

ペットボトルを利用した気体発生装置の開発

—生徒が組み立てられる，安全・安価に有毒な気体を発生させて性質を調べられる装置の開発—

藤田 啓太郎

ペットボトルは飲料水用や，調味料，酒類などのプラスチック包装容器として広く普及している。ペットボトルは他の容器と比較して，「軽い」「強くて丈夫」「透明で光沢がある」「リサイクルができる」「気密性がある」が主な特長である。本研究は，これらの特長を生かし，ペットボトルを化学反応容器，とりわけ有毒な気体の発生と性質を調べるための装置として再利用するための装置の開発を行った。

[キーワード] 高等学校 化学 物質の種類と性質 無機物質 気体 反応 ペットボトル

はじめに

高等学校化学 の授業の中では，多くの化学反応が取り扱われる。これらの化学反応をより多く生徒に体験させることこそが，化学への好奇心を大きくし，より意欲的に学習させるだけでなく，座学の中で得た知識や理解を目の当たりにすることにより知識や理解のさらなる定着，系統的な理解へとつながる。

しかしながら，実験のための器具や試薬の不足，安全面への配慮から実施を見合わせる実験があることも事実である。特に有毒な気体の発生やその性質を調べる実験については，それが顕著となる。

そこで本研究では，生徒実験で安全に有毒な気体を発生させ，その性質を調べられる装置を，ペットボトルを用いて作することを目的とした。装置の作製にあたっては，

- ・材料が安価に揃えられること
- ・特殊な材料・器具は使わないこと
- ・材料が入手しやすいこと
- ・生徒自らが作成できること

についてクリアできることを目標とした。

1 ペットボトルの安全性の検証

気体発生のための反応容器であるペットボトル自体について，中で化学反応を起こさせるのに十分な安全性があるか否かについては，是非とも確認しておく必要がある。

アルコールを燃料としたペットボトルロケットの作製や，水とドライアイスを用いて炭酸水を作る実験で，容器に用いるペットボトル内部の過圧による破裂事故が報告されていることから，内部の過圧への対応については，より過圧に強いとされる炭酸飲料用のペットボトルを用いると同時に，装置の作製段階において対処することとした。

反応条件となる熱への耐性，反応の際に用いる試薬に対する耐薬品性については，次のとおりであった。

A 耐熱性 準 備

ペットボトル（炭酸飲料用，高温度帯用），三脚，セラミック付き金網，ビーカー（500 ㍥），ガスバーナー，温度計，ガスマッチ，スタンド

方 法

ビーカー内に，蓋をはずしたペットボトルを入れる。この際，ペットボトルがビーカーの内壁に接触しないようにスタンドで固定する。

ビーカー内に水を注ぎ入れ，これをガスバーナーで加熱する。水の沸騰が始まってから30分間ほど加熱を続ける。

結 果

炭酸飲料用のペットボトルは収縮し，容積が30%ほど減少した。高温帯用のペットボトルは，底部に若干の変形が見られたものの，大きな容積の変化はなかった。

考 察

ペットボトルの原料であるポリエチレンテレフタレートは，ガラス転移点が約70¹⁾であることから，原則としてそれ以上の温度での長時間の使用は避ける必要がある。

ただし，加温によるペットボトルの変形は収縮の方向へと働くので，短時間の使用であれば，100 近い温度での湯浴にも利用できる。

B 耐薬品性

準 備

ビーカー (50 ㍓)，ペットボトル片 (炭酸飲料用，1 × 3 cm)，塩酸 (濃塩酸，2 mol / ㍓)，硝酸 (濃硝酸，6 mol / ㍓)，硫酸 (濃硫酸，3 mol / ㍓)，水酸化ナトリウム水溶液 (2 mol / ㍓)，酢酸，ベンゼン，メタノール，エタノール

方 法

ビーカーに試薬を10 ㍓ほど入れ，そこにペットボトル片を浸して6時間ほど経過を観察した。

表1 ペットボトルの耐薬品性

薬品の種類		濃度	結果
無 機 試 薬	塩酸	12mol / ㍓	○
		2 mol / ㍓	○
	硝酸	15mol / ㍓	○
		3 mol / ㍓	○
	硫酸	18mol / ㍓	×
		3 mol / ㍓	○
	水酸化ナトリウム	2 mol / ㍓	○
有 機 試 薬	ベンゼン	市販品そのままを利用	○
	酢酸		○
	メタノール		○
	エタノール		○

