

2 線香花火に色はつくのか？

1. 動機

私達は、「世の中に広く出回っている線香花火はだいたいどれも同じような色の火花を発生させるものばかりである。」ということに気づいた。「なぜ他の種類の花火はさまざまな色のものがあるのに、線香花火には無いのか？」そう疑問に思ったので、線香花火に色をつけることを目的に、研究を進めることにした。

2. 線香花火の基本形を完成させる

色を付ける前に、線香花火の仕組みを理解する必要があると考え、自分達で最初から線香花火を作っていくことにした。

実験Ⅰ 授業で使われている線香花火を試してみる

とりあえず、授業で使われている線香花火を試してみた。

(実験方法) … 活性炭10%、硫黄30%、硝酸カリウム60%を混ぜた火薬0.5gを幅約1cmの書道用半紙で包み、こよった線香花火を燃焼させた。

(実験結果) … 火玉ができず、火花も飛ばない。

今回の実験に使用した書道用半紙と、市販の線香花火の材質には、明らかにその質感と厚さに違いがあったので、それがこのような結果になった原因だと考えられる。

実験Ⅱ 相応しい材質の紙を探す

包み紙に相応しい紙を探すため、実験を行った。

(実験方法) … 表の紙で線香花火を作り、比較した。

(実験結果)

紙の種類	火花、火玉の有無	燃焼の様子
書道用半紙	なし	燃焼時の勢いが強かった。
障子用半紙	なし	燃焼がゆっくりだった。
お花紙	なし	炎を上げて全体が燃えてしまった。
線香花火の紙	あり	燃焼は良好。火玉もできた。
薬包紙	あり	ほぼ線香花火の紙と同じ。
キャラメル包装紙	あり	火玉が落ちない。火花もいまひとつ。
包装用薄口紙	あり	2、3回大きな火花が散った。

結果より薬包紙が最も良い反応を示した。よってこの実験以降は実験には薬包紙を使っている。その薬包紙と、キャラメル包装紙、包装用薄口紙はどれもパラフィン紙であるため、紙にパラフィンが染み込ませてあることが好結果の条件かもしれない。なお、良い紙を見つけることは難しいが、今後の研究課題になっている。

実験Ⅲ 包み紙の幅と火薬量の最適条件についての実験

同じ薬包紙を用いても包み紙の幅と火薬量でかなり変化が生ずることがわかった。このため、火薬量と包み紙の幅を変化させて、最適条件を探ることにした。

(実験方法) … 市販の線香花火の包み紙の幅1.9cm火薬量0.05gを参考にしておおよその条件を決めた。表のようにそれぞれを組み合わせることで燃焼を比較した。

(実験結果)

紙火薬	0.8cm	1.3cm	1.9cm
0.02g	火花は少量だが散っていた	火花が散らない	紙全体が炎をあげて燃焼した
0.05g	火花が一番多く散っていた	火花は小さく、殆ど散らない	火花は大きかったが少量であった
0.09g	火花は散っていた	火花が小さかった	火花は散らないが火玉は大きい
0.23g	火花は散っていた	火花は小さくて少量	火花は散らないが火玉は特に大きい

火薬量0.05g, 包み紙の幅0.8cmの組み合わせが最も良い反応を示した。しかし、火薬の包み易さを考慮し、これ以後の実験では紙幅を1cmに統一する事にした。

火薬量については念のためもう少し詳しく変化させてみた。しかし、実験Ⅲ同様0.05gのものが最も良い反応を示した。

以後の実験は火薬量0.05g, 包み紙の幅1cmの条件で行うことにした。

実験Ⅳ 火花を増加させる実験

だいぶ線香花火らしくはなってきたが、火花の大きさが市販のものより遥かに小さいと感じた。そこで、参考文献の「油煙を入れると火花が飛ぶ」という記述について検証することにした。油煙とは油を燃焼させたすすのことだが、今回の実験では下の写真のようにろうを不完全燃焼させたもの（ここでは「ろうの煤」と表記する）を松煙の代わりに使用し、検証することにした。

(実験方法) … i 火薬中の炭素を活性炭：ろうの煤 = 1 : 1 になるようにして火薬を作る。
ii 火薬中の炭素を全てろうの煤に変え、0.05gを幅1cmの薬包紙で包んでこよる。

(実験結果) … i あまり火花は散らなかったが、大きさは大きかった。

ii 炭素が全て活性炭の場合よりも、はるかに

大きな火花が散っていた。これまでの実験で最もよい結果を示している。



全てろうの煤を使用した場合が最もよかったため、これ以後の実験では炭素として全てろうの煤を使うことにした。また、これ以外にもインターネットの情報を参考に、火薬に鉄を混入したり、包み紙に鉄の化合物を染み込ませたりしたが、我々が試した範囲ではうまくいかなかった。なぜろうの煤が良いのかは今後の課題となっている。

