

連携記事

熱放射が魅せる線香花火の儂い色味

Heat Radiation Embodies Fragility of Senko-Hanabi

井上智博

Chihiro Inoue

九州大学大学院
工学研究院 航空宇宙工学部門
准教授

1 花火の色

花火は世界中で楽しまれている。夜空を鮮やかに彩る打揚花火もあれば、儂い色味の手持ち花火もある。メキシコなどでは、大型の仕掛け花火が好まれる。これら花火の発光には2つの原理がある。一つは炎色反応であり、励起された電子が基底状態に戻る際に、元素の種類に応じて、赤や緑、青などの単色光（線スペクトル）を放つ現象である。最近の花火師は、炎色反応を上手く扱い、上空で単色光を混ぜることで、従来難しいとされた紫や水色などの中間色を出せるようになっている（図1）。もう一つは黒体放射（熱放射）であり、プランクの法則に従って、様々な色が混在して発色する現象である。熱放射の色味は温度によって決まり、低温であれば赤っぽく、高温になると青白くなる。線香花火は熱放射によって発光しており、これは製鉄所で鉄が輝くのと同じ原理である（図2）¹⁾。製鉄業界の方は、温度計測を行うまでもなく、線香花火の色味を見れば、その温度が約1000℃であることを推定

できるのではなかろうか。

2 線香花火の不思議

花火には火薬が使われている。最も古い火薬は、炭素（煤）・硫黄・硝酸カリウムの三種を混合した黒色火薬である。火薬には酸素を発生する酸化剤が含まれ、硝酸カリウムが黒色火薬の酸化剤を担う。江戸時代に日本で始まった線香花火²⁾は、黒色火薬を用いている。他の手持ち花火や打揚花火に使用される金属粉などは、線香花火に含まれない。

わずか100mgの黒色火薬を和紙で包んだ線香花火に火をつけると、まず先端の紙縀りが燃える。すぐに火薬に延焼し、激しくガスを噴出しながら揺れて、徐々に先端が丸くなって火球ができる。この段階で、黒色火薬の半分以上がガスとして放出され、30mgほどの重さになっている。橙色味がかかった火球は、直径3~4mmであり、ジジッと小刻みに震える。数秒の間をおいて、勢いよく火花が飛び出し、枝分かれます。



図1 新潟県小千谷市の片貝祭りで奉納された打揚花火（尺玉3発・著者撮影）



図2 線香花火¹⁾

*図1、2、6、7、9は、カラー写真がホームページ（ふえらむ電子版）からご覧いただけます。 <https://y100.isij.or.jp/ferrum/>

間欠的にパッパッと火花が咲き、しばらくすると、火球を取り囲むように火花が連続的に放出され、枝分かれを繰り返す。やがて火花の枝分かれが収まると、弱々しくも可憐な火花が継続する。よくできた線香花火は、火球が落ちることなく指先まで上昇する。実に様々な火花の模様を見せる線香花火は、人間の一生や花の名前にも例えて表現されてきた^{3,4)}。

あまり知られていないが、紙巻りの先端にできた火球は、火薬ではない。この事実は、線香花火が窒素雰囲気中で直ちに消火することを示した、中谷宇吉郎の実験⁵⁾から間接的に明らかにされた。もし、火球に酸化剤が含まれるのであれば、窒素雰囲気中でも燃え続けるはずである。のちに新宿高校の学生達が行った成分分析⁶⁾でも、火球に硝酸カリウムが含まれないことが証明された。つまり、火球の中には、黒色火薬の酸化剤である硝酸カリウムは残っておらず、火球は自身が持つ炭素と空気中の酸素との反応 ($C+O_2$) によって発熱を持続する。点火前に存在していた硝酸カリウムは、様々な化学反応を通じて、硫化カリウム・炭酸カリウム・硫酸カリウムといった別のカリウム化合物へと変化する。すなわち、火球は、これらカリウム化合物の熔融塩と炭素から構成される。

金属粉を含まず、もはや火薬ですらない線香花火の火球から、火花が飛び出し、枝分かれする。子供の頃に不思議に思ったことはないだろうか。なぜ火花が飛び出すのだろうか？なぜ火花が枝分かれするのだろうか？そしてあの儂い色味はどのように生まれるのだろうか？実は、これらの疑問に答えるのは容易ではなく、江戸時代からの謎であった。最近、著者らによって、その謎が明らかにされたので、興味のある読者は文献^{1,7,8)}をご覧ください。ここでは、火花の放出と分岐について簡単に紹介したあとで、線香花火の色味について説明する。