結 果

薬品に対する耐性は表1のとおりであった。

表の結果欄において，○印は耐薬品性が認められたこと，×印は薬品に冒されたことを示す。

考 察

ペットボトル片を入れた直後からペットボトル片の周りには，溶解を示すシュリーレン現象が見られ，ペットボトル片が濃硫酸により速やかに分解されることが確認できた。図1は，濃硫酸によりペットボトル片が分解された溶液に水を加えた時の様子であり，細かく分解されてできた白い浮遊物が見られた。

ペットボトル内で化学反応を起こす際に，濃硫酸は使用できないことが明らかになった。



図1 濃硫酸によるペットボトル分解の様子

2 気体発生装置の作製

準 備

ペットボトル (容積500 ㍓，炭酸飲料用)，蛇腹付きストロー (径6mm・2本)，タレ瓶 (角形，容積5 ㍓)，釣り糸 (フロロカーボン製，長さ30cm程度)，油粘土 (10 g 程度)，ピンチコック (2個)，硬質ポリエチレンチューブ (外径5mm・内径3mm・長さ5cm程度)，ゴム管 (内径6mm・長さ5cm程度，2本)，ディスポーサブル注射器 (体積5 ㍓)，コルクボウラー (外径6mm程度)，千枚通し，カッター，はさみ，ガスバーナー，ガスマッチ

方 法

(1) 蓋の加工

蓋の2カ所に、ガスバーナーで熱したコルクボウラーを押し当て、直径6mm程度の穴を開ける。また、千枚通しで小さな穴も1カ所開ける。それぞれの穴の様子は図2のとおりである。

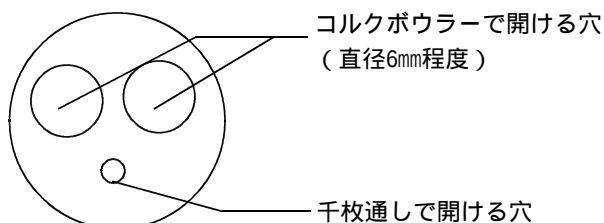


図2 蓋へ開ける穴のおおよその配置

コルクボウラーで開けた穴には色の異なるストローをそれぞれ挿入する。その際、蛇腹を挟んで長い方が蓋の下（ペットボトル内）に、短い方が蓋の上（ペットボトルの外側）に出るようにする。蓋の上側から油粘土をストローの周囲に塗りつけ、ストローの周囲の隙間を埋める。

千枚通しで開けた小さな穴は、後で釣り糸を通すためのものである。

(2) タレ瓶の加工

タレ瓶の側面および底面には千枚通しでできるだけ多くの穴を開ける。

タレ瓶の首（蓋をはめる部分）の付け根には、釣り糸を縛り付ける。

(3) 全体の組み上げ

ペットボトル容器内にタレ瓶を入れる。釣り糸の結んでいない端を蓋の内側から外側へと通してからペットボトルに蓋をする。釣り糸を通した穴についても、油粘土で密閉する。

ストローの外側にはゴム管をつけ、ゴム管の中程をピンチコック（ダブルクリップで代替可）で挟んでおく。

ゴム管の一方の先にポリエチレンチューブを差し込み、さらにこのポリエチレンチューブ

ブにディスポーサブル注射器を取り付ける。

このようにして組み上げた装置全体は図3及び図4のようになる。

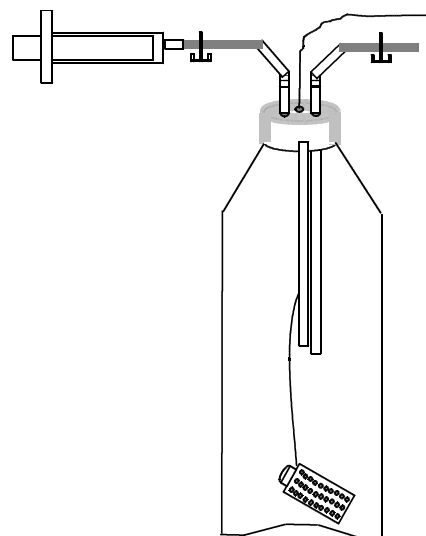


図3 気体発生装置の完成図



(A)