実験Ⅴ 硫黄量を変化させる実験

インターネットで「硫黄は火玉を長く保持させる。」という情報を得ることができたので、火薬中の硫黄量が増えればより長く火玉が保持されるのではないかと考え、火薬に含まれる硫黄量の割合を増加させる実験を試みた。

(実験方法) … 表のように硫黄量を増やした時、火玉に現れる変化を観察した。

(実験結果) *写真 (上) 硫黄量30%、(下) 硫黄量50%

硫黄量	燃焼の様子
30%	火玉は落ちず、長く火玉を保持した。
35%	火玉は落ちないが、長く火玉を保持できない。
40%	火玉は落ちた。長続きせず火花が散る回数も少ない。
45%	火玉は落ちない。
50%	火玉は落ちない。全体が燃えた。火花が散らない。



硫黄含有量を増加しても、線香花火としてより良い状態を実現することはできなかった。40%以上では火花が少なくなり、火玉も保持できない傾向がみられた。

また、生徒理科研究発表会中部地区大会に出場した際、ある先生から「硫黄は直接燃焼に関係ないので、市販の線香花火には使われていないはずだ。」というアドバイスをいただいた。そこで真偽を確かめるために硫黄含有量を減らす実験を行った。

(実験方法) … 表のように硫黄量を減らした時、火玉に現れる変化を観察した。

(実験結果)

硫黄量	燃焼のようす
25%	火玉ができて、火花が大きく散った。
20%	火玉ができた。最後は流れるような火花が散っていた。
15%	火玉はあまり大きくはなかった。(2、3回落ちた)
10%	火玉ができた。最初の火花の散りが小さい。
5%	火玉はできた。流れるような火花がずっと散っていた。
0%	火玉はできようとしたが落ちてしまった。(2、3回あった)

硫黄含有量を減少させると燃焼が緩やかになっているように感じられ、含有量が20%以下になると線香花火として成り立たないようになった。

以上の2つの実験より、硫黄含有量30%という数値は、昔の人が多くの実験の中から導き出した理想的な数値であることがわかった。

実験Ⅵ 炎色反応を示す金属の化合物を使う

第二段階として「どうやったら火花に色を付けることができるのか。」ということが非常に大きな問題だった。とりあえず打ち上げ花火と同じように炎色反応を利用すれば色がつくのではないかと考え、以下の方法で実験を行った。

(実験方法) … 参考文献「花火の科学」に、炭酸ストロンチウムを30%、火薬に混合するという記述があったため、塩化ストロンチウムを火薬量全体の10%になるように混合し、線香花火を作った。

(実験結果) … 花火がまともに燃焼しなかった。火玉もできず火花も飛ばない。

全くまともな花火にならないことから、この方法では火花に色を付けることは不可能だと考えた。

実験Ⅶ 硝酸カリウムの代わりに炎色反応を示す金属の硝酸塩を使う

実験Ⅵの方法では塩化ストロンチウムを加えると、相対的に火薬の量が減ってしまうため、硝酸カリウムの代わりに炎色反応を示す金属の硝酸塩を使うことで色が付くかどうか検証してみた。

(実験方法) … 硝酸カリウムの代わりに硝酸ストロンチウム、硝酸リチウム、硝酸ナトリウムを使った火薬と、安全のため硝酸カリウム：硝酸銅=5：1の割合で配合した火薬で線香花火を作り、燃焼させて様子を観察する。

(実験結果)

硝酸塩	観察の様子
硝酸ストロンチウム	火花は散ったが色の変化は見られなかった。
硝酸リチウム	火花は散ったが、色の変化は見られなかった。
硝酸ナトリウム	火玉には黄色く色がついたが火花が散らない。
硝酸銅	火花は散ったが、色の変化は見られなかった。



硝酸ナトリウムの場合

硝酸ナトリウム以外の場合は炎色反応は起こらなかったが、火花は散っていた。逆に硝酸ナトリウムの場合は炎色反応は起こったが、火花は散らなかった。

燃焼時の温度が関係しているという予想もできるが、なぜこのような結果になったのかははっきり分からないので今後の研究課題となっている。

3. 考察と今後の研究課題

考察 黒色火薬の混合比について

我々が使用した黒色火薬は、火薬1g中に硝酸カリウム0.6g、硫黄0.3g、炭素0.1gを含んでいる。これを下の表で物質質量比に換算してみた。

元素	炭素	硫黄	カリウム	窒素	酸素
火薬1g中の物質の質量 (g)	0.1	0.3	0.6		
〃 〃 物質質量 (mol)	0.0083	0.0094	0.006	0.006	0.018
〃 〃 物質質量比	8	9	6	6	18

