

バイオエタノールとエタノールロケット

茨城県 筑西市立協和中学校 1年4組 槇野 衛

1. 研究題目 バイオエタノールとエタノールロケット
2. 研究期間 2010年7月21日 ~ 2010年8月31日
3. 研究場所 自宅 茨城県筑西市
農業生物資源研究所（見学） 茨城県つくば市

4. 研究の動機

台所で「ドライイースト」の箱を見つけ、何に使うものだろうと疑問に思った。それは、パンを作るときに使う酵母であり、アルコール発酵によって発生した二酸化炭素がパンの生地をふくらませることを知った。できたアルコールは、パンが焼かれるときに蒸発してしまうので、パンを食べても酔うことはない。

高等学校生物Ⅱ（第一学習社）の単元「嫌気呼吸」によると、酵母は酸素が無い状態でも、アルコール発酵を行うことで細胞が必要とするエネルギーを生産し、生きていくことができるという。この嫌気呼吸で発生するアルコールはエタノールであり、最近「バイオエタノール」という言葉でよく耳にする物質だ。バイオエタノールは、生物資源から作られるエタノールで、石油などに代わるエネルギーのひとつとして注目されている。現在、すでに多数の国々で自動車などの燃料として利用されている。

この研究を行う動機を要約すると、以下の2点になる。

- (1) アルコールが人を酔わせるだけでなく、燃料としても有効な物質であることを確かめる。その方法として、ロケットを飛ばして確かめてみたかった。
- (2) さらに、ドライイーストを用いてアルコール発酵の様子を観察し、自分で作ったエタノールでロケットが飛ばせるかどうかを試してみたいと考えた。

5. 研究の目的

- (1) エタノールが、燃料として有効かどうかを、ロケットを作って実験する。また、そのときに、どのような条件がエタノールの燃焼に影響を与えるのかを、ロケットの飛距離を基準にして調査し、効率の良いロケットの飛ばし方を研究する。
- (2) エタノールロケットの効率の良い飛ばし方を確立したら、酵母による発酵でエタノールを作り、自分で作ったエタノールで、ロケットが飛ぶかどうかを確かめる。ロケットの飛び方で、自分が作ったエタノールを評価できるだろうか。

6. 研究の内容

本研究では、以下の3つのパートに分けて実験を進めた。

【実験1】エタノールロケットの開発

【実験2】ドライーストによるアルコール発酵

【実験3】自分で作ったエタノールで、ロケットを飛ばせるか？

【実験1】エタノールロケットの開発

アルコールが燃料として有効な物質であることを確かめるために、手軽に作れるPETボトルのロケットを用いてその特性を確かめる。

(1) ロケットの制作について

我が家の書架には、以前から古いPETボトルロケットが置いてある(図1)。水ロケットにも似ているが、構造はもっと単純で、500mlのPETボトルに段ボール紙の三角翼が3枚付けてあるだけだ。PETボトルの底には、熱した金属棒で開けたと思われる小さな穴があいている。その穴の周りはカーボンですすけており、熱噴射で推進するロケットであることがわかる。胴体には、なぜかストローが1本貼り付けてある。

このロケットは、父が勤務していた高校の生徒が作ったエタノールロケットだ。以前、「飛ばしてみたい」といったら、「中学生になるまでだめだ」と断られた。平成5年ごろ、父は発酵でアルコールができていることを示すために、アルコールセンサーを用いた授業をしていた。そして、最後のおまけにアルコールロケットを飛ばして、生徒を驚かせていたらしい。ただし、ロケットは危険なので、実演するだけで、生徒には絶対やらせなかったそうだ。

さらに10年後、父は別な高校で理数科実験講座に関わり、燃焼とエネルギーをテーマにエタノールロケットの実験を生徒自身にやらせることにした。生徒の安全を確保するために、何度も予備実験を繰り返したそうだ。そのときに最も飛んだロケットが、我が家にずっと置いてあった図1のロケットだ。しかし、当時のデータはその高校に置いてきてしまい、今は何も残っていない。そして、現在私たちの手元には中古のロケット一機以外は何もなく、一から実験をやり直す必要があった。

