

発泡ポリスチレンを中心とした廃棄プラスチックを固体燃料に用いたハイブリッドロケットの開発と教材化



実施担当者 岡山県立玉野高等学校
教諭 藤田 学

1 はじめに

玉野高校において、生徒が本研究を始めたきっかけは、昨年度、本研究に取り組んでいる生徒たちが、高校1年次で、水ロケット国際大会の予選に参加したことに始まる。この大会に参加して、ロケットを作り打ち上げることで、ワクワクした楽しい体験ができることを学ぶとともに、生徒が、ロケット自体への興味を強く抱くようになった。その後、私自身が指導していた、倉敷天城高校生徒による、ポリプロピレン製プラスチックストローを固体燃料に用いたハイブリッドロケットの打ち上げ実験を見学し、是非自分たちで、その研究を継続発展させたいと考えるようになった。生徒たちが、固体燃料に何をを用いるのが良いかと考えていたとき、一つ上の学年のクラスが、文化祭の展示物を作った際に出された大量の発泡ポリスチレンのごみに対して、当時の担任の教員が「環境に悪いごみをこんなに出して」と怒っていたことや、学校や家の近くの海で、ブイや仕掛けの浮きに使われていた発泡ポリスチレンの塊が劣化し、ボロボロになっているものを生徒自身がよく見かけていたことを思い出し、海ごみの発泡ポリスチレンを固体燃料にしたハイブリッドロケットを打ち上げ、海ごみで宇宙を目指せる技術開発が可能であることを示すことができれば、多くの方の宇宙への夢を育むと同時に、海ごみやSDGsについて考えてもらう、絶好の教育素材になると考えるようになり、本研究を始めることとなった。

2 研究方法

まず、倉敷天城高校生徒による先行研究を踏まえ、プラスチックストローの場合と同様に、図1のような方法でロケットを打ち上げることができると仮説を立てた。具体的には、ペットボトルの中に充填した、気体の酸化剤である酸素ガスが、点火

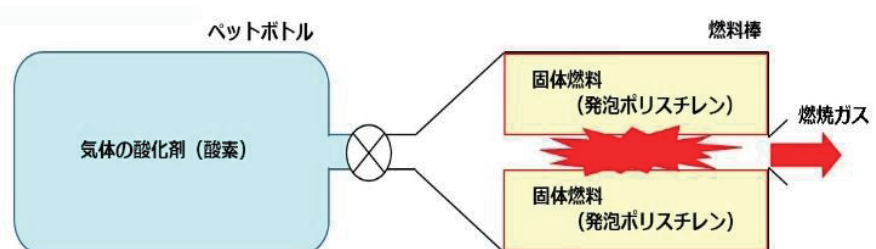


図1 開発するハイブリッドロケット模式図

と同時に、燃料棒の方へ流れ出し、それによって、燃料棒内部に充填した発泡ポリスチレンが燃焼

し、生じた高い圧力のガスが、燃料棒下端の噴出口から吹き出し、推力を得るといった仕組みである。なお、倉敷天城高校生徒による先行研究から、燃料棒には空き缶を用い、空き缶とペットボトルの接合部分には、ポリウレタンチューブを接続するニップルを利用すれば良いことが分かっていたので、そのことを利用してハイブリッドロケットを製作した。実際の打ち上げ実験では、ペットボトルに医療用酸素ガスを 0.6MPa で充填した後、充填用にニップルと接続したポリウレタンチューブに巻き付けたニクロム線に通電することで固体燃料に点火した。また、研究準備として、生徒たちは、2022年3月と4月に、瀬戸内海とつながる河口付近や島の海岸で海ごみの回収活動を行い、発泡ポリスチレンを分別した。その後、この仮説を検証するとともに、よりロケットの性能を向上させるため、次のような順序でハイブリッドロケットの開発を進めることとした。

- ① 燃料棒に用いる缶の選定。
- ② 燃料棒の形状や燃料棒内部に充填する固体燃料の最適な形状や量の決定。

なお、実験結果を明確にするため、高圧となった燃焼ガスにより、燃料棒が外れたり、燃料棒の缶側面や底面が破裂したりした場合、打ち上げ失敗とし、そのようなことが起こらず、表題下の写真のように、打ち上げ後も燃焼を続け、1m以上上昇した場合を成功と定義することとした。

3 結果と考察

3-1 燃料棒に用いる缶の選定

様々な缶を用いて製作した燃料棒による打ち上げ実験の結果を表1に示す。

缶の素材	缶の容量	充填した発泡ポリスチレンの量	打ち上げ 成功/失敗	失敗の状況
アルミニウム	390mL	10.0g	失敗	缶側面と底面の破裂
アルミニウム	285mL	8.06g	失敗	缶底面の大きな破裂
アルミニウム	100mL	3.63g	成功	—
スチール	170mL	5.05g	失敗	燃料棒接合部分の損傷による燃料棒の脱落

表1 用いた缶の素材や形状(容量)の違いによる打ち上げ実験の結果

缶の内部には、拍子木状に加工した発泡ポリスチレンを詰めて打ち上げた。拍子木状に加工した理由は、予備実験で粉末状のものを用いたときに、内圧が上がりすぎて、缶が破裂したことから、形状が大きい方が内圧が上がりすぎないのではと考えたことによる。この実験結果から、ウコン飲料のアルミニウム 100mL 缶のみ打ち上げに成功しており、これを燃料棒の容器に用いることにした。100mL 缶のみが成功した理由は、用量が小さいため、発泡ポリスチレンを充填できる量が少なく、高圧になりすぎないためではないか、また、缶の径が細いため、燃焼ガスがスムーズに流れているのではないかと考えている。

