した4月には、先輩方によるハイブリッドロケットの開発がすでに進行していました。入部して間もない私には、どのパーツがどうなっているのかなど、わからないことだらけでしたし、できる作業も少なかったです。そんな私に先輩方は優しく接してくださり、丁寧な説明をしてくださりました。その説明を受けていくにつれ、ロケットや作業について理解していき、ロケットを制作してきた先輩方の功績の大きさを実感しました。また、その技術を受け継いでいかななくてはならないということも同時に実感し、部活動により一層真剣になることができました。

今現在、私たち一年は先輩方が設計したものをベースとして、さらなる製作、改良に取り組んでいます。二人ということもあり、大変なところもありますが、先輩方の意思を継ぎ、活動に取り組んでいます。必ずや先輩方の思いを乗せたロケットを、目標高度まで到達させて見せます。これからも、応援よろしくお願ひします。



この論文は、私の洲本高校での実践を中心に、既に発表した報告書や論文に基づいて、ハイブリッドロケット燃料開発の軌跡をまとめたものである。この20年以上天文教育やロケット教育に携わりある一定の成果を上げることができた。楽しいことばかりでなく、むしろ苦しいことの方が多くあったが、走り続けることが出来た原動力は私自身が「楽しみながら未知を求めてきたこと」の一言につきる。私自身が好奇心をエネルギーの源に行動し、生徒を巻き込み、引き込んでいくうちに結果として様々な成果がついてきたということである。未知を求める心が私に根付いたのは30歳を過ぎて大学院生となり、研究生活をした経験が大きい。彗星、小惑星の研究を行ううちに誰よりも早く未知の解明にたどり着く楽しさを感じたからである。やはり、科学研究の源である好奇心は実際に本格的な研究を経験しないと発芽しない、と感じる。長年、部活動を通じ生徒と研究を楽しんできた教員生活は終わりに近づいたがこれまでの経験で得てきた知見を今後も生徒たちや社会のために少しでも還元できるように努力していきたい。

## 謝 辞

本研究は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次の先生方に大変お世話になりました。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、北海道大学宇宙環境システム研究室ケンプス・ランドン先生、平井翔大先生より有益な助言をいただきました。また、三和製作所、植松電機では実験機材の提供や直接のご指導を多々頂きました。この場をお借りし、心より御礼申し上げます。

## 4 参考文献、サイト

- [1] 中原真也、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, 2019, 科研費研究成果報告書 <https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-16K00974/16K00974seika.pdf>
- [2] CANDY ロケットプロジェクト <https://www.uha-mikakuto.co.jp/candyrocket/>
- [3] 第58回下中科学研究助成金取得者年報  
「ハイブリッドエンジンを用いたモデルロケットの実験」
- [4] エコロケットプロジェクト報告書 (洲本高校科学技術部)  
<https://www.hyogo-c.ed.jp/~sumoto-hs/pdf/bukatsu/211004%20kagaku.pdf>
- [5] 宇宙環境システム工学研究室 <https://mech-hm.eng.hokudai.ac.jp/~spacesystem/study.html>
- [6] 第33回宇宙技術および科学の国際シンポジウムでの発表の様子 (YouTube)  
[https://www.youtube.com/watch?v=Kou\\_Ye4bJo](https://www.youtube.com/watch?v=Kou_Ye4bJo)
- [7] ホーマーヒュッカム Jr, ロケットボーイズ 1999, 草思社
- [8] 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 2015 日本航空宇宙学会
- [9] 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 (P H R) を作ってみよう！」<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/170203.php>
- [10] A. Ishihara et al., “A Hybrid Rocket for Usual Science Classes in Public Junior High School” 2017. The 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science

[11] 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

[12] CAMPFIRE “高校生がエコで安価なロケットで宇宙を目指す！！～淡路島で一番宇宙に近い場所へ～” <https://camp-fire.jp/projects/view/377525>

<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  
1992年 西宮市立西宮西高等学校  
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  
2001年 兵庫県立有馬高等学校  
2009年 兵庫県立三田祥雲館高等学校  
2018年 兵庫県立洲本高等学校  
(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 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  
2020年ハイブリッドエンジンを用いたモデルロケットの実験 下中記念財団  
2022年燃焼効率の良いハイブリッドロケットエンジンの燃料形状の研究  
下中記念財団  
2022年自作エンジンを搭載したハイブリッドロケット作成と打上げ実験  
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