火薬中の酸素の物質質量が炭素の物質質量比の約2倍である。よって炭素と酸素のほとんどが反応して、二酸化炭素になっていると考えることができる。

このときカリウムと窒素と硫黄が余っていると考えられ、この3つの元素が線香花火の火玉を作っていると予想できるが他にも諸説があり、今のところ詳細はわからない。

また、硫黄は燃焼の際の触媒となっているという人もいるが、触媒であると考えれば実験Ⅴで硫黄量の変化に伴い燃焼状態・速度が変化したものも納得できる。残念ながらきちんとした本や論文の記述を見つけることができなかったので、硫黄の役割については今後の課題である。

実験計画Ⅰ 火花が散るしくみと松煙の関係

実験Ⅳでは炭素として全て松煙を使用したものの方が、大きな火花が散っていた。なぜだろうか。

ろうの煤と活性炭とを比べてみると、ろうの煤は蠟が不完全燃焼した時の生成物であるため、多くの炭化水素と水分を含んでいるはずである。その炭化水素が燃焼することにより特徴的な形の火花が発生する可能性があると考えている。火薬を巻く紙にパラフィンらしき物質が塗られているものが、よい傾向を示していることと一致している可能性もある。

本当に炭化水素の燃焼により火花が生じるのだとしたら、火薬中に含まれる炭化水素の量を意図的に変えることにより、火花の量や大きさを自由にコントロールできるようになる可能性もある。

詳細はまだ決まっていないが、確認のため我々は次のような実験を計画している。

- (実験方法) … 活性炭に霧吹きなどを利用してサラダ油などの安全な炭化水素を混ぜ合わせたものを炭素として使用した火薬で線香花火を作り、燃焼を観察する。
- (結果予想) … 活性炭と松煙の主な違いは含まれている炭化水素の差であるので、炭化水素の量により、火花の量及び大きさが変わっていく。

この結果で火花が大きくなれば炭化水素を工夫すれば火花に色をつけることができる可能性がある。予想通りの結果が出なかった場合、水分についても実験を考えてみなければならないが、水分は火薬が乾燥すると変化することから、可能性は余り高くないと考えている。

実験計画Ⅱ 火花、炎色反応の発生と温度の関係

「**実験Ⅴ** 硫黄量を変化させる実験」「**実験Ⅵ** 炎色反応を示す金属の化合物を使う」において火花が飛ばなくなっている状態から火玉の温度の低下が早いということが共通すると感じている。

もし温度が低いことで火花が散らないとするなら、より強力な酸化剤を使うなどして火玉の温度をあげることができれば炎色反応が起き、且つ火花も散る可能性がある。

この、酸化剤を強力にするという考えは以前からあったが、爆発を起こす危険性があって非常に危険であるため、現状では顧問から禁止されている。

しかし実験を進める上でどうしても必要が生じると判断したなら、安全面に最大限の注意を払いながら次のような実験も計画している。

- (実験方法) … i 火薬中の硝酸カリウムに塩素酸カリウムを少しだけ混ぜ線香花火を作り燃焼させる。
- ii 火薬中に炎色反応を示す金属の硝酸塩を入れ、硝酸カリウムに塩素酸カリウムを少しだけ混ぜたもので線香花火を作り、燃焼させる。
- (結果予想) … i は燃焼の速度が上がり、火玉の温度が高くなるため、より大きな火花を発生する。
- ii は入れる炎色反応を示す金属の硝酸塩の量にもよると考えられるが、バランスよく反応していれば、炎色反応を起こし、かつ今までのように火花を散らし燃焼する線香花火ができる。

参考文献である「花火の科学」には酸化剤として様々なものが示されている。線香花火は幼い子供でも扱うものであるため、絶対的な安全性が要求される。安全でありながら燃焼温度・火玉の温度を変化させる方法を考えてみたい。

また「**実験Ⅶ** 硝酸カリウムの代わりに炎色反応を示す金属の硝酸塩を使う」では炎色反応が起こった硝酸ナトリウムを使った場合だけ、火花がまったく散らなかった。これがナトリウムの性質に由来するものなのか、あるいは炎色反応を起こしたことに由来するものなのかいまのところ見当が付かない。これも今後の研究課題の一つである。

4. 参考文献

花火の科学 細谷 政夫, 細谷 文夫著 東海大学出版