(2) アルコールロケットに関して確かめること

【実験1A】発射台の材質や構造はどうすればよいか？

【実験1B】噴射口の口径は、何mmがよいか？

【実験1C】PETボトルをどちら向きに飛ばしたらよいか？

【実験1D】翼は必要か？

【実験1E】アルコールの量は、どのくらいがよく飛ぶか？

【実験1F】ボトル内を換気しないと飛ばなくなるのはなぜか？



図1 10年以上前に作られたロケット（左）と，実験用具一式（右）

【実験1A】発射台の材質や構造はどうすればよいか？

学校の実験室に常備されている実験スタンドを発射台に用いることにした。実験スタンドは、重くて安定しているし、持ち運びもできる。実験スタンドから横方向に細い棒を1本出して、ロケットに貼り付けてあるストローにその棒をさせば、ハンガータイプのロケットカタパルトができあがる（図2，図3参照）。

実験1-Aは、古いロケットを用いて実験した。最初に試した針金は、わずかな「曲がり」があるために、引っかかって飛ばず、全く問題外であった。父にヒントを求めたら、「ゆらぎにくい剛性の高い棒ならエネルギーが無駄にならない。なるべく固有振動数が高いものがブレにくいだろう。」と言われたが、なんのことかよくわからない。

家の中を探して、まっすぐで硬そうな細い棒を探したが、ちょうど良い太さのものは意外に少なく、①直径3mmの竹ひごと、②自転車のスポークしかなかった。両者を比較したのが下の表である。なお、燃料を入れる前には、毎回必ず掃除機で飲み口を吸引し、ボトル内を十分に換気した。カタパルトの高さは、以後全て地上65cmで固定した。

表1 ロケット発射台に用いる細い棒について、竹ひごとスポークの比較

発射台の棒の材料	その他の条件	飛距離 [m]			
		1回目	2回目	3回目	平均値
①竹ひご 直径3mm	屋外，無風，晴れ 気温34℃，湿度45%	7.4	8.5	7.7	7.9 m
②自転車の スポーク	95%エタノール0.2ml 3枚翼の古いロケット	8.3	8.8	8.9	8.7 m

表1より、自転車のスポークを用いた方がよく飛んだ。竹ひごは噴射開始のときに上下に揺れが生じて、噴射の力が無駄になっているのが見てわかった。よって、カタパルトに用いる棒は、硬くてまっすぐでゆれにくい自転車のスポークを採用する。



図2 掃除機で換気し（左），機械式ピペットで正確に燃料を注入する（右）



図3 実験スタンドを用いた発射台（左）と，点火のしかた（右）

【実験1B】噴射口の口径は，何 mm がよいか？

同一メーカーの 500mlPET ボトルを 4 個用意し，その底面にドリルで 3 mm，4 mm，5 mm，6 mm の穴を開け，それぞれの飛距離を測定した。ドリルは切り口が荒れるので，PET ボトルが裂けやすくなるが，正確な穴の直径を出すためにはやむを得ないものとする。どの機体も同じ翼を使用したかったので，翼の取り付け・取り外しが容易なように，機体の下側に尾翼を 1 枚だけ付けた。なお，燃料を入れる前には，毎回必ず掃除機で飲み口を吸引し，ボトル内を十分に換気した。

表2 噴射口の直径 [mm] とロケットの飛距離[m]の関係

噴射口の直径 [mm]	その他の条件	飛距離 [m]			
		1回目	2回目	3回目	平均値
3	屋外，無風，曇り 気温 33℃，湿度 75% 95%エタノール 0.2ml 下側に 1 枚翼（同一部品）	7.4	5.8	5.9	6.4 m
4		7.3	7.6	7.6	7.5 m
5		7.8	8.0	8.1	8.0 m
6		6.3	7.5	7.0	6.9 m

表2より，5 mm のときに安定して良い結果を得られた。よって，以後は直径 5 mm の古いプラスドライバー（工具）を加熱して，噴射口を開けることにした。

【実験 1C】 PET ボトルを前後どちら向きに飛ばしたらよいか？

同一メーカーの 500mlPET ボトルを 2 個用意し、それぞれふたの中央と底の中央に穴をあけて噴射口を作り、飛距離を比較した。燃料を入れる前には、毎回必ず掃除機で、キャップをはずして飲み口を吸引し、ボトル内を十分に換気した。キャップに穴を開けた場合は、空気がボトル内を通り抜けないので、換気作業がやりにくかった。

表 3 噴射口の穴を、キャップにあけたときと底にあけたときの飛距離の比較

噴射口の場所 (進行方向)	その他の条件	飛距離 [m]			
		1 回目	2 回目	3 回目	平均値
キャップに穴をあけた (底が前になって飛ぶ)	屋外、無風、曇り 気温 32℃、湿度 75% 95%エタノール 0.2ml 翼の無い機体	3.2	6.3	7.3	5.6 m
底に穴をあけた (キャップを前に飛ぶ)		7.8	8.0	8.1	8.0 m

