

線香花火のふしぎ

九州大学 井上 智博

1. はじめに

今年の夏、花火大会に行った人も多いでしょう。キャンプで花火を楽しんだ人もいると思います。これほどまで花火を身近に楽しめる国、そして花火そのものを楽しむ国は日本以外にありません。

花火の中でも線香花火が好きな人は多いと思います。著者もその一人です。火花が描く、はかない松葉模様は独特の美しさを見せてくれます。これまでに、線香花火って不思議だなあと思ったことはありませんか。どうして火花が出るんだろう。どうして火花が枝分かれするんだろう。素朴な疑問を抱いた人も少なくないと思います。読者のなかには、本やインターネットで調べた人もいるかもしれません。ですが、納得のいく答えは得られなかったことでしょう。理由は明らかです。そもそも線香花火の科学は、江戸時代から今日に至るまで四世紀のあいだ謎に包まれていました。なぜ火花が出るか誰も知らなかったわけです。

今回は、近年明らかになってきた線香花火の謎にせまりたいと思います。

2. 打上花火と線香花火

打上花火にはいろいろな大きさがあります。直径約30cmの打上玉は尺玉(十号玉)と呼ばれ、上空300mまで上昇し、直径約300mの大輪の花を咲かせます。玉の中には、あらかじめ火花の種になる直径1cmほどの火薬(星)が詰められており、上空で開発すると同時に星に点火します。燃えながら飛ぶ星の軌跡が、我々には火花に見えます。星に使う火薬の種類を内側と外側で変えることで、火花の色を変化させることができます(これを引きと言います)。星には酸化剤として過塩素酸カリウムなどが用いられ、燃烧温度が2000℃~3000℃に達し、『炎色反応』によって鮮やかに発色します。打上花火は、花火職人の努力によって年々進化しています。最近で



図1. 色鮮やかな打上花火
(尺玉三発、2017年新潟県片貝まつり)

は水色や紫など、以前は難しかった中間色も出せるようになりました。さらに、花火の色が右から左、そして左から右へと移り変わるグラデーションの技術も活用され、豊富なバリエーションを楽しむことができるようになっています。全国屈指の競技会である大曲の花火（秋田県）や土浦の花火（茨城県）では、最先端の花火を観賞できます。

線香花火は、紙縫り（こより）の下に直径数mmほどの小さな火球ができ、そこから火花が飛び出し何度か枝分かれして最終的に数cmほどの距離に達します。線香花火には黒色火薬と和紙のみが使われ、金属粉などは一切使用しません。また、打上花火の星のような火花の種は仕込まれていません。線香花火の燃焼温度は約1000℃にしかならないため、炎色反応ではなく『黒体放射』によって橙色（オレンジ）に発色します。製鉄所で溶けた鉄が光るのと同じ原理です。線香花火は江戸時代から今日まで変わらぬ美しさを見せてくれます。

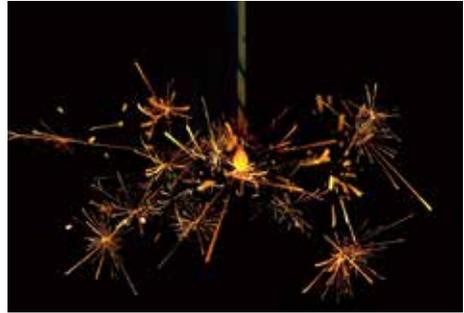


図2. 線香花火
(C.Inoue, Y.Izato, A.Miyake, and E.Villemaux, Phys. Rev. Lett., 2017)

以上のように、打上花火と線香花火は、サイズや火薬、温度や発色機構など様々な点で異なることが分かります。両者を見比べると、具体的に線香花火の何が不思議か見えてきます。

3. 線香花火の研究の歴史

そもそも日本の花火はいつ・どのように始まったのでしょうか。

花火には火薬が必要です。火薬とは、それ自身に酸素を発生する『酸化剤』を含みます。最も基本的な火薬は黒色火薬で、6世紀ごろ中国で発明されました。黒色火薬は木炭・硫黄・硝酸カリウムの混合物で、このうち硝酸カリウムが酸化剤の役割を果たします。戦国時代後期（16世紀）になると、ポルトガルから日本へと火縄銃とともに黒色火薬が伝えられました。江戸時代に入ると、徳川幕府によって鉄砲の流通が厳しく制限されます。その結果、火薬を扱う技術を持った砲術師たちが次第に花火を作るようになりました。線香花火も江戸時代に日本で作られ始めました。

線香花火には2種類あるをご存知でしょうか。線香花火の原型は、“にかわ”などで練った黒色火薬を、わらの先につけて出来る『すぼ手』です。すぼ手は、火薬を上に向けて遊びます。浮世絵には、すぼ手が描かれています（図3）。線

