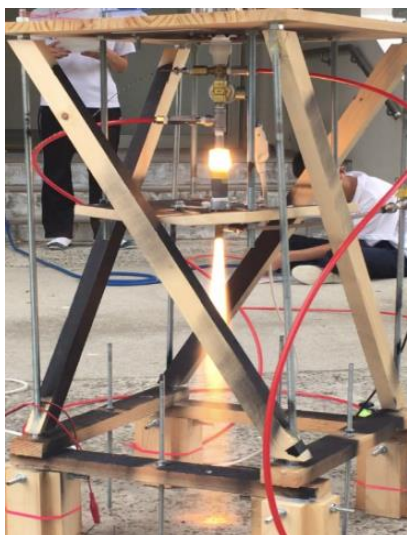


# ハイブリッドエンジンを用いたモデルロケットの実験

実施担当者 兵庫県立洲本高等学校  
主幹教諭 谷川 智康



(写真1)燃焼実験の様子

## 1 はじめに

洲本高校科学技術部は現在、男子13名で活動を行っており、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。2019年度より中谷医工計測技術振興財団より助成を受け風洞実験装置を作成し、抗力係数が小さ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、抗力係数が小さい機体の開発に成功した[1]。2020年度は昨年度の研究成果を活かした機体に取り付ける、ハイブリッドロケットのエンジンの開発に取り組むことにした。酸化剤と燃料が違う状態（気体—固体または液体—固体）であるハイブリッドの開発には多額の費用が掛かるが、愛媛大学工学部 中原真也先生らが教材用に開発したペットボトル・ハイブリッドロケット（以下、PHR）を先行研究の一つとして取り入れ、オリジナル燃料で飛ぶハイブリッドロケットを開発することにした[2]。PHRの他、小説「ロケットボーイズ」と菓子燃料とした「ぷっちょロケット」

も参考にした[3][4]。

コロナウイルス感染拡大による4月当初からの長期休業で研究の出鼻をくじかれた形になったが、休業中もSNSやZOOMを活用し生徒と顧問が相互に連絡を取り合ったり、大学の先生方から指導を受けたり、などして留まることなく研究を続けた。6月中旬の学校再開以降、実験の準備を進め夏休みにはPHRの追実験となる燃焼実験を開始するにいたった。秋以降は糖を用いたロケット燃料を作成し燃焼実験のデータをとるところまで進展させた。その成果を発表した日本学生科学賞兵庫県コンクールでは県知事賞を受賞することが出来、大きな成果をあげた。

本稿では生徒らが作成した実験結果のレポートによって研究の内容を紹介する。

## 2 実験

### 2-1 実験装置

図1は私たちが作成した実験装置である。酸素タンクはPHRと同じく炭酸飲料用の500mlペットボトルを用いた。この酸素タンクに酸素ボンベより5~8気圧で純酸素を充填させる。コネクタ類はホームセンターで手に入る、ガス配管用のパーツを用いた。燃料への点火は、まずイグナイタをニクロム線に通電することにより発火させ、ある程度燃え広がった2秒後に電磁弁を開け6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で包み、それにニクロム線を巻き付けて作った。イグナイタにバッテリーで12Vの電圧をかけると直ちに発火する。

圧力変化の確認のため圧力センサは2つ用意し、ひとつは酸素タンク(ペットボトル)内の圧力を、そしてもうひとつは燃料棒の下部に取り付け燃焼室圧の変化を計測している。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。

燃焼実験のシーケンスは以下の通りである。

- ① 酸素ポンプから所定の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。
- ④ 本点火用の充填が終わった後で配管チューブを閉じ、代わりに引火用の酸素を燃料棒に送り込む。
- ⑤ ニクロム線に通電し、2秒後に電磁弁を開放しタンク内の圧縮純酸素を燃料に送り本燃焼させる。
- 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、消費された質量を記録する。



図1 実験装置の中心部

## 2-2 燃料

燃料部分は内径 2 cmの塩ビパイプを 10 cmにカットし燃料ケースとして、中に糖を詰める形で作成した。糖は粉末なので、塩ビパイプに詰められる形に成型しないといけないため、糖 30 g に約 3 cc の水を加えて糖の粉末を練り、塩ビパイプに詰め込んで圧縮し、乾燥させることで燃料棒を作成した。燃焼実験のため、燃料棒は電磁弁のネジロに取り付ける必要がある。そこで3DプリンタでABS製のパーツを作り、ネジを切った。中に詰める糖を検討した結果、まずは純粋な糖の出力を調べるため、ブドウ糖(単糖類)、ショ糖(二糖類)、デンプン(多糖類)を用いて実験を行った。その理由は化学で学習した各糖の燃焼熱が燃料の出力の決め手になると考えたからである。結合の数が多いデンプンが最も出力が高く、次いでショ糖、ブドウ糖の順になると仮説を立て実験を進めた。