底を前にして飛ぶ PET ボトルは、直進性が悪く、回転すると飛距離が伸びない。水ロケットのような円錐形のノーズコーンを付ければ安定するが、落下するたびにつぶれて修理が大変だった。よって、噴射口は PET ボトルの底中央にあけることにした。

【実験 1D】 翼は必要か？

同一メーカーの 500mlPET ボトルを 3 個用意し、それぞれに薄い段ボールで作った翼を表 4 のように付け、それぞれの飛距の様子を観察した。なお、燃料を入れる前には、毎回必ず掃除機で飲み口を吸引し、ボトル内を十分に換気した。

表 4 翼の付け方と飛距離の関係

翼の付け方	その他の条件	飛距離 [m]			
		1 回目	2 回目	3 回目	平均値
機体の下側に 垂直に 1 枚付ける	屋外、無風、曇り 気温 30℃、湿度 85% 95%エタノール 0.2ml	7.3	8.4	8.0	7.9 m
機体の両側左右対称に 水平に 2 枚付ける		5.0	6.3	7.5	6.3 m
機体の周囲に、120° 間隔で 3 枚付ける		7.3	8.0	7.5	7.6 m

1 枚翼は噴射が止まると縦方向の回転が始まる。水平に 2 枚付けた場合はゆっくり滑空することがあった。3 枚にすれば、さらに飛行中の姿勢が安定する。しかし、翼を増やしても、重量と空気抵抗が増すためか、劇的な飛距離の増加は無い。何回も飛ばす場合には、修理のしやすさを重視して、1 枚翼でもかまわないと判断した。



図4 翼の付け方（左から、下に1枚、水平に2枚、120度間隔に3枚）

【実験1E】アルコールの量は、どのくらいがよく飛ぶか？

高精度なプッシュボタン式の可変容量型ピペットを用いて燃料を測定した。燃料注入後は30秒ほど良く振ってからカタパルトにセットして点火した。なお、燃料を入れる前には、毎回必ず掃除機で飲み口を吸引し、ボトル内を十分に換気した。

表5 エタノールの量とロケットの飛距離[m]

95%エタノールの量 [ml]	その他の条件	飛距離 [m]			
		1回目	2回目	3回目	平均
0.1	屋外 無風	3.0	2.7	0(噴射のみ)	1.9 m
0.2		6.3	7.0	7.2	6.8 m
0.4	曇り	6.6	6.0	6.0	6.2 m
0.6	気温 35℃	7.7	7.0	7.3	7.3 m
0.8	湿度 70%	5.5	4.3	5.2	5.0 m
1.0	3枚翼	4.0	5.9	7.3	5.7 m
2.0	同一機体	2.5	0(噴射せず炎のみ)	0(噴射せず炎のみ)	—

注1：表5の結果は気温が35℃の場合である。冬に行う場合は、霧吹きを用いるなど、アルコールを気化させる工夫が必要になるだろう。

表5のようにエタノールだけを多くしても、飛距離がそれに比例しない。エタノールが多すぎると噴射せず、噴射口から青白い炎が出た。エタノールを0.2mlより多くしても、飛距離が伸びないことは、ボトル内にある酸素の量と関係があると思った。

【実験1F】ボトル内を換気しないと飛ばなくなるのはなぜか？

一度飛ばした後、ボトル内の換気を忘れると、次回は燃焼せず、ロケットは飛ばない。これは燃焼に必要な酸素が無くなっているためと考えられる。そこで、表のように様々な気体をボトル内に注入して、それぞれの飛距離を比較した。

表6 ボトル内の気体とロケットの飛距離の関係（下記注も参照のこと）

番号	燃料 [ml]	実験条件 屋外，微風，晴れ，気温 32℃，湿度 55%，三枚翼の同一機体で実験した	飛距離 [m]			
			1回目	2回目	3回目	平均
1	0	換気し，窒素を一吹き注入した	*	*	*	0 m
2	0	換気し，二酸化炭素を一吹き注入した	*	*	*	0 m
3	0	換気し，酸素を一吹き注入した	*	*	*	0 m
4	0.2	換気をしなかった	8.2	*	*	—
5	0.2	換気し，窒素を一吹き注入した	3.4	4.7	3.0	3.7m
6	0.2	換気し，二酸化炭素を一吹き注入した	1.8	2.8	3.6	2.7m
7	0.2	換気の代わりに酸素を一吹き注入した	7.6	12.5	12.2	—
8	0.2	換気し，酸素を一吹き注入した	12.5	13.0	12.8	12.8m
9	0.4	換気し，酸素を一吹き注入した	12.0 !	中止	中止	—

