

燃焼の仕組みを理解させる
—火おこし器で発火させる方法を通して—

柿原聖治

愛知東邦大学

燃焼の仕組みを理解させる —火おこし器で発火させる方法を通して—

柿原 聖治

目次

1. はじめに
2. 燃焼の三要素
3. 実験の課題
4. 酸素
5. 解決法
6. 分解
7. おわりに

1. はじめに

本論の目的は、理科を学ぶ学生に燃焼の仕組みを理解させることである。そのために用いたのが、舞錐式まいざりの火おこし器である。

これは木の板と棒をこすり合わせ、摩擦熱で火をおこす実験で、小・中学生に非常に人気のあるものである。高校の物理では「仕事を熱に変える」実験として教科書に取り上げられている。

しかし、煙が出るころまではいくが、発火するころまではなかなかいかない。大人がやっても発火せず、小・中学生にはさらに難しく、達成感が味わいにくいものとなっている。

そこで、その解決策を考えさせることにした。その過程で、燃焼の三要素を確認させ、燃焼の仕組みについて理解させることにした。教育学部の学生を対象に行った。

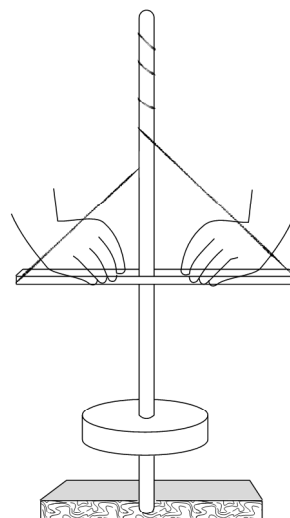


図1 火おこし器

2. 燃焼の三要素

物が燃えるには、燃える物（可燃物）、空気（酸素）、それに熱（発火点以上の温度）が必要である。これが燃焼の三要素である。英語ではFire TriangleあるいはTriangle of Fireという。三要素を、日本では頂点に書くのに対して、欧米では辺に書くことが多い。可燃物が英語では燃料

FUELになっている。

三要素のうち、「可燃物」と「酸素」の二つの条件は、日常生活でいつも満たされている。ただ、「発火点以上の温度」という条件が欠けているために、火事が起こらない。

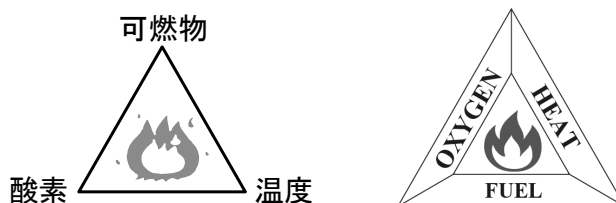


図2 燃焼の三要素とFire Triangle

火をどんなに近づけても、発火点以上の温度にしなければ、紙も燃えない。その条件を確かめる実験は、既に他で述べている¹⁾ので、ここでは触れない。

3. 実験の課題

火おこし器を材料に「確実に発火させよう」という課題を学生に与えた。

火おこし器による発火の実験は毎年やっていたが、発火せずに、学生はモヤモヤした気分で行っていた。脱脂綿やティッシュから煙が出るところまでは行くが、発火するところまでは行かない。学生のなかには、絶対に発火させたいという者がいて、時間を忘れてやっていた。しかし、発火しなかった。

そこで、本研究では、これまでの普通の方法では発火しないということを体験させてから、次の方法を考えさせることにした。

火おこし器をいくら激しく動かしても、温度を上げることには限界がある。そこで、燃焼の三要素のうち、「酸素」に注目して考えるように条件を指定した。

4. 酸素

酸素に注目させると、最初に思いつくのは酸素濃度を上げる方法である。空気中の酸素濃度は約20%である。これを100%にすれば、発火するのではないかという考えである。

《実験》 酸素ポンプで脱脂綿に酸素を送りながらこすり合わせてみた。しかし、それでも発火しない。酸素ポンプを同時に2、3本使って、懸命にやると、発火することがあった。つまり、この方法では確実に発火につなげることは難しいことが分かった。また、この方法は酸素ポンプを多く使い、普通のやり方とあまりにも違うので、学生は違和感を覚えていた。

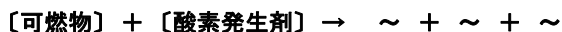
次に、外部から酸素を供給するのではなく、内部に酸素を含んだものを用いるという方法があることに注目させた。そこで、燃焼の仕組みについて復習させた。

燃焼の反応式は、一般に、



の形になる。右辺は、種々の生成物ができるので省略している。式中の酸素は、「空気中の酸素」を使って燃える。これが一般的な燃焼である。上の実験では、ボンベから酸素を供給している。