(B)

図4 実際に作製された気体発生装置

(A) 装置全体。試作品のため、装置内にはタレ瓶が入っていない。

(B) 蓋の拡大写真。右上の粘土は、密着させる直前の様子。紐状にした油粘土をストローに巻き付ける。

使用方法

タレ瓶には予め固形または粉末状の試薬を入れておく。固形のものについてはタレ瓶の口から入る大きさにしておく必要がある。粉末状の試薬については、直接入れることは非常に難しいので、タレ瓶には穴を開けずにカッターで側面に1面あたり4～5本の切れ込みを縦に入れ、ティッシュペーパーなどに包んだ粉末状の試薬を、この切れ込みから入れる。注射器のついていないストローからは、駒込ピペットなどを用いて液体の試薬を容器内に入れる。タレ瓶内の固形試薬と反応させるためには、液体試薬が5～10 ml ほど必要である。

反応により必要量の気体が生じたら、釣り糸を引いてタレ瓶を引き上げることにより、反応を終了させることができる。

注射器からは発生した気体を取り出すことができる。

実験終了後、発生させた気体が水に溶けやすい場合は、ストローから水を入れて溶解させた後に、水に溶けにくい気体の場合は、ドラフト内で蓋を取って中の気体を捨てた後に洗う。

考 察

蓋とストロー、釣り糸の間の隙間を埋める方法として、ホットボンドやプラスチック用接着剤の使用も検討したが、ホットボンドは細かい作業がしづらく隙間が残りやすい欠点があり、プラスチック用接着剤は乾燥に半日以上のかかるなどの理由から不採用とした。

それに対して油粘土は作業が簡単で手早くできるだけでなく、十分に容器を密閉できる。その柔らかさから、中が過圧された際の圧力

の逃げ道にもなりうる。生徒が油粘土の臭いや油を敬遠するようであれば、小麦粘土でも代用が可能である。

タレ瓶を結ぶ釣り糸は、一般に市販されているナイロン製のものと薬品や発生した気体に冒され、すぐに切れてしまう。「フロロカーボン製」と表示している釣り糸³⁾は、ポリフッ化ビニリデン(略称PVDF, 構造式- $[\text{CF}_2\text{CH}_2]_n$ -)でできており、高い耐薬品性を示す。実際、ナイロン製だと切れるような実験でも、フロロカーボン製の釣り糸は切れることがなかった。ナイロン製に比べると高価であるが、1束100mのものが1,500円程度で、釣具店で購入できる。

蓋に取り付ける2本のストローは、異なる色を使えば、指導・説明の時に容易に区別できて便利である。ストローから液体試薬を駒込ピペットを利用して入れるとき、勢いがよすぎるとゴム管の口からあふれてしまうので注意が必要である。

要領よく組み立てれば、10分程度で生徒自ら実験装置を作製することができる。また、10分程度であれば、生徒実験の時間配分においても、実施が可能である。

ただし、蓋に穴を開ける行程については、プラスチックの焼け溶けた悪臭が発生するので、生徒の健康配慮のために予め指導者側がやっておいた方がよい。

3 装置を用いた実験(授業展開)

装置を用いた実験例として、化学「物質の種類と性質」の無機物質の単元で取り扱われる「塩素の性質と二酸化窒素の性質」の実験方法を探り上げる。

なお、説明にあたり、注射器のついていないストローを青いストロー(青ストロー)、注射器のついているストローを赤いストロー(赤ストロー)とした。

A 塩素の発生

塩素(Cl_2)については、発生のための化学

反応や、気体の色・臭い、脱色作用などの性質を学習する。二股試験管などで発生させた塩素を集気瓶や試験管に捕集する方法が一般的であるが、この方法では、装置から逃げた塩素の臭いが実験室中に充満してしまうことも珍しくない。