注1：表中の*は，全く着火しなかったことを意味する。

注2：表中の!は，爆音とともにPETボトルの底が破裂したことを意味する。

注3：酸素を注入した場合は，長袖，革手袋，ゴーグル，ヘッドセットを着用した。

注4：缶入り酸素の一吹きを袋に採取し，水上置換で測定したら約95mlであった。

表6の4番のように，換気しないと2回目以降は全く着火しなかった。表6の7番と8番により，酸素があるとエタノールが良く燃焼するのがわかる。ただし，表6の3番のように，酸素だけを入れても全く燃焼しない。5番と6番では，窒素や二酸化炭素を注入したせいでボトル内の空気が押し出されてしまい，その分の酸素が減って飛距離が悪くなった。9番では，エタノールの量を倍にして酸素を注入したら，爆音とともにPETボトルの底が破裂した。9番の実験は危険なので2回目以後の試行は中断した。

以上の結果より，ロケットの推進にはアルコールの量だけでなく，ボトル内に存在する酸素の量も重要であることがわかった。4番，7番，8番のデータを比較すると，エタノールを0.2ml用いた場合，空気だけではエタノールを完全に燃焼しきれていないことがわかる。そこに酸素を一吹きすると，エタノールが完全燃焼し，逆に酸素が余るようだ。9番でさらにエタノールだけを増やすと，同じ酸素量でもより強い燃焼が起こっていることから，それがわかる。

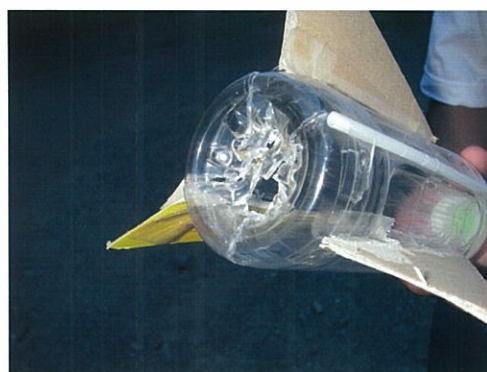


図5 各種ガスと表6用の三枚翼機（左），表の番号9では爆発で底が破れた（右）

表 7 実験用酸素ガス (99.5%) の一吹き の体積

試行回数	ビニール袋内の気体の体積 [ml]		実験用酸素 (99.5%) の一吹き の体積 [ml]
	実験用酸素を一吹き注入したとき	酸素は入れず, その他は同じ操作をしたとき (対照)	
1 回目	140	40	[ml]
2 回目	160	65	
3 回目	150	60	
平均値	150 ml	55 ml	95 ml

注：ビニール袋に採取し、その後、水上置換によりメスシリンダーで測定した。空気の混入があると思ったので、酸素を吹き込まない対照実験も行った。

【実験 2】 ドライーストによるアルコール発酵

アルコール発酵で自家製のバイオエタノールを作る。

(1) 酵母菌によるアルコール発酵について

ヒトが酸素を必要とするのは、有機物のエネルギーを取り出して使うために、好気呼吸を行っているからである。ショ糖をエネルギー源にした場合、酸素を用いて、それを水と二酸化炭素に分解する。この反応は燃焼のように一気に起こるのではなく、少しずつショ糖の持つエネルギーを取り出しながら進む。酵母菌は酸素が十分あるときは好気呼吸を行うが、酸素が無い場合でも嫌気呼吸で有機物からエネルギーを取り出すことができる。ただし、酸素が無いと有機物を完全には分解できない。ショ糖などをエネルギー源にした場合は、エタノールと二酸化炭素ができる。これをアルコール発酵といい、ビールに含まれる酔いの成分と泡が、それぞれエタノールと二酸化炭素である。

(2) ドライーストによるアルコール発酵と分留

【実験 2A】 ショ糖を用いたアルコール発酵の観察



図 6 アルコール発酵の準備 (左) と、活性酵母の顕微鏡写真 [600 倍] (右)

水 1000ml にショ糖（三温糖）50g を溶かし、さらに、塩類とアミノ酸を加えるため、かつお風味のだしを少量だけ溶かした。容器の三角フラスコの口をアルミホイルでふたをして、それを加熱して沸騰させ、全体量が 1000ml ちょうどになったところで火を止めた。ふたを取らずに一日放置し、室温（約 30℃）まで冷えたところで、ドライイースト 1 袋（約 20g）を加え、フラスコをよく振って混ぜ合わせた。

