

線香花火：美しさの秘密が明らかに

1. **発表者：** 井上 智博（東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 特任准教授）

2. **発表のポイント：**

- ◆ 江戸時代から親しまれてきた線香花火における火花の発生・分岐の鮮明な高速度撮影に成功し、世界で初めて理論的に定式化した。
- ◆ 液滴が繰り返して何度も分裂する現象が新たに明らかになり、連鎖的に分裂する液滴の軌跡が線香花火の火花を描くことが解った。
- ◆ 火花がなぜ枝分かれするのかという素朴な疑問を解決することで、美しさを生み出す科学を一つ解明した。

3. **発表概要：**

日本では江戸時代に花火を作るようになった。なかでも0.1グラムの黒色火薬（注1）と和紙からできる線香花火（注2）は最も単純な手持ち花火である（図1）。

線香花火は、紙縀り（こより）の先端にできた火球から火花が飛び出し、枝分かれして美しい松葉模様を描く。これまで数世紀のあいだ、なぜ火花が飛び出し枝分かれするのかという素朴な疑問に対する答えは明らかにされてこなかった。

今回、東京大学大学院工学系研究科の井上智博特任准教授は、共同研究者である横浜国立大学の伊里友一朗助教・三宅淳巳教授、エクスマルセイユ大学のエマニュエル・ビエルモ教授と線香花火が持つ美しさの物理的解明を試みた。その結果、火花の発生・分岐の鮮明な高速度撮影に初めて成功し、主要な化学反応を明らかにした。また、火花の挙動を理論的に定式化した。

まず火球表面の気泡が弾けて高温の液滴が飛び出す。液滴表面の発熱反応によって生じた熱が内部に伝わってガスが発生・急膨張して液滴が破裂し、子液滴に分裂する。最終的に、液滴が最大8回も連鎖的に分裂することで松葉火花を形成することが分かり、線香花火の美しさの秘密が明らかになった。

4. **発表内容：**

① 研究背景

線香花火は江戸時代から夏の風物詩の一つとして広く親しまれてきた。寺田寅彦（1878－1935）もその儂い美しさに魅せられた一人である。これまでに火球と火花が周囲酸素との化学反応を通じて発熱すること（中谷宇吉郎 1927）や、黒色火薬の反応生成物であるカリウム化合物（注3）によって構成されること（前田明 1960）が明らかになっていた。一方で、出ては消える火花を鮮明に撮影するのは難しく、線香花火を彩る火花については謎に包まれていた。

発表者は、ロケットや人工衛星のエンジンにおける液体推進薬の分裂現象を研究しているが、2012年8月13日に高速度カメラを使って線香花火を撮影してから、線香花火が液体の分裂によって構成されることに驚き興味を持った。過去の文献では、そもそも火花が飛び出す機構すら明らかになっておらず、以降、線香花火が持つ美の物理的解明を研究テーマの一つにしている。

② 研究内容

今回、高速度カメラ「Photron SA-Z」を使って線香花火の鮮明な時系列映像を毎秒 10 万コマで撮影することに成功した（参考資料の動画 URL 参照）。まず、紙縫りの下端にできた火球の表面を見ると、たくさんの気泡が存在する。突然、気泡が弾けて表面張力に駆動された流れが生じ、直径 0.1mm の液滴が 1m/s の速度で飛び出す。これは、グラスに注いだシャンパンの泡から水滴が飛び上がるのと同じ原理である。グラスから聞こえるシュワシュワの音と同様に、線香花火のパチパチという音も気泡の破裂音である。この飛び出した液滴の残像が我々には火花に見える。飛行中の液滴表面では炭素と周囲酸素との発熱反応を通じて熱発生し、表面温度がカリウム化合物の融点（注 4）まで上昇する。次第に表面の熱が内部に伝わって液滴全体が加熱されると内部で発泡する。内部のガスが急激に成長することで液滴が膨張して破裂する。液滴ができてから破裂するまでの時間は、液滴が温められる熱伝導の時間に等しい。液滴が破裂して分裂すると、およそ半分のサイズの子液滴が数個生成され、その子液滴も同じプロセスを経て分裂を繰り返す。火球を飛び出した液滴が何度か分裂して十分小さくなると、液滴表面の発熱よりも周囲空気による冷却が支配的になり、温度が下がって分裂が終わると同時に火花が消える。今回、火球を飛び出した液滴が最大 8 回も連鎖的に分裂しながら描く軌跡が松葉火花を形成することが分かった。通常、固体や液体は 1・2 回分裂すると安定になるため、外的な力を加え続けられない限りそれ以上分裂しないのに対して、線香花火では孤立液滴が何世代にもわたって子液滴を作り続ける。論文中では、この新しい分裂形態を *successive fragmentation*（液滴連鎖分裂）と称し、それによって作られる一連の自己相似現象を *direct cascade* と呼んでいる。線香花火の独特の美しさは、従来知られていた分裂現象とは異なる、液滴の連鎖分裂によって生み出されていたことが明らかになった。