それに対して、花火は火薬の中に酸素を発生させるものを含んでいる。花火の燃焼の反応式は、簡単に言えば、



の形になる。

酸素発生剤というのは、高校の化学では酸化剤といっているものである。相手（可燃物）に酸素を与える物質のことであるが、ここでは分かりやすいように、説明的な「酸素発生剤」という言葉を使っている。

花火の成分にはこの酸素発生剤が入っており、「空気中の酸素」を全く必要とせずに燃焼する。それを確かめる実験を、2つ行わせた。

《実験》 燃焼中の花火を、二酸化炭素の入った集気びんに入れた。燃え続けた。

《実験》 燃焼中の花火を、水の入った集気びんに入れた。水中でも燃え続けた。

次に、酸素発生剤には、具体的に何があるかを尋ねた。

《発問》 理科実験で酸素を作るのに何を使ったか、思い出してみよう。

過酸化水素水（オキシドール）と二酸化マンガンという答えは出る。二酸化マンガンの役割は反応速度を速めるだけで、無くても酸素は発生する。小・中学校段階では過酸化水素水を使っているが、高校の化学では、塩素酸カリウムも使うことになっていることを教えた。酸素発生剤としては、この2つがよく知られている。このうち、過酸化水素水は液体であるので、花火の成分に使えない。それに対して、塩素酸カリウムは固体であるので、花火の成分に使える。実際に使われていて、マッチの成分にも使われている。

《実験》 マッチを擦らせて、炎の大きさが変化するところを観察させた。

擦った直後、一瞬だけ大きな炎になる。その後、普通の炎になる。最初の大きな炎は、塩素酸カリウムにより発生した酸素によるものである。その後は空気中の酸素を使って燃えている。

それを確かめる実験を、教卓で見せた。

《実験》 二酸化炭素の充満した2 Lのビーカーの中で、マッチを擦った。一瞬大きな炎を出して燃えるが、すぐに消えた。

これにより、最初の大きな炎はマッチから出る酸素による燃焼で、その後は周りに酸素がない（二酸化炭素しかない）ので、消えることが分かる。花火の場合が、酸素発生剤が多く入っているので、二酸化炭素中でも燃え続けるが、マッチの場合は少量しか入っていないので、最初だけ燃え、後は消える。

《思考実験》 脱脂綿に塩素酸カリウムを振りかけ、火おこし器の棒で擦る。

これで解決しそうである。しかし、危険なのでできない。塩素酸カリウムはすりつぶすと爆発する恐れがあるからである。これは周知の事実である。特に、可燃物と一緒にして擦るのだから、

さらに危険である。思考上だけ行った実験として終わらせ、その他の方法を考えさせた。

5. 解決法

可燃物と酸素発生剤が一緒になったものとして、フラッシュペーパーがあることを教えた。この紙には酸素発生剤が適当に配合されて、安全に実験できる。外見はあぶらとり紙に似ている。フラッシュペーパーは手品用品として市販されている。マジシャンが紙を一瞬で燃やすのは、このフラッシュペーパーによるものである。

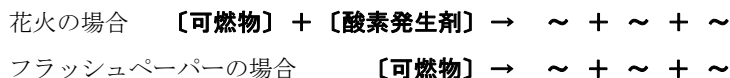
《実験》 フラッシュペーパーを使って、火おこしを行わせた。この他に、フラッシュコットンという脱脂綿のようなものもあるので、これを用いても実験させた。

誰がやっても確実に発火した。発火すると、大きな炎が上がり、一瞬で消えた。何も残らない。燃えかすも出ない。一瞬の炎なので、やけどをすることもない。発火したときは、驚きの声が上がった。

火おこし器の課題は、これで解決した。しかし、フラッシュペーパーが何なのか疑問に感じる学生が多い。そこで、フラッシュペーパーの発火の仕組みを学生に納得させるため、簡略化した説明の方法を用意した。

6. 分解

花火とフラッシュペーパーの燃焼を比較して考えさせた。



フラッシュペーパーは自分自身が分解して、可燃物と酸素の両方を作り、それによって燃え続ける。自己反応性物質とよばれている²⁾。一方、酸素発生剤の塩素酸カリウムは分解すると、酸素と塩化カリウムになる。塩化カリウムが可燃物ではないので、これだけでは燃えない。可燃物と一緒にしなければ燃え続けない。それに対して、自己反応性物質は分解して生じるものが、可燃物と酸素なので、これだけで燃え続ける。

