

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実験

～ECO で安価に宇宙を目指せ！～



実施担当者 兵庫県立洲本高等学校
主幹教諭 谷川 智康

1 はじめに

私たち洲本高校科学技術部は 2019 年に本格的にハイブリッドロケットの研究開発を始めた。現在私たちはペットボトルハイブリッドロケット¹⁾及びぷっちょロケット²⁾を先行研究として、食品に含まれる糖をロケットの燃料として用いるべく試行錯誤を重ねている。糖をハイブリッドロケットの燃料とするメリットはポリエチレンなどの樹脂を用いるより、安価にエンジンを作成できること、および廃棄食品などから糖を抽出できればエコロジーに貢献できることである。2022 年度の研究課題はエンジンの推力を上げ、打ち上げ可能なエンジンの開発であった。そのために CAMUI 型エンジンの形状についての研究と酸化剤流量を変化させ、推力の変化を見る燃焼実験を重ねた。

2 推力の向上を目指して

2-1 CAMUI 型エンジンの形状の研究

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³⁾。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 型エンジンは図 1 のような燃料モジュールを回転し、穴を相互にずらすことによって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

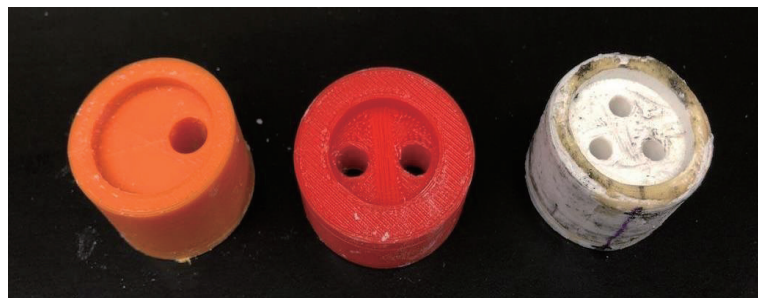


図 1 CAMUI 燃料モジュール

左から 1PORT、2PORT、3PORT 燃料。通常の CAMUI 型エンジンでは真ん中の 2PORT のものが使われている。



図2 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。

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。通常、CAMUI型エンジン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か?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。本稿では通常の2つの穴が開いた形状のCAMUI型エンジンを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1)。

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。その結果、2PORTのエンジンが他の2つの形状より20%程度推力が大きく、最も優れた形状であることを明らかにした。

2-2 酸化剤流量による変化

推力を上げるため理論的な研究を進めていた私たちは、夏休みの終わりになってロケット工学の教科書を改めて見直し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①式で求められる。

$$F = \dot{m} \times C^* \times C_f \dots \textcircled{1}$$

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①式の右辺において、質量流量 \dot{m} を大きくできれば、推力が大きくなるのがわかる。

ブドウ糖の場合、理想的な燃焼が起これば、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て $\dot{m} = 2\dot{m}_{ox}$ である。酸素タンクの圧力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②式が成立する。

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

ここで、酸素圧力 $P_{ox} = 9.0 \times 10^5$ (N/m²)、酸素の気体定数 $R_{ox} = 260$ (J/(kgK))、温度 $T_{ox} = 300$ (K)、酸素の比熱比 $\gamma_{ox} = 1.4$ である。私たちの現状のエンジンでは $d_{inj}=7.5\text{mm}$ 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 $d_{inj}=13.0\text{mm}$ 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して燃焼実験を行った。

理論通りだと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(図2)。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3および表1に示す。これらの実験の様子は動画に記録した。

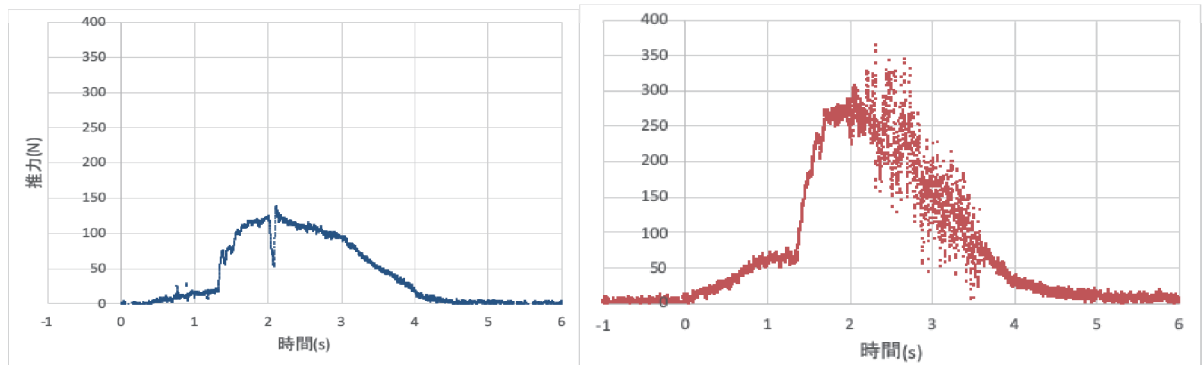


図3 燃焼実験で得られたエンジンの推力履歴

左が=7.5mm(実験A)、右が=13.0mm(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



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

実験B



https://youtu.be/9aKH4V4xg_s

表1 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3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 型エンジンをを用い実験を行っている。燃料形状の研究で明らかにした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。

今年度の研究成果を各種コンクールで発表し、高い評価を頂いた。参加したコンクールと結果を挙げておく。

- ① 日本学生科学賞 兵庫県コンクール (10月14日) 神戸商工会議所会頭賞受賞
- 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) 最優秀賞受賞
- ③ テクノ愛コンテスト2022 (11月23日) 準グランプリ受賞
- 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 (12月25日) 「みんなで選ぶグランプリ」受賞
- ⑥ 日本物理学会ジュニアセッション (3月18日)

また、5月末には日ごろの活動が評価され、第26回淡路文化協会文化奨励賞を受賞した。

また、1年間の活動を通し、各部員も成長した姿が見られた。紙面の都合で1名のみとなるが感想文を引用しておく。

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、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お考えを出し合い、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と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。

3 まとめ

本研究の成果は次の2つである。

○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っちょ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 型エンジンの形状の研究

私たちがCAMUI 型エンジン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。この結果はロケット工学の分野では新規の知見となる。

謝 辞

本研究は公益財団法人中谷医工計測技術振興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、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。

参考文献

- 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) 宇宙環境システム工学研究室 <https://mech-hm.eng.hokudai.ac.jp/~spacesystem/study.html>