3 火花の放出と分岐

火球をよく観察すると、表面がブクブクと沸騰しているように見える。カリウム化合物の蒸気圧は極めて低いため、実際に沸騰しているわけではないが、化学反応によってブクブクと泡立つ。火球表面に発生した泡は、やがて破裂する。すると、表面張力に駆動された流れによって液滴が放出され(図3)、飛行する液滴の軌跡が火花に見える。グラスに注いだシャンパンの水面に上昇してきた泡が弾けると、水滴が飛び出す現象を見たことがあるだろう(図4)。線香花火の火花が飛び出すのと全く同じ機構である。

飛行中の液滴の表面でも炭素が燃焼し、発熱を持続する。一部の熱は、液滴内部へと伝わり、温度上昇する。液滴全体が十分に温まると、内部で気泡が発生・膨張し、最終的に液滴が弾けて分裂する。分裂した液滴は、再度内部に気泡を生じ、分裂する。最多の分裂回数は、約10回である(図5)。一般に、固体や液体に力を加えて分裂すると、多数の破片が形成される。時間を巻き戻して、破片ができる過程を見ると、すべての破片は、1回しか分裂していない。超高压で液体燃料を噴射したり、超音速気流を液体金属に衝突させた場合も同様で、膨大な数の液滴の一粒一粒は、1度の分裂を経験するだけで作られる。従って、線香花火で見られる連鎖的な液

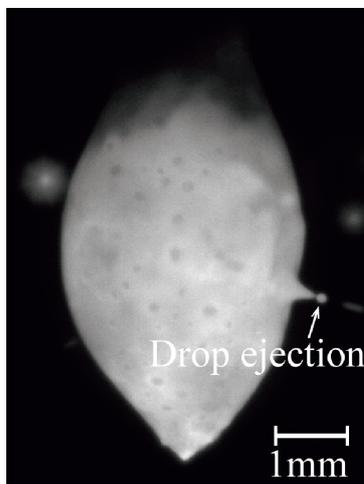


図3 線香花火の火花液滴が飛び出す瞬間

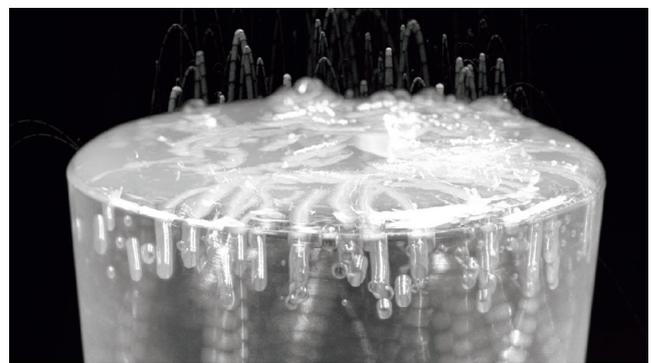


図4 水面の泡が弾けて液滴が飛び上がる時間積分画像

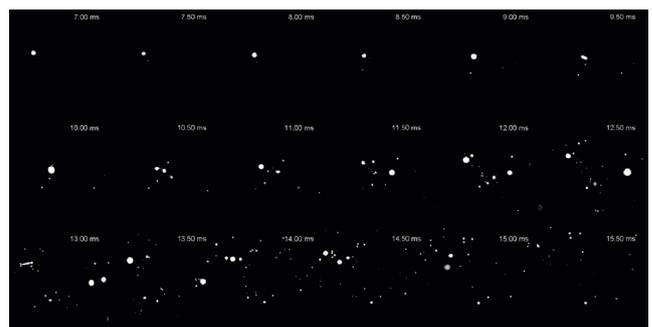


図5 火花液滴の連鎖的な分裂現象⁷⁾
(最初一つであった液滴が、何度も分裂を繰り返す。)