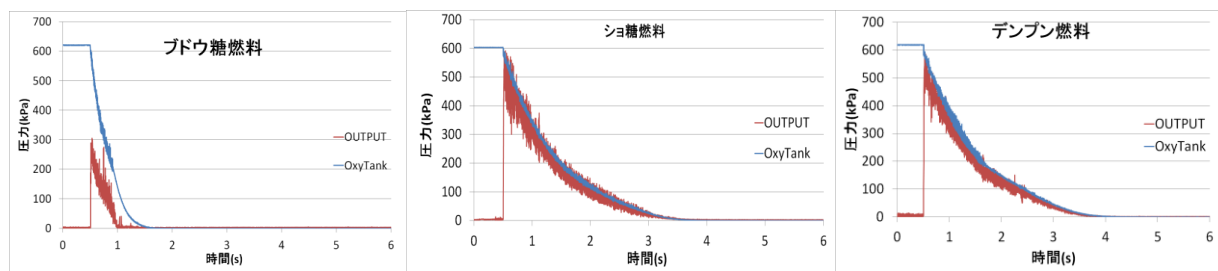


図2 各燃料の燃焼圧の変化

横軸はイグナイタ点火の0.5秒前を起点とした時間(s)であり、縦軸はセンサで記録した圧力(kPa)である。青い線は酸素タンク内の圧力の変化で、電磁弁を開くと同時に減少を始めている。赤い線は燃焼圧の変化で、点火とともに急な立ち上がりを見せている。各グラフの縦軸、横軸のスケールはそろえている。

## 2-3 実験結果

現在のところ計44回の燃焼実験を行った。燃焼の際に燃料棒が破損したり、圧力の漏れが起きたりし、満足のいくデータを取るのに苦労した。最終的に、それぞれの糖類で最もうまくデータが取得できたものを解析の対象とした。それらの燃焼圧の変化を図2に示す。赤い線が燃焼圧で着火の瞬間から鋭く立ち上がり圧力が発生していることがわかる。

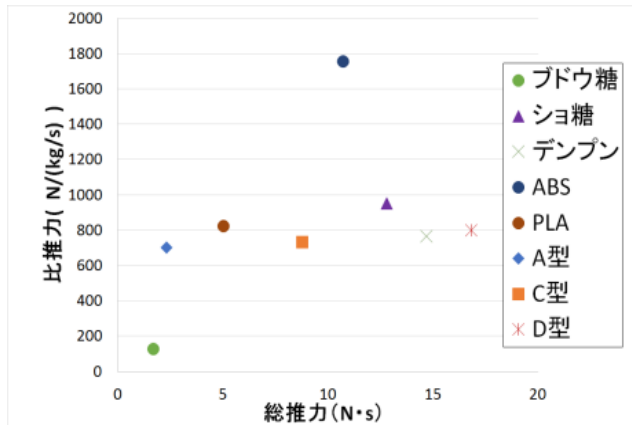


図3 総推力と比推力の相関図

この図で上に位置するほど、優秀な燃料であるといえる。工学単位系では、比推力は秒で表され、単位質量の燃料で単位出力を出し続ける時間を意味する。

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 $C_f=1$ であることから、本研究では $C_f=1$ として計算した[5]。

総推力を求めた結果、ブドウ糖は $1.82\text{ N}\cdot\text{s}$ 、ショ糖では $12.7\text{ N}\cdot\text{s}$ 、デンプンでは $14.4\text{ N}\cdot\text{s}$ となり、デンプンの値が最も大きいという結果になった。ブドウ糖については繰り返し実験を行ったが、ブドウ糖自体がかなり燃えにくく、完全燃焼しなかった。その結果として総推力が低くなったと考えている。

### 3 考察

一般にモデルロケットの飛行によく用いられ、市販されているエステス社の黒色火薬の総推力 $I_t$ はA型で $2.5\text{ N}\cdot\text{s}$ 、C型で $10\text{ N}\cdot\text{s}$ である。デンプン、ショ糖については黒色火薬エンジンを上回るものが作成できた。上記の結果より、総推力による比較ではデンプンが最も優秀だというデータが得られた。では、果たして総推力がよいエンジンが最も性能のいいエンジンだと結論づけていいのだろうか。たとえ燃料の総推力が大きくても、その推力を出すために多くの燃料や酸化剤を積みねばならないとなると、その燃料は、ロケットの燃料としてはあまり適さないことになる。エンジンの性能を表す指標として最も重要なものは比推力である[6]。比推力は単位質量、単位時間の燃料でどれだけの推力を得られるかという指標である。短い時間で多くの燃料を燃やし大きな推力を発生させると、ガスの噴射速度が高まり、効率よく高高度にロケットを上げることができる。比推力が大きければ大きいほど、ロケットのエンジンの単位時間当たりの推力が大きいといえ、より優秀なエンジンであるといえる。比推力 $I_{sp}$  (N/(kg/s))は、SI単位系では次の②のように推力を単位時間当たりに消費される燃料と酸化剤の質量で割ることで得られる。