ところが、ペットボトル気体発生装置を使えば、ほとんど塩素を逃がすことなく、気体を発生させ、気体の性質を調べることができる。

準 備

ペットボトル気体発生装置、塩酸(6 mol / l , 5 ã) , さらし粉 (2 g) , ティッシュペーパー , ろ紙 , 赤インク , 純水

方 法

(1) 塩素の発生

ペットボトル気体発生装置のタレ瓶に、ティッシュペーパーに包んださらし粉を入れる。この際、タレ瓶は前述のようにカッターで切れ込みを入れたものを使用する。

タレ瓶を容器内に入れて蓋をし、油粘土で密閉されているのを確認した後、青ストローから塩酸を容器内に加える。

容器を傾けるなどして、タレ瓶内のさらし粉と塩酸を十分に反応させ、必要量の塩素が発生したら、釣り糸を引いてタレ瓶を引き上げ反応を終了させる。

(2) 塩素の性質の確認

色の確認

容器内に発生した塩素の色を確認する。

臭いの確認

赤ストローにつけた注射器内に、純水でぬらしたろ紙片を入れ、ピンチコックを開ける。数分経過した後、ピンチコックを閉め、注射器内のろ紙を取り出して臭いを確認する。

脱色作用の確認

赤ストローをつけた注射器内に、赤インクで着色したろ紙片を入れ、ピンチコックを開ける。数分間、ろ紙の色の变化

を観察する。

結 果

塩素が黄色い気体であること、刺激臭があることについては、容易に確認できた。

脱色作用については、5 分ほどで赤インクが薄くなり、オレンジ色になることで確認できた。

考 察 (指導上の留意事項)

発生直後、黄色い塩素の気体が容器の下方に滞積している様子から、塩素が空気よりも重い気体であることも考察させることができる。

脱色作用を調べる際には、ピンチコックを閉めた状態で注射器をはずす。注射器内にはろ紙片を入れて注射器のピストンを押し入れる。注射器を装置に取り付ける。ピンチコックを開ける。注射器のピストンを引く、という手順で行えば確実に変化を確認できる。

B 二酸化窒素の発生

二酸化窒素をはじめとする窒素酸化物の発生や性質についても、化学「物質の種類と性質」の無機物質の単元で取り扱われる。取り扱われる性質は、「色・臭い」「水溶液の酸性度」「四酸化二窒素との平衡」である。特に「四酸化二窒素との平衡」は、化学「物質の構造と化学平衡」の単元において、温度・圧力との関係が具体的に扱われる。

準 備

銅板 (3 × 20mm 程度 , 4 ~ 5 枚) , 濃硝酸 (5 ã) , ペットボトル気体発生装置 , ろ紙 , pH 試験紙 , ビーカー (1 l , 2 個) , 温度計 , 氷水 , 三脚 , セラミック付き金網 , スタンド , ガスバーナー , ガスマッチ

方 法

(1) 二酸化窒素の発生

千枚通しで多くの穴を開けたタレ瓶に口部から銅板を入れる。

タレ瓶を容器内に入れて蓋をし、油粘土で

密閉されているのを確認した後，青ストローから濃硝酸を容器内に加える。

容器を傾けるなどして，タレ瓶内の銅板と濃硝酸を十分に反応させ，必要量の二酸化窒素が発生したら，釣り糸を引いてタレ瓶を引き上げ反応を終了させる。

(2) 二酸化窒素の性質

色の確認

容器内に発生した二酸化窒素の色を確認する。

臭いの確認

赤ストローにつけた注射器内に，純水でぬらしたろ紙片を入れ，ピンチコックを開ける。数分経過した後，ピンチコックを閉め，注射器内のろ紙を取り出して臭いを確認する。

水溶液の酸性度の確認

赤ストローをつけた注射器内に，純水でぬらしたpH試験紙を入れ，ピンチコックを開ける。数分間，pH試験紙の色の变化を観察する。

四酸化二窒素との平衡

2個の1ℓビーカーの一方に80℃に熱した温水，もう一方に約0℃まで冷やした氷水を入れておく。

装置全体が密閉されているのを確認した後，温水につけて容器内の気体の变化を観察する。変化が見られたら，容器を氷水に浸して容器内の気体の变化を観察する。これを交互に2～3回繰り返してみる。

容器が水に浮かないよう，水に浸している間は，ペットボトル容器全体をスタンドで固定する。

結 果

二酸化窒素が赤褐色の気体であること，刺激臭のあることについては，容易に確認できた。

水溶液が酸性であることについては，pH試験紙の色が酸性側に变化することにより，確

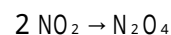
認できた。

四酸化二窒素との平衡については，80℃に温めると二酸化窒素の赤褐色が濃くなり，氷水で冷やすと無色の四酸化二窒素が増えて，赤褐色が薄くなることから確認できた。

考 察（指導上の留意点）

二酸化窒素についても，塩素と同様に発生直後は容器の下方に集まることから，空気よりも重い気体であることを考察させることができる。

四酸化二窒素との平衡については，容器が密閉されていれば，次の化学反応式に示すように，冷却した際の平衡移動により，気体全



体の体積が減少するためにペットボトル容器がへこむのが確認できる。

4 その他に開発した装置

本研究は，これまでに述べた「ペットボトル気体発生装置」の作製・実用化を主題としていたが，研究のきっかけは「ペットボトルを実験道具として再利用できないか？」「高価な実験器具を買わずに，ペットボトルなどで代用できないか？」といったことであり，気体発生装置の他にもいくつかの装置を試作している。その中の2つを紹介したい。

A 蒸留装置

化学 「物質の構成」の単元では，混合物から純物質を分離する方法の1つとして蒸留（分留）が挙げられており，その実験例として海水からの純水の分離，赤ワインからのエタノールの分離などがある。

また，蒸留に関しては，枝付きフラスコ，リービッヒ冷却器などの取り扱いについて問う問題が，多くの問題集で出題されている。

化学 の初めの単元で取り扱われる蒸留操作は，実験指導を軌道に乗せるため，知識・理解の定着のために，ぜひとも実施しておきたい。

しかしながら，蒸留操作で使用する枝付き

フラスコ，リービッヒ冷却器などは高価であり，生徒実験に足りるだけ数を揃えるのは大変である。リービッヒ冷却器を使用せず，蒸発成分をゴム管などを通して空気冷却させて凝縮する例も多用されているが，これでは「冷却水を下から入れて上から出す」というリービッヒ冷却器の仕組みを生徒が体感することができない。

そこで高価な枝付きフラスコ，リービッヒ冷却器をはじめとする実験器具をペットボトルで作製し，生徒実験での作製・使用について検討することとした。

枝付きフラスコの代わりに350㍓の耐熱ペットボトルを利用した（図5）。蓋にはストロー取り付け用，温度計取り付け用の2つの穴を，熱したコルクボウラーで開けた。中の液体の加熱は，500㍓ビーカーを使っの湯浴で行う。

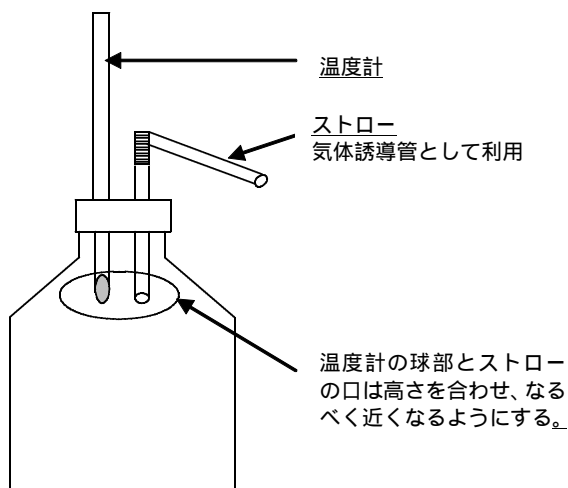


図5 枝付きフラスコ代用のペットボトル

リービッヒ冷却器は350㍓の清涼飲料用ペットボトルとストローで作製した（図6）。容器自体に加工が必要であるが，穴を開けてストローを取り付けるだけで，中で化学反応は起きないので，一度作れば装置全体を繰り返し使用することができる。また，冷却水の出入りに用いるストローの色を区別すれば，水をどのように流せばよいのか，生徒への指示がしやすく，生徒も理解しやすい。