滴分裂は、極めて珍しい現象である。火花の放出と連鎖分裂現象は、動画⁹⁾をご覧頂くとよくわかると思う。

4 儂い色味

線香花火は熱放射によって発光する。熱放射では、色味と温度は同義である。ところで、線香花火と知らずにあの儂い火花を見ても、不思議と線香花火とわかる。このことは、線香花火の温度を決める独特の仕組みがあることを示唆している。そこで、放射率フリーの非接触温度計測法の一つである二色温度法を適用して、火球と火花の温度を計測した(図6)。温度が明らかになれば、なぜその温度(色味)になるのか、理論的に検討できる。

火球を取り囲むように火花が賑わう中盤において、火球の上端から下端までの温度分布を計測した結果を、図7に示す。火球の表面温度 T_s は、構成物質である硫化カリウムと炭酸カリウムの融点(それぞれ1113K, 1164K)の間に位置しており、両者の融解が火球の温度を決める。火球によって加熱された周囲の空気は、浮力によって上昇し、それを補うように常に新鮮な空気が火球の下方から供給される。その結果、火球の下端が最も高温になる。上昇気流は火球周りに境界層(薄い

空気層)を形成し、周囲の空気からの酸素は、境界層を通じて火球に供給される。空気中の酸素濃度より低く、火球よりもはるかに低温である人の息を火球に吹きかけると、火球がより明るくなる。これは、火球周りの境界層が薄くなるのが原因であり、同時に、発熱反応が分子拡散律速の現象であることを示唆する。

続いて、火球を飛び出した火花が枝分かれするまでの温度を時系列に計測した結果について、図8に示す。無次元時刻 $t^*=0$ で火球を飛び出し、 $t^*=1$ で枝分かれする。直径0.1mmの液滴である火花は、単位体積当たりの表面積が火球よりも大きいため、温度は次第に上昇し、もう一つの構成物質である硫酸カリウムの融点(1342K)に漸近する。同一圧力環境では物質の融点は一定であるから、線香花火が黒色火薬のみを使う限り、線香花火の温度は1342Kを超えることはなく、色味が変わることはない。このように、火球と火花に共通して、温度はカリウム化合物の融点で決まっている。線香花火の儂い色味は、燃える色ではなく、溶ける色である。

炭素の燃焼による発熱と火花から周囲空気への放熱、熱放射、そして、硫酸カリウムの融解熱を勘定すると、理論的に得られる火花の平衡温度は約1400Kとなり、温度計測結果とよく一致する¹⁰⁾。カリウム化合物の融解を考慮することで、線香花火の熱収支を説明できる。

線香花火と類似の現象として、鉄をグラインダーで研磨すると火花が飛ぶ。図9に示す、純鉄火花の温度は最高で2000Kに達し、線香花火の最高温度を大きく上回る¹⁰⁾。これは、鉄の酸化熱が炭素の酸化熱よりも大きいことと、最高温度付近では鉄の融解が完了し、融解熱による熱消費がないためである。逆に線香花火の独特の儂さは、発熱が小さく、カリウム化合物の融解が継続することによって、火花には低温が維持されることによってもたらされる。この絶妙の熱収支と、それを実現する黒色火薬の配合が江戸時代に見出されて線香花火が作られた。19世紀には欧米でも知られていた

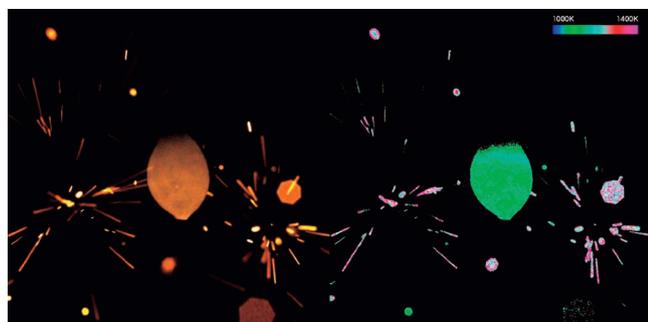


図6 線香花火の温度計測¹⁰⁾
(左図: 瞬時のカラー画像、右図: 温度分布)