数分後には小さな泡が出始め、20 分後にはフラスコの上部が泡で満たされた。さらに十分発酵が進んだころ、酵母のサンプルを取ってプレパラートを作り、顕微鏡で観察した。図 6 の右が 600 倍の写真である。出芽をして小さな個体を付けているものも見られた。一晩発酵させた後、PET ボトルに移しかえ、ふたをして冷蔵庫中で半日静置した。すると、菌体が沈殿し、黄色みをおびた透明な上澄み液を得ることができた。

【実験 2B】 蒸留装置の組み立てと、エタノールの分留



図 7 冷却管を用いた蒸留装置（左）と、蒸溜後の液（右の三角フラスコ）

実験 2A で得た、濁りのない上澄み液を、図 7 の蒸留装置を用いて分留した。加熱を始めると、すぐに小さな泡が出始めたが、これは発酵で生じた二酸化炭素なので冷やしても液化しない。その後、80℃を超えると、冷却管内に液体を確認できたので、火加減を調節して、温度が上がりすぎないようにした。エタノールの沸点は 78.4℃だが、ガスコンロの熱気が丸底フラスコの周りを回って上にあがるため、温度計は 90℃前後で安定した。93℃を越えるようになったところで蒸溜をやめた。

1000ml の発酵液から、45ml の蒸溜液を得た。小皿に取って火をつけると、一瞬だけ青い炎が出るが、すぐ消えてしまう。エタノールの濃度が低すぎて燃えにくいようである。濃縮のため、再度蒸溜することにした。ただし、元の量が 45ml では少なすぎるので、実験 2 の現在までの操作をもう一度繰り返し、さら 40ml の一次蒸溜液を得た。これを 1 回目の蒸溜液と合わせて 85ml にし、再び蒸溜して二次蒸溜液（エタノール濃縮液）を 40ml 得た。これを皿に取って火を付けてみると、今度は青白い炎を出して燃え続けた。このエタノールは、栄養ドリンクのびんに入れて保存した。

【実験3】自分で作ったエタノールで、ロケットを飛ばせるか？

実験2Bの最後に得たエタノール濃縮液を、新たに作った改良型3枚翼機で試したところ、表8の結果を得た。実験条件は、屋外、晴れ、気温34℃、湿度45%である。

表8 アルコール発酵で作ったエタノールでロケットを飛ばせるか。

番号	作ったエタノール濃縮液[mL]	試薬 95%エタノール[mL]	95%酸素 95mL	改良型三枚翼機の飛距離[m]			
				1回目	2回目	3回目	平均
1	—	0.2	—	8.5	8.6	8.4	8.5m
2	—	0.2	有	15.5	15.7	14.9	15.4m
3	0.2	—	—	*	*	*	着火せず
4	0.2	—	有	*	*	*	着火せず
5	0.4	—	—	*	*	*	着火せず
6	0.4	—	有	*	*	*	着火せず
7	0.8	—	—	*	*	*	着火せず
8	0.8	—	有	4.3	*	0.0	—
9	1.6	—	—	*	*	*	着火せず
10	1.6	—	有	2.0	5.0	3.2	3.4m

注1：表中の*は、着火せず、噴射や青い炎が観察されなかったことを意味する。

7. 研究のまとめ

(1) エタノールロケットの改良を重ねた結果、表8の1番、2番のように、安定して飛距離を出せる機体を開発できた。新型機を図8に示した。



図8 改良新型三枚翼機

(2) 発酵で作ったエタノールと、実験用の酸素を用いて、ロケットを飛ばすことに成功した。表8の、8番と10番を比較して、濃縮液量と飛距離の関係がでたらめであるのは、着火するかどうかの結果を左右しているからである。水が混じったエタノールは燃えにくい。できればもっと濃縮したいが、濃縮のためにプロパンガスをたくさん使ったので、それだけでもエネルギーの大赤字である。いかにエネルギーを使わずに濃縮するかが、最大の課題だと分かった。今後は太陽熱の利用を考えようと思う。

(3) 今回、発酵基質としてショ糖を用いたが、人が食べられる有機物はなるべく食料にした方がよい。畑の雑草のように十分に利用されない生物資源や、食べられなくてもかまわないから、やたらと成長の早い植物を作って利用すべきだと思う。



図9 世界のソルガム各種