通常のスタンドでは支持できないので，2

㍓の清涼飲料用ペットボトル（角形）を加工して支持することとした。

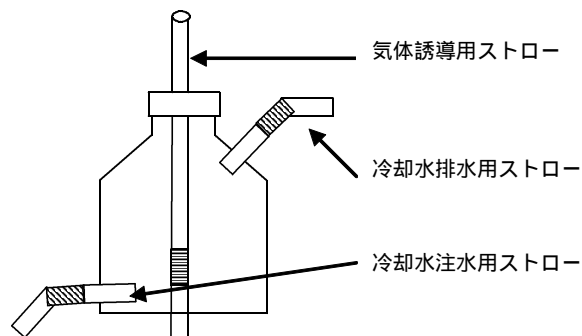


図6 リービッヒ冷却器代用のペットボトル

これらの装置を組み合わせた装置全体の写真が図7である。装置一組の費用は，次のとおり，合計612円程度で済む。

350㍓ ペットボトル 2 個	300円
ストロー 4 本	12円
2㍓ ペットボトル	300円



図7 ペットボトル蒸留装置

（上）装置全体の様子（下）冷却器とそのスタンド

ただし、湯浴の場合、容器内の液体が加熱されるのに非常に時間がかかる。湯浴用の水が沸騰するまでの間、容器内の水の温度は10

ほど低かった。穏やかに加熱することが可能な反面、蒸留時間がかかるのが欠点となる。

また、装置の作製と実験を合わせると2時間近く必要になるが、特にリービッヒ冷却器については、実際に装置を作製することにより、その構造や仕組みを十分に理解させることができる。

B ヨウ素の昇華装置

ヨウ素の昇華は、化学「物質の種類と性質」の無機物質（ハロゲン）の単元、化学「物質の構造」の化学結合の単元と関連する。

多くの教科書・実験書では、試験管に入れたヨウ素を湯浴によって昇華させ、それを水道水などで冷却する方法、ヨウ素を入れたビーカーに、氷をおいた時計皿で蓋をして加熱する方法が紹介されている。

しかし、いずれの場合にもヨウ素が外気中に漏れて、生徒が吸引する可能性は否定できない。

そこで気密性に優れたペットボトルを用いる。ペットボトルにヨウ素の結晶を少量入れ、ビーカーなどに入れた60 前後の温水で湯浴させれば、ヨウ素が昇華して生じる薄紫色の気体を確認できる。また、その後ペットボトルに水で濡らした雑巾をあてるなどして冷却すれば、冷却した部分を中心に、ヨウ素の結晶が再び現れることが確認できる。

ただし、一度容器内の側壁に付着したヨウ素を回収するのは困難であり、使用したヨウ素はペットボトルごと廃棄しなければならないことから、教室などでの演示実験用としての活用が適切であると考える。

おわりに

化学教育において、生徒実験では、実験者の安全性、環境への配慮、試薬などのコストダウンの観点から、セルプレートなどを用い

たマイクロスケール実験がクローズアップされており、多くの人々により実用化、多様化、効率化の研究がなされている。

本研究で作製した「ペットボトル気体発生装置」は、マイクロスケール実験とは異なり、省試薬などは考えていないが、有毒な気体を密閉させることでの安全性や、ペットボトルの再利用を通じた環境教育への配慮、そして「生徒が化学現象を自分の目で見て、実際に体験する機会を増やす」という面で、マイクロスケール実験に共通する教育効果があると感じている。

ペットボトルという素材は、化学分野に限らず多くの理科実験で利用されている。その中にはキップの装置を模した装置⁴⁾もある。

本研究も、他の研究と同様に、生徒の化学への好奇心や探究心がふくらみ、知識・理解がより深まることに貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 岩波理化学事典第4版
- 2) 株式会社クレハホームページ フロロカーボン、ヘーナ話(1) http://www.seaguar.ne.jp/tsurihee/vol_01.html
- 3) 株式会社ウィルコのホームページ PVDF(フッ化ビニリデン樹脂) ...PV <http://www.wilco.jp/tec/PV.html>
- 4) 関向正俊 ペットボトルを用いたキップの装置の製作 岩手県立総合教育センターホームページ <http://www1.iwate-ed.jp/kakusitu/kagakusangyo/happyoshiro/kanikipp.pdf>

(ふじた けいたろう 平成18年度課題研修員 北海道札幌西陵高等学校)