つまり、分解だけを考えると、その反応式は



$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} = \text{自己反応性物質} \cdots \cdots \cdots \mathbf{B} \text{や} \mathbf{C} \text{が、可燃物の場合} \\ \mathbf{A} = \text{酸素発生剤 (酸化剤)} \cdots \cdots \mathbf{B} \text{や} \mathbf{C} \text{が、不燃物の場合} \end{array} \right.$$

(ただし、自己反応性物質の場合、分解して酸素が発生すると同時に、可燃物のBやCと反応してしまうので、単独の酸素は得られない)

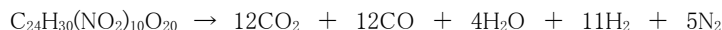
消防法で危険物を6つに分類する場合、この「自己反応性物質」は1つの分類名になっている。取扱いに注意を要する物質の一つである。

フラッシュペーパーというのは商品名で、説明書には「この製品の材質にはピロキシリンを少量使用しております」と書いてある。このpyroxylinは辞典にはパイロキシリンとも書いてある。

これは、綿火薬よりは窒素の含有量が少ないニトロセルロースのことである。簡単に言えば、フラッシュペーパーの、成分による名称はニトロセルロースになる。

ニトロセルロースは特殊なものではなく、マニキュアの主成分でもある。どの高校の化学教科書にも載っている。セルロースから作る反応式も載っている。ニトロセルロースに点火したようすを撮った写真を載せた教科書^{3, 4)}、さらに、具体的な作り方で載せている教科書もある⁵⁾。種々の炎色を出すフラッシュペーパーの作り方を載せた論文もある⁶⁾。

ニトロセルロースの燃焼の反応式は概略、次式と考えられている⁷⁾。



(ただし、ニトロセルロースは高分子であるので、分子は不定で一つではない。上記の分子式は、一例に過ぎない) 1分子の固体が、44分子(=12+12+4+11+5)の気体になる。非常に大きい体積の増加が起こるので、大きな炎になる。

火薬の成分は5つに分類されていて、ニトロセルロースは鋭感剤に分類されている。鋭感剤とは、起爆感度を増大し、爆ごうの伝播を確実にするものである⁸⁾。

7. おわりに

フラッシュペーパーを使う前までは、火おこし器で発火させることができず、苦い体験を積み重ねてきた。フラッシュペーパーを使うと、確実に発火させることができた。発火したときは、学生はみな歓声を上げて、喜んでいた。

フラッシュペーパーにライターで点火してみせると、大きな炎を上げて燃え、後に何も残らない。すべて消えてしまう。驚きの声が上がリ、この紙の方に注目が集まる。これだけでは単なる遊びに終わってしまうので、火おこし器を材料にして、発火させるための条件を考えさせ、燃焼の仕組みについて理解させることを試みた。

実験後に学生に感想を書かせると、

- 非常に面白く、達成感があった。驚きの連続だった。
- 燃焼の三要素を考えながら、火おこし器で発火させるところまで行けた。
- 花火の仕組みや、マジシャンの火の謎も解けて、勉強になった。

などがあり、本研究の目的は達したものと考える。

参考 この他に発火しにくい実験として、断熱圧縮による温度上昇によって脱脂綿を発火させる実験がある。ディーゼル車のエンジン内で起こっている現象で、高校の物理教科書に載っている実験である。市販の圧縮発火器を使った実験であるが、発火しにくい。だからといって、脱脂綿の代わりにフラッシュコットンやフラッシュペーパーを使ってはならない。実際にやってみたところ、爆発の衝撃でガラスが粉々に割れ、飛び散った。それも、飛び散らないように使う保護用の筒と台の隙間からガラス片が飛び出した。このように大きな事故につながる危険がある。

文献

- 1) 柿原聖治：化学—実験教材の開発と授業構成—、『CD-ROM版 中学校理科教育実践講座 理論編 3』、ニチブン、p.204、2003.
- 2) 田村昌三ほか：『危険物の事典』、朝倉書店、2004.
- 3) 竹内敬人ほか：『化学』、東京書籍、p.417、2013.
- 4) 辰巳敬ほか：『化学』、数研出版、p.372、2013.
- 5) 井口洋夫、木下實ほか：『化学』、実教出版、p.338、2013.
- 6) Sally Solomon, Chinyu Hur, Alan Lee and Kurt Smith, “Quick Method for Making Colored-Flame Flash Paper”, *Journal of Chemical Education*, 72 (12), p.1133, 1995.
- 7) http://www.democraticunderground.com/discuss/duboard.php?az=view_all&address=118x156466#156511
- 8) ケー・ワイ・エス研究会：『火薬類取扱保安責任者試験問題の解答と解説』、p.124、2005.

受理日 平成28年 3 月29日