香を立てる香炉に、すぼ手を挿して鑑賞していたことから、線香花火の名がついたのでしょう。もう一つは、和紙の先端に黒色火薬を包んで擦った『長手（ながて）』です。こちらは火薬を下側に向けます。最近では、長手が主流ですね。

今では線香花火は日本でしか知られていません。しかし19世紀にはヨーロッパでも Japanese Match という名前でも知られていました。そればかりか、科学的な分析が行われていたことに驚かされます。例えば1864年に化学者 A.W.Hofmann は、日本から持ち帰ったと思われる線香花火を分析し、材料に金属粉が含まれないことを突き止めた上で、線香花火を自作することに成功しています。その後 A.Deniss は、写実的なイラストとともに線香花火を紹介しました（図4）。『線香花火の驚くべき現象は、小さな火球の一体どのような作用によるものなのだろうか？』と記したことからも、独特の現象に強い興味を持っていたことが伺えます。しかし、実際に何が起きているのか明らかにされることはありませんでした。

日本では寺田寅彦が線香花火に魅せられたことは広く知られています。門下生である中谷宇吉郎は、優れた実験技術と鋭い観察眼によって現象の本質にせまりました。線香花火には酸素の供給が不可欠であることを指摘し、火球形成後は火薬ではないことを明らかにしています。1950年代には、花火界の偉人として知られる清水武夫も研究を行いました。同時期に都立新宿高校の定時制物理部所属の優秀な生徒達が成分分析を行いました。火球には黒色火薬の酸化



図3. 縁側ですぼ手を観賞する様子（火花の分岐が描かれている。西川祐信1748）



図4. A.Denisse が紹介した線香花火（上図：中央の人物が右手に線香花火を持ち、周りの人に見せている。下図：線香花火が写実的に描かれている。1882）

剤である硝酸カリウムは残っておらず、反応生成物である硫化カリウム・炭酸カリウム・硫酸カリウムと炭素が主成分であることを明らかにした成果は画期的です。今世紀に入ると高速度カメラが普及し、2009年にはNHKが線香花火のスローモーション映像を放送しました。このように優れた研究事例が報告され、重要な知見が蓄積されましたが、火花が出る仕組みなどは謎のままでした。著者は2012年8月に、たまたま線香花火の科学に出会い、美の科学を解き明かしたいと思いました。これまでに、毎秒10万コマの超高速撮影や化学的な分析、そして現象を数式で記述する理論的アプローチと様々な手法を駆使した結果、美しさの秘密が少しずつ明らかになってきました。

4. 美の科学

①火花が飛び出す仕組み

火球を観察すると、小刻みに震えていることが分かります。これは、火球にできた気泡が破裂して、表面の形状が常に変化していることが原因です。

高速度カメラで火球を詳しく見てみましょう。線香花火の前半では、図5に示すように、球形の火球の内部にガスが発生し、膨らみます。限界まで膨張して破裂すると、火球は表面張力によっていったん縮まります。同時に生じる流れが火球中心に集まる結果、急激にジェットが伸びて、先端が分裂して液滴が飛び出します。線香花火の火花の正体は液滴です。そしてこの液滴は、火薬ではなく、いくつかのカリウム化合物と炭素から構成されます。

後半になると、図6のように、火球は紡錘型になり、表面にたくさんの気泡ができます。ここでも気泡が弾けて液滴が飛び出します。前半は間欠的に遠くに飛ぶ火花が出て、後半は連続的に四方に火花が出る理由は、火球にできる気泡のサイズが小さくなるにつれて飛び出す液滴が小さくなるのと同時に、気泡が破裂する頻度が増すからです。

線香花火の火花が飛び出す仕組みは、グラスに注いだ炭酸水の気泡が弾けて水滴が跳び上がるのと同じです。

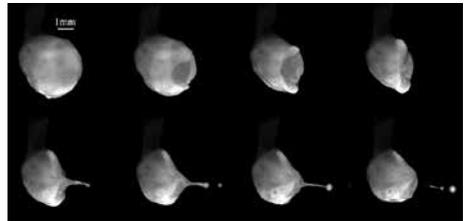


図5. 火球から液滴が飛び出す様子
(左上から右下へ0.8msごとの白黒画像。
火球(気泡)が弾けて液滴が飛び出す。)

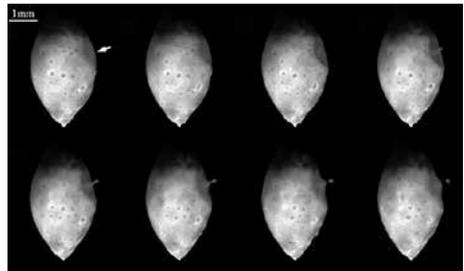


図6. 火球から液滴が飛び出す様子
(0.1msごとの白黒画像。矢印の気泡が
破裂して液滴が飛び出す。)