$$I_{sp} = \frac{\bar{I}_t}{\bar{\Delta m}} \dots \textcircled{2}$$

ここで、 $\bar{I}_t$ は平均推力(N)、 $\bar{\Delta m}$ は平均推進剤質量流量(kg/s)である。それぞれの燃料について比推力を出し、総推力と合わせて相関図にし、比較した(図3)。同様にして、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。図3からもわかる通り、ショ糖、デンプンの自作燃料は固体燃料の総推力を上回っている。しかし、一般的にハイブリッドエンジンの燃料として用いられるABS樹脂には及ばなかった。今回実験として行った三種類の糖の中では、特にショ糖の総推力が $965\text{ N}/(\text{kg}/\text{s})$ と最も大きくなったので、ショ糖が最も優秀な燃料であ

私たちが圧力センサによって求めた燃焼圧は、圧力である。まず、燃料の燃焼によって得られた総推力を求める。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。

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

ここで $P_c$ は燃料圧(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。この値が大きいくほど、燃焼全体で得られる推力が大きいくということになる。 $A_t$ 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がスムーズに流出する度合いを示す指標

ると結論付けた。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4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、ショ糖やデンプンを用いるほうが、コストが低くなることも確認できる。以上のことから、三種類の糖の中では、ショ糖を用いて作ったハイブリッド燃料がエンジンとしての性能的にも、価格の点からも、最も優秀なエンジンであるとわかった。また、ショ糖燃料と一般的にハイブリッドロケットエンジンの燃料として使われるABS樹脂とを比較すると、比推力面ではABS樹脂が圧倒的に優秀であるものの、経済性ではショ糖燃料が勝っており、総合して考えるとABS樹脂とも十分張り合えるレベルであると考えられる。

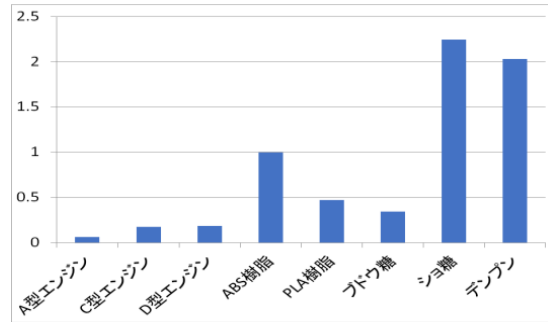


図4 各燃料のコスト面での比較

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樹脂より約2.2倍経済的である。この値が高いほど、安く推力を出せる経済的である燃料だといえる。

## 4 まとめ

- (1) ハイブリッドロケットの燃料開発のため実験装置の作成に挑戦し、成功した。
- (2) 燃焼実験をブドウ糖、ショ糖、デンプンの三種類で行い、結果を比較したところ、ショ糖、デンプンを用い黒色火薬を上回る推力を得ることができるとわかった。
- (3) 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。

本研究の成果をいかし、大型のペットボトルハイブリッドロケットを打ち上げるため現在、クラウドファンディングを立ち上げ、研究への支援を募っている。これらロケットの研究通し、授業で学んだ物理、化学、数学の知識を活かすことはもちろん、コミュニケーション力の育成など、まさに科目横断型の総合的な学習ができた。また、研究の内容的には大学初年級で学ぶレベルのものも多く含まれ、生徒の未知の分野が多く含まれているが大学の研究室等の連携をうまく生かし、そのギャップを乗り越えることができた。5月末の打ち上げ成功をめざし、今後も努力を続けて行きたい。

## 謝辞

本研究は中谷財団より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頂きました。この場をお借りし、心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 洲本高校科学技術部 「風洞実験による高高度モデルロケットの機体開発」 第11回坊ちゃん科学賞論文集, 2019, 東京理科大学
- [2] 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>
- [3] ホーマーヒュッカム Jr, ロケットボーイズ 1999, 草思社
- [4] U H A 味覚糖「Candy Rocket Project」 <https://www.uha-mikakuto.co.jp/candyrocket>
- [5] 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
- [6] 日本モデルロケット協会 手作りロケット入門 2013, 誠文堂新光社