3-2 燃料棒の形状や燃料棒内部に充填する固体燃料の最適な形状や量の決定

まず、燃料棒内部に充填した固体燃料の様子を観察するために、固体燃料の形状を変化させたときの、燃料棒内部の様子をCTスキャンによって観察することにした。その結果が、図2から図4である。但し、発泡ポリスチレンはCTスキャンに写らないので、拍子木状と1cm角状のものは割り箸で、粉末状のものは砂で代用した。この画像から、固体燃料の形状が大きいものほど、隙間が大きく、燃料棒となるアルミ缶内部の容積に占める固体燃料の割合、いわゆる充填率が小さくなる

ことが分かる。そこで、測定した発泡ポリスチレンの密度と充填した固体燃料の質量から、燃料棒内部への充填率を計算し、充填率が高すぎない方が、内圧が上がりすぎず、打ち上げが成功する確率が高くなるのではないかと仮説を立てた。



図2 粉末状



図3 1 cm角



図4 拍子木状

そして、固体燃料の形状を粉末状、1 cm角、拍子木状に

して、充填率を変化させたときの打ち上げ実験の結果を表2に示す。固体燃料を粉末状にして缶に充填したときは、立てた仮説に反して、最も充填率が高かったもののみ成功している。2つの失敗例では、振ると燃料棒内部で固体燃料が動いていた。1 cm角状の形状の発泡ポリスチレンを用いて充填率を変化させたときには、粉末の場合と同様に充填率が高いものが成功した。充填率96.1%のものは噴出口が詰まっているものの、缶底面や側面の破裂もなく、燃料棒の脱落もなかった。また、53.6%のものは、振ると燃料棒内部で固体燃料が動いていた。最後に、拍子木状の形状の発泡ポリスチレンを用いて充填率を変化させたときには、粉末状や1 cm角状のものに比べて、充填率が低いものも打ち上げに成功した。ただし、いずれの充填率のものも、振っても内部で固体燃料が動くことはなかった。

固体燃料の形状	固体燃料の充填率	打ち上げ成功／失敗	失敗の状況
粉末状	81.4%	成功	—
粉末状	72.5%	失敗	燃料棒の脱落
粉末状	58.5%	失敗	燃料棒の脱落
1 cm角	96.1%	失敗	上昇しない
1 cm角	85.4%	成功	—
1 cm角	82.0%	失敗	燃料棒の脱落
1 cm角	53.6%	失敗	燃料棒の脱落
拍子木状	51.8%	成功	—
拍子木状	42.7%	失敗	缶底面の大きな破裂
拍子木状	36.8%	成功	—
拍子木状	35.4%	失敗	燃料棒の脱落

表2 固体燃料の形状や充填率の違いによる打ち上げ実験の結果

ここまでの結果から考察すると、充填率が高い方が成功率も高いことが分かった。これは、特に粉末や1 cm角の形状では充填率が低いと、燃焼の際に燃料棒内部で固体燃料が移動し、一気に燃焼が広がって内圧が高くなりすぎてしまい、失敗するのではないかと考えた。それ故、拍子木状では、固体燃料一つ一つの大きさが大きいため、充填率が低けれども、充填した固体燃料が燃料棒内部で動くことなく、燃料棒上部から下部へと順調に燃焼が進み、成功率が高くなるのではないかと考えた。次に、燃料棒とペットボトルとの



図5 着火装置

接合部分の破損による、燃料棒の脱落による失敗例が、全失敗例7例中5例と、非常に多く見受けられ、その理由は、着火のためにポリウレタンチューブにニクロム線を巻く位置と関係が深いと考えた。実際に、燃料棒が脱落した打ち上げ失敗では、いずれもポリウレタンチューブの先端から図5のように巻いた位置が約1cmだった。これを3cmの位置まで下げると、この失敗例はなくなったことから、点火位置と燃料棒脱落には強い関係があることが分かった。

3-3 環境活動としての成果発表

本研究では、海ごみとして回収した発泡ポリスチレンを、形状を加工するだけで、そのまま燃料としてロケットを打ち上げるため、図6の岡山県環境ミーティングや、全国ユース環境活動発表大会中国大会など、数多くの環境活動をテーマとした発表会で生徒が得られた成果を発表し、大きな注目を受けることができた。



図6 岡山県環境ミーティング

4 まとめ

ここまでの研究で達成できたことや分かったことをまとめると、まず、固体燃料に発泡ポリスチレンを用いたハイブリッドロケットの打ち上げに世界で初めて成功したこと、次に、燃料棒内部への充填率が高い方が打ち上げが成功すること、さらに、着火位置が接続部分に近すぎると、燃料棒の脱落が起こりやすいということである。

今後は、このハイブリッドロケットを用いて、SDGsや環境教育について学ぶことができるような教材の開発を行いたいと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり、濱田様（株式会社リバネス）、赤石様、渡部様、奈佐様（株式会社荏原製作所）より、研究指導をいただきました。また、本研究は中谷医工計測技術振興財団科学教育振興助成より支援をいただき実施しました。深く感謝申し上げます。