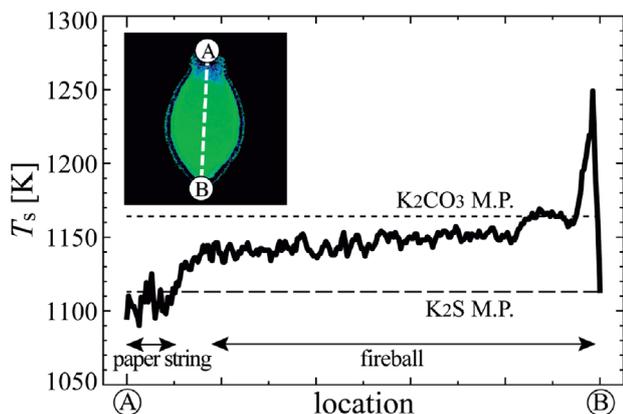


図7 火球の温度分布(火球上の位置AからBの温度分布)

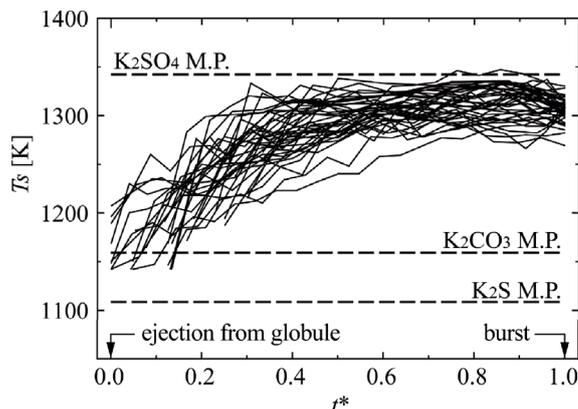


図8 火花の時系列温度変化¹⁰⁾

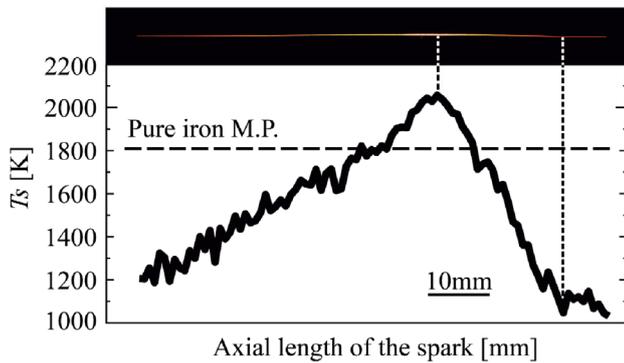


図9 グラインダーから飛散した純鉄火花(上図)とその温度履歴(下図)¹⁰⁾

が^{11,12)}、今では線香花火を知る人はいない。一方で、令和の時代になっても、日本人が線香花火に魅せられるのはなぜだろうか。線香花火は知れば知るほど美しい。

5 まとめ

著者が偶然に線香花火の研究を始めたのは2012年8月13日であった。それから5年ほどかけて、線香花火の謎の一端が科学的に明らかにされた。本稿では、線香花火の色味を中心に紹介した。今年の夏、国産の線香花火をじっくり観察するきっかけになれば幸いである。線香花火は、誰もが知っているけれど誰も知らない現象が身の回りに沢山あることを物語る一例だと思う。

最後に、線香花火が縁となって、熔融金属の微粒化による微粒子製造の研究や、スズ液滴を使った次世代EUV

(Extreme UltraViolet ray)の研究に携わる機会を得た。線香花火に学べたことは、とても幸運である。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、科研費(JP17H00844、JP19K21934)の支援を受けた。厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) C.Inoue, Y.Izato, A.Miyake and E.Villiermaux : Physical Review Letters, 118 (2017), 074502.
- 2) 西川祐信：絵本十寸鏡, (1748)
- 3) 寺田寅彦：寺田寅彦随筆集, 2 (1964)
- 4) 清水武夫：花火の話, (1976)
- 5) 中谷宇吉郎, 関口讓：理化学研究所彙報, 6下 (1927) 12, 1083.
- 6) 前田明ら：線香花火の研究, 東京都立新宿高等学校定時制物理部, (1962)
- 7) 井上智博：日本燃焼学会誌, 60 (2018) 193, 156.
- 8) 井上智博：現代化学, 557 (2017), 41.
- 9) C.Inoue : YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=kMrvKMciELs>
- 10) C.Inoue, T.Watanabe and Y.Inokuchi : Science and Technology of Energetic Materials, 80 (2019) 4, 136.
- 11) A.W.Williamson : Chemical News, Dec. 24, (1864)
- 12) A.Denisse : Feux D'Artifice, (1882)

(2020年1月6日受付)