②火花が分岐する仕組み

線香花火の火花は、図7に示すように何度も枝分かれます。火球を飛び出した液滴の表面では、自身の炭素が空気中の酸素と反応して発熱します。表面で発生した熱が内部に伝わって、次第に液滴全体が温まると、内部でガスが発生します。すると液滴が急激に膨張し、破裂します。およそ半分の大きさの数個の液滴に分かれて、それらも同じ過程を経て、さらに小さい液滴へと分裂します。これが人の目には火花の分岐として映るわけです。

何度か分裂して十分小さくなると、周囲の空気に冷やされやすくなるので、液滴内部のガス発生が止まってしまう、それ以上は分裂しなくなります。火球を飛び出した液滴は、最大8回も繰り返し分裂します。線香花火の最大の特徴である火花の枝分かれには、液滴が温まることと内部でガスが発生することが重要です。

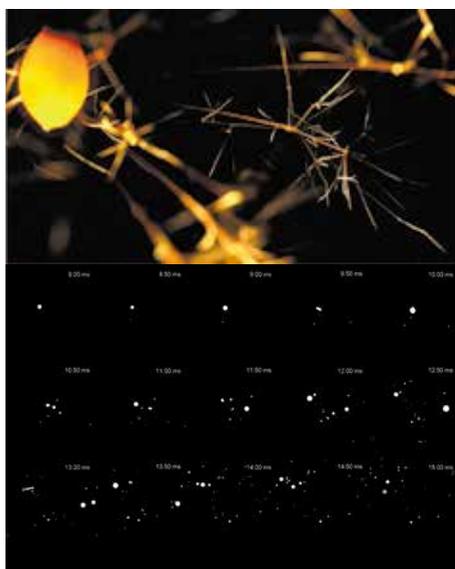


図7. 火花が枝分かれする様子
(上: 火球を飛び出した火花が4回ほど分岐する。Phys. Rev. Lett., 2017 下: 左上から右下に0.5 ms毎の火花液滴。はじめ一粒だった液滴が何度も分裂する。これが上図の松葉火花に見える。)

③はかない色の仕組み

線香花火は黒体放射によって発色するので、温度と色は対応しています。色の仕組みを知るには、温度が決まる仕組みが分かればよいわけです。そこで、カラー高速カメラを使って、線香花火の時々刻々の温度を計測しました。まず、火球の温度は約850度になります。これは、火球に存在する硫化カリウムと炭酸カリウムの微粒子が溶ける温度(融点)で決まります。そして、火球を飛び出した液滴



図8. カラー高速画像(左)と温度換算結果(右)

の温度は、硫酸カリウムの融点（約1100℃）に達します。つまり、3種類のカリウム化合物が溶けることで線香花火の温度が決まり、独特の色味を生み出しています。物質ごとに融点は決まっているので、黒色火薬と和紙のみを使う線香花火の色を変えることはできないでしょう。

5. おわりに

最近明らかになってきた線香花火の科学を解説しました。詳しく知りたい人は、日本燃烧学会誌60巻193号（2018年8月）やPhys. Rev. Lett. 118巻(074502, 2017)を読んで頂きたいと思います。また、写真では伝わりにくい点も多いので、興味がある読者は、Youtubeなどで“Senko-hanabi as Dancing Drops”と検索して動画を見て頂ければ理解が進むでしょう。

線香花火にはまだ未解明な点が残されています。例えば、火球や液滴に発生するガスがどのように生じるのか、まだ誰も知りません。いつか明らかにしたいと思っています。線香花火は知れば知るほど美しいと思います。

偶然から始まった線香花火の研究ですが、著者自身、線香花火からいろいろなことを学ぶことができました。そして、誰もが知る現象でありながら、その本質が明らかにされていないことが、身の回りにたくさんあることを知りました。美しい現象の裏に新しい科学が潜む可能性があることを体験できて、とても幸運だと思っています（必ずあるとは限らないのが難しいところです）。

最後に、寺田寅彦の随筆を引用して結びにしたいと思います。『…線香花火のおもしろく有益な問題が従来だれも手を着けずに放棄されてある理由が自分にはわかりかねる。…こういう自分自身も今日まで捨ててはおかなかったであろう。近ごろフランス人で刃物を丸砥石でとぐ時に出る火花を研究して、その火花の形状からその刃物の鋼鉄の種類を見分ける事を考えたものがある。この人にでも提出したら線香花火の問題も案外早く進行するかもしれない。しかしできる事なら線香花火はやはり日本人の手で研究したいものだと思う。西洋の学者の掘り散らした跡へはるばる遅ればせに鉱石の欠けらを捜しに行くもいいが、われわれの足元に埋もれている宝をも忘れてはならないと思う。しかしそれを掘り出すには人から笑われ狂人扱いにされる事を覚悟するだけの勇気が入用である。』（線香花火、1927）

著者紹介 井上 智博(いのうえ ちひろ)



九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門准教授・博士(工学)1980年福岡県生まれ。ロケットエンジン内部流れの研究に従事。2012年に線香花火の科学と出会い、研究テーマの一つとしてその謎の解明を試みている。