本研究は福岡県の線香花火職人である筒井時正玩具花火製造所の筒井良太・今日子夫妻の協力のもと行った。

③ まとめと今後の予定

本研究により、江戸時代から親しまれてきた線香花火の美しさを生み出す科学が一つ明らかになった。一方で、火花が分岐せず柳のようになるときの仕組みは解明されておらず、今後の研究が期待される。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Physical Review Letters (2 月 13 日オンライン掲載予定, 2 月 17 日出版予定)

論文タイトル：Direct Self-Sustained Fragmentation Cascade of Reactive Droplets

著者：Chihiro Inoue*, Yuichiro Izato, Atsumi Miyake, and Emmanuel Villermaux

アブストラクト URL：

<https://journals.aps.org/prl/accepted/ad074YbeJc41844006fc7c0221f96a6a33eafa8c3>

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

特任准教授 井上 智博 (いのうえ ちひろ)

7. 用語解説：

(注1) 黒色火薬

黒色火薬は硝酸カリウム・炭素（松煙）・硫黄の混合物。戦国時代後期に火縄銃とともに伝来した。

(注2) 線香花火

線香花火には、和紙の下端に黒色火薬を包んだ『長手』と、わらの上端に、にかわで練った黒色火薬をつけた『すぼ手』の2種類がある。現在、長手は群馬県・愛知県・福岡県で製造され、すぼ手は福岡県のみで作られている。国産線香花火は世界の生産量全体の1%に満たない。

(注3) カリウム化合物

黒色火薬が燃焼してできた火球は、主に3つのカリウム化合物（硫化カリウム・炭酸カリウム・硫酸カリウム）と炭素によって構成されている。

(注4) カリウム化合物の融点

硫化カリウムと炭酸カリウムの融点によって火球の温度（880℃）が決まり、硫酸カリウムの融点によって火花の上限温度（1070℃）が決まる。打上花火は燃焼温度が高く炎色反応によって鮮やかな色彩を見せるのに対して、燃焼温度が比較的低い線香花火は黒体輻射によって発色する。黒体輻射では物体の温度に応じて色が決まる。線香花火独特の色味はカリウム化合物の融解のおかげである。

8. 参考資料 :



図 1) 線香花火

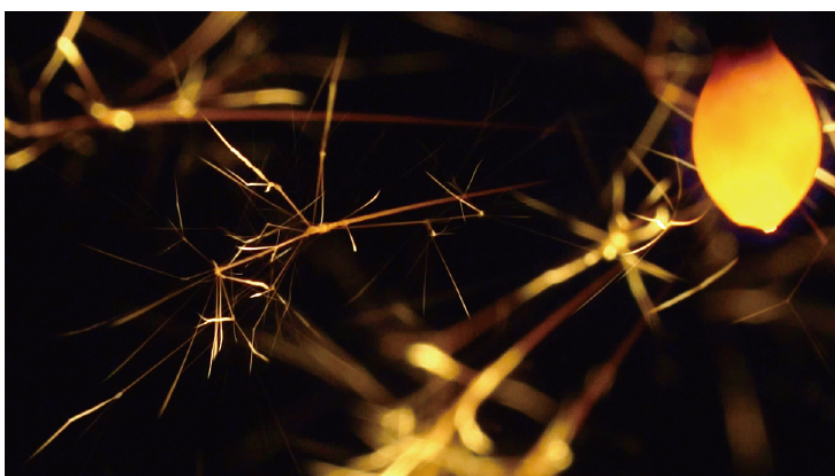


図 2) 火花の分岐

【動画】 : Senko-hanabi as Dancing Drops (© Chihiro Inoue)

https://www.youtube.com/watch?v=kMrvKMciELs&index=2&list=PLcrGtGqvM_HpwN_IXBEP6x0